



COSTAS DE CHILE

Medio Natural • Cambio Climático • Ingeniería Oceánica • Gestión Costera



Esteban Morales Gamboa • Patricio Winckler Grez • Mario Herrera Araya

COSTAS DE CHILE

Medio Natural • Cambio Climático • Ingeniería Oceánica • Gestión Costera



Esteban Morales Gamboa • Patricio Winckler Grez • Mario Herrera Araya

ISBN: 978-956-235-031-0

COSTAS DE CHILE

Medio Natural, Cambio Climático, Ingeniería Oceánica y Gestión Costera

Esteban Morales G., Patricio Winckler G. y Mario Herrera A.

«Autorizada su circulación por Resolución Exenta N° 131 del 06 de diciembre de 2019, de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado.

La edición y circulación de mapas, cartas geográficas u otros impresos y documentos que se refieran o relacionen con los límites y fronteras de Chile, no comprometen, en modo alguno, al Estado de Chile, de acuerdo con el Art. 2°, letra g) del DFL N° 83 de 1979 del Ministerio de Relaciones Exteriores».

© 2019, E. Morales, P. Winckler y M. Herrera.

Inscripción de Propiedad Intelectual N° A-310782 del 13 de diciembre de 2019.

Los autores ceden sus derechos al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Libro de distribución gratuita. PROHIBIDA SU VENTA.

Los contenidos publicados en el libro «Costas de Chile» son de exclusiva responsabilidad de sus autores. El SHOA solamente ha actuado como editor e impresor, en el contexto de las atribuciones legales que le confiere la normativa vigente.

Impreso y publicado por el
Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
Errázuriz 254, Playa Ancha.
Casilla 324. Valparaíso.
Teléfono: +56-322266666.
shoa@shoa.cl

Secretaría Ejecutiva
Comité Oceanográfico Nacional (CONA).
Errázuriz 254, Playa Ancha.
cona@shoa.cl

Foto de la Portada: Gentileza de Daniel Concha Blanlot. Montemar bajo las olas.



Para leer los Códigos QR del libro es preciso tener instalado un lector en el dispositivo móvil (Smartphone, Tablet, etc.).





❖ *A mi hija Constanza, Magíster en Arquitectura de la PUC y muy comprometida con la zona costera de Chile.*
❖ *(E. Morales)*

❖ *A Claudia, Tito y Pituti, por el lindo viaje que hemos emprendido alguna vez por oceános, ciénagas y nuestro Chile.*
❖ *(P. Winckler)*

❖ *A Marcela, Jesusita y Pazi, por el constante apoyo y amor; a todos quienes amamos el mar, sus costas y ecosistemas.*
❖ *(M. Herrera)*

SOBRE LOS AUTORES



El **Dr. Esteban Morales Gamboa** es Geógrafo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Sus estudios de especialidad y grados superiores fueron realizados en Europa, Estados Unidos de Norteamérica y Chile. Fue alumno de la Escuela Práctica de Altos Estudios de París, Francia (1971-1972) y efectuó cursos de post grado en el Instituto Oceanográfico de Mónaco (1970-1971). En 1972, obtuvo el grado de Doctor en Geomorfología Submarina en la Universidad de París-Sorbonne. En 1978, fue distinguido como Profesor de Intercambio en Estados Unidos con apoyo de la Fundación Fulbright. En 2007 se graduó como Magíster en Historia y Relaciones Internacionales en la PUCV. Su actividad docente se ha desarrollado a partir de 1972 tanto en la PUCV, como en la Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Chile, Universidad Andrés Bello, Universidad de Valparaíso y en la Armada de Chile. Se ha desempeñado como profesor visitante en la Universidad José Tadeo Lozano, Colombia, en la Armada de Colombia y en la Universidad Estatal de Oregón, en Estados Unidos. En 1972 asume como el primer Director de la nascente carrera de Oceanografía en Chile. Durante quince años (1984-1999) se desempeñó como Decano de la Facultad de Recursos Naturales de la PUCV. En el año 2012 asume como Director del Centro de Estudios Oceánicos y Antárticos de la Universidad Andrés Bello. Ha participado en numerosas campañas oceanográficas en varios océanos del mundo. Es autor de estudios y publicaciones científicas en revistas tanto nacionales como extranjeras. Ha publicado siete textos utilizados en docencia universitaria. Entre 1974 y 1982 fue conductor y productor de programas relacionados con las ciencias del mar en televisión abierta. Ha sido Investigador y director de proyectos FONDECYT (4), FONDEF (2) y MESESUP (1). Es miembro del Comité Oceanográfico Nacional, ha participado ante la Autoridad de los Fondos Marinos de las Naciones Unidas con sede en Jamaica y ha asesorado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile en la problemática de la «Plataforma Continental Extendida» de las Naciones Unidas. Su última y más relevante actividad científica fue la de dirigir entre 2000 y 2004 el proyecto «Hidratos Submarinos. Una nueva fuente de energía para el siglo XXI». Es submarinista Honorario de la Armada de Chile.



El **Dr. Patricio Winckler Grez** es Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María (2002) y ha efectuado estudios de postgrado en España, Finlandia, Inglaterra y Estados Unidos. Después de un inicio en la consultoría, ingresó en 2005 al grupo de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso, y en 2015 obtuvo un PhD in Civil and Environmental Engineering en Cornell University, Estados Unidos, bajo la dirección del Profesor Philip Liu. Ha sido investigador visitante en la Universidad Nacional de Singapur (2016) y en la Universidad de Tokio (2017-8), financiado por becas nacionales e internacionales (Fulbright, The Matsumae Foundation, Beca Alpha y Becas Chile). Sus intereses abarcan una amplia gama de temas relacionados con la ingeniería costera, desde las condiciones ambientales hasta el diseño de obras portuarias. A la fecha ha estado involucrado en más de 70 proyectos de ingeniería marítima y ha participado de varios comités consultivos para definir normas de diseño de edificaciones, políticas asociadas a riesgos naturales y aspectos relacionados con el impacto del cambio climático en el territorio costero. Ha escrito decenas de publicaciones, donde ha participado como autor o coautor. Ha dictado conferencias en Estados Unidos, México, España, Korea, Singapur, Colombia, Perú y Japón. Es investigador asociado del Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) y del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTA-R) de la Universidad de Valparaíso. Hoy comparte sus labores académicas con el arte (www.patowinckler.cl).



El **Profesor Mario Herrera Araya** es Biólogo Marino y Abogado, con diversas especializaciones y postítulo en materias sobre Gestión Integrada del Borde Costero, Derecho Ambiental e Instrumentos Jurídicos Internacionales para el Medio Ambiente, y Derecho Marítimo Ambiental. En el ámbito laboral, se ha desempeñado por 26 años en actividades técnicas y jurídicas asociadas al medio ambiente marítimo y al derecho ambiental marítimo, conjugándolos con su experiencia en biología marina y en el campo del derecho, tanto en el ámbito público, como asesor de la Autoridad Marítima Nacional, y en el terreno privado, inicialmente como investigador científico de instituciones ligadas al medio ambiente y de la Autoridad Marítima, y posteriormente como Subgerente de Medio Ambiente y Sustentabilidad de una consultora ambiental, y actualmente, como Gerente Legal de un Holding de empresas ligadas al quehacer medioambiental y de la innovación. En el ejercicio particular se ha desarrollado como abogado litigante y académico de la Universidad Valparaíso y de la Academia de Guerra Naval. Entre sus logros, han estado la contribución que ha efectuado en diversos instrumentos ambientales nacionales, la participación en la redacción de importantes convenios internacionales asociados a la contaminación de los buques, y más recientemente en la colaboración del capítulo sobre Ecosistemas Marinos y Borde Costero del Informe País, Estado del Medio Ambiente, Comparación entre los años 1999 y 2015, que fue coordinado por el Instituto de Políticas Públicas de la Universidad de Chile, entre otros. A su vez, el Profesor Herrera, además, ha sostenido una activa participación en la difusión del derecho ambiental y marítimo, a través de diversos artículos que han sido publicados fuera y dentro de Chile, tales como «Lecturas sobre Derecho del Medio Ambiente» y «Lecturas sobre Derecho de las Aguas», en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Este libro surge de conversaciones con muchos académicos, alumnos y profesionales que se desvelan por temas relacionados con la costa, el mar y el cambio climático. Su nacimiento es posible gracias al apoyo que dio el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), a través de su Comité Oceanográfico Nacional (CONA), y nuestra casa, la Universidad de Valparaíso.

Queremos dar especiales agradecimientos al Director del SHOA y Presidente del CONA, Contraalmirante don Patricio Carrasco Hellwig, por apoyar la producción del libro y disponer que se editara, diagramara e imprimiera en los talleres gráficos del Servicio bajo su dirección. Asimismo, al Capitán de Fragata don Carlos Zúñiga Araya, Jefe del Departamento de Oceanografía, por su confianza y positiva predisposición frente a la obra.

Agradecer de todo corazón al tremendo equipo editorial constituido por María Inés Pérez, Ricardo Aliaga y Claudia Pinto, quienes transformaron nuestras ideas en una pieza de lectura bella y bien escrita; al personal de la imprenta del SHOA, en la persona del Suboficial Luis Altamirano Toledo, quienes imprimieron el tiraje en papel. También queremos agradecer a don Juan Fierro, Secretario Ejecutivo del CONA, por sus revisiones y aportes en la sección de oceanografía. La rigurosidad, perseverancia y buena acogida de todo este equipo hizo de esta, una sublime experiencia editorial.

Agradecemos también a la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, de la cual todos tenemos el privilegio de formar parte y en cuyas aulas se fue cuajando durante años, parte importante de los contenidos del libro. También queremos valorar el aporte del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR-UV) y del Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) por apoyar la investigación en varios de los temas tratados en el texto.

Los aportes de piezas únicas incluidas en este libro provienen de muchas personas que colaboraron desinteresadamente. Agradecemos a Claudia Urrutia y Alice Hoppe por haber leído y releído el manuscrito en su etapa infante; al Profesor Erick Mas, de Tohoku University, por la información de los Tetráneos utilizados en Misaki port; a Patricio Rivera, David Jara y Daniel Concha por las fantásticas fotos de la Estación de Montemar; al Profesor Manuel Contreras-López y Cristián Larraguibel, por las fotos de El Yali y Cartagena; a Mauricio Molina por sus fotografías en la bahía de Valparaíso; al Comandante Enrique Vargas, por sus aportes en temas de ordenamiento jurídico en la zona costera; al ingeniero Raúl Oberreuter por varias ideas que cruzan el texto; al Profesor Hellmuth Sievers por sus buenas sugerencias para mejorarlo; a Karla González por facilitar desinteresadamente fantásticas fotos de modelos físicos realizados en el Instituto Nacional de Hidráulica, al Profesor Patricio Catalán por la información sobre terremotos

históricos en Chile, a Horacio Parragué por la elocuente foto aérea de canal Chacao, a Adolfo Andaur por su eternos vuelos en dron caminando Chile.

También deseamos agradecer a varios exalumnos —hoy ya profesionales— como Stephanie Fritz, César Esparza, Pablo Córdova, Matías Carvajal, Raimundo Ibaceta, Rodrigo Campos, Harold Díaz, Francisco Molteni y Rolando García, entre otros muchos que aportaron ya sea directa o indirectamente al texto.

Finalmente, queremos agradecer al Dr. Juan Carlos Castilla, Premio Nacional de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas 2010, por sus palabras finales dedicadas al libro, donde nos ha compartido, una vez más, sus sabias ideas.

AFILIACIONES DE LOS AUTORES



Universidad
de Valparaíso
CHILE



CIGIDEN
Centro de Investigación
para la Gestión Integrada
del Riesgo de Desastres



OSTA-R^{UV}



INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA



ecotecnos
CONSULTORES AMBIENTALES

Estación de Biología Marina de Montemar, actual Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales de la Universidad de Valparaíso. El edificio fue construido entre 1941 y 1959 por el arquitecto chileno Enrique Gebhard.

La Escuela de Ingeniería Oceánica fue fundada en este lugar en el año 2000.

(Foto: Gentileza de David Jara).





Playa al sur de Huasco, Región de Atacama. Al fondo se observan los farellones costeros típicos de las costas del norte del país.

(Foto: P. Winckler).

PREFACIO

Los océanos desempeñan una función primordial para la vida en la Tierra. Los ecosistemas marinos son los más extensos del planeta, ellos ocupan el 72% de su superficie y son esenciales para la sobrevivencia de la raza humana. Nuestra dependencia de los océanos es innegable. Lo que ocurre en ellos tiene efectos en la tierra y viceversa, aun cuando estemos distantes del litoral, la climatología que ahí reine será el resultado del comportamiento del océano.

Para quienes viven próximos a las zonas costeras, la dependencia es aún mayor. A nivel mundial, aproximadamente, 680 millones de personas habitan en los sectores costeros continentales, en tanto que pequeños Estados insulares son el hogar de 65 millones de habitantes. Estas grandes comunidades no tienen otra alternativa que convivir con el océano y sus ecosistemas marinos asociados.

Podríamos concluir en el innegable vínculo que existe entre los océanos y la sociedad.

La realidad en Chile nos da cuenta de que casi un millón de personas vive bajo la cota de 10 metros sobre el nivel del mar; un cuarto de su población está distribuida en 100 comunas costeras y dos insulares; donde 467 caletas de pescadores, oficialmente registradas, dan sustento a 92000 trabajadores vinculados a la pesca artesanal. Se suma a lo anterior aproximadamente 3400 pisciculturas y concesiones acuícolas que constituyen importantes fuentes de trabajo a las que se suman medio millón de personas que desarrollan actividades relacionadas, entre ellos, comerciantes, intermediarios y exportadores, destacando que el 95% del intercambio comercial del país se desarrolla a través de los océanos.

La tierra y el océano, desde una perspectiva geográfica, limitan en lo que denominamos «borde costero» o sencillamente la «línea de costa». Ahora bien, la franja del litoral da origen a la «zona costera» que teniendo una anchura variable, constituye el área de ocurrencia de la natural interacción entre estos dos cuerpos. La zona costera es un recurso de enorme importancia toda vez que las actividades que en ella se realizan son diversas, complementarias o excluyentes, que podrían ameritar una zonificación y definitivamente una administración que preserve el medio y la sustentabilidad de las actividades humanas que en ella se desarrollan.

En este contexto, son las costas de Chile, con sus singulares características geográficas, el objeto de estudio de este libro, que con una mirada académica nos describe su geomorfología, procesos y fenómenos medioambientales; infraestructura litoral y de protección de las obras marítimas; recursos minerales y energéticos; asimismo, su ordenamiento jurídico y de gestión costera; materia, esta última, en la cual la Armada es actor fundamental en su rol de Autoridad Marítima para otorgar 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 las aguas de jurisdicción nacional, y a su vez también como organismo oficial y técnico del Estado en disciplinas como la Hidrografía y Oceanografía, a través de su Servicio Hidrográfico y Oceanográfico.

Mención aparte merece el desarrollo de la temática sobre cambio climático. La evidencia científica sobre su impacto en los ecosistemas marinos revela la vulnerabilidad a la que se exponen los habitantes y el entorno de los territorios costeros. Una gran cantidad de infraestructura y edificaciones emplazadas en las áreas litorales bajas fueron diseñadas sin considerar el cambio climático y se ven enfrentadas a nuevas condiciones e incrementos de eventos extremos, como las marejadas, las cuales generan procesos de erosión, olas que pasan por sobre sus defensas e inundaciones de terrenos cada vez más frecuentes en zonas litorales bajas. Ciertamente, a ello no ha estado ajeno la zona costera del centro del país, donde se emplazan algunas de las principales ciudades.

Este libro es un aporte integral y multidisciplinario para el conocimiento de la costa de Chile, cuyos procesos asociados al cambio climático es necesario comprender en profundidad para poder apoyar las medidas para un desarrollo sostenible e integral en beneficio del medio ambiente marino de Chile y sin lugar a dudas, del planeta.

JULIO LEIVA MOLINA

Almirante

Comandante en Jefe de la Armada de Chile

PRÓLOGO

Como heredera de la Universidad de Chile, la Universidad de Valparaíso ha mantenido ininterrumpidamente la estación de Biología Marina de Montemar, cuya fundación se remonta a julio de 1945. Esta entidad ha sido pionera en el desarrollo de nuevos conocimientos sobre el océano y las costas de nuestro país y del litoral del Pacífico sudamericano. La visión de un puñado de académicos, liderados por el Profesor Parmenio Yáñez, permitió efectuar contribuciones decisivas a la ciencia, tales como la organización del «Primer Congreso Latinoamericano de Oceanografía, Biología Marina y Pesca», donde se discutieron las bases científicas de la Declaración de Chile (23 de junio de 1947) y de Perú (1 de agosto de 1947) sobre doctrina de las 200 millas, vigente hasta el día de hoy.

Por medio de este texto, profesores de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica, nacida de ese legado, renuevan setenta y cinco años más tarde el compromiso de nuestra Institución en la tarea nacional por el conocimiento y protección del territorio costero. Este libro cobra aún mayor relevancia en momentos en que la actividad humana se suma a la complejidad de la naturaleza, generando uno de los mayores desafíos de la especie humana en el futuro próximo: el cambio climático.

Es motivo de orgullo para la Universidad de Valparaíso haber trabajado junto al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada en la elaboración de este texto, que está destinado a entregar un mejor y renovado conocimiento de su extenso litoral.

ALDO VALLE ACEVEDO
Rector
Universidad de Valparaíso



Bosque sumergido consecuencia del megaterremoto y tsunamis de 1960, que provocó hundimientos del nivel del suelo e inundaciones de terrenos (Río Chepu, Isla Grande de Chiloé, Región de Los Lagos).

(Foto: P. Winckler).

PRESENTACIÓN

Las costas de los países constituyen uno de los lugares del planeta que evolucionan más rápidamente, producto del dinamismo propio de la interacción aire-mar-tierra y de los diversos procesos que las condicionan y configuran.

Chile, país con una posición privilegiada en el océano Pacífico Suroriental, posee una gran superficie marítima donde destaca, no solamente por su belleza natural, sino que además por lo propicia de sus condiciones para el emplazamiento de centros poblados y el desarrollo de múltiples actividades económicas, turísticas, recreacionales y deportivas.

Siendo un país dependiente del océano, tanto desde punto de vista económico como social y cultural, sus características naturales constituyen poderosas razones para profundizar en el conocimiento del litoral, con el propósito de apoyar la administración y gestión de la zona costera; la operación portuaria y el nivel de seguridad de las obras de protección; hoy día más que nunca, dado que los procesos climáticos y oceanográficos son fuente de riesgo e incertidumbre que aumentan la vulnerabilidad de la zona costera, tal como lo señalan los estudios derivados de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, que clasifican a Chile como un país altamente vulnerable al cambio climático.

De estos temas y otros más trata el libro «Costas de Chile», que cuenta con el patrocinio del Comité Oceanográfico Nacional (CONA) y del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada que suscribe, en su calidad de editor e impresor, en el marco de sus atribuciones como organismo técnico y oficial del Estado de Chile en Oceanografía, entre otras materias.

El primero de sus seis capítulos, «La naturaleza de la zona costera», expone al lector las interacciones que predominan en la zona costera; aborda los conceptos generales asociados a los factores hidrodinámicos; los diferentes tipos de costas y principales formaciones geomorfológicas y muestra, además, la dinámica sedimentaria y los procesos erosivos que se experimentan en el litoral.

El capítulo 2, «La zona costera de Chile», da cuenta de la climatología en el territorio nacional y su relación con la ubicación geográfica del país, en el margen oriental de la cuenca del océano Pacífico. Incluye también secciones que ilustran temáticas propias de la oceanografía física, de la geología y la geomorfología, las que son presentadas con gran detalle, basándose en casos y ejemplos concretos verificados a lo largo de la costa de Chile.

El capítulo 3, «La infraestructura portuaria y costera», entrega inicialmente una clasificación de las obras marítimas emplazadas en la costa, para posteriormente describir las variables a considerar –particularmente aspectos económicos que no se pueden eludir– en el diseño y las metodologías empleadas para la construcción de aquellas obras destinadas a la protección del litoral.

El capítulo 4, «El cambio climático», introduce una temática compleja y en rápida evolución, donde intervienen múltiples factores que inciden en las variaciones que se aprecian en el borde costero. Se analizan los sistemas oceánicos y atmosféricos, cuya interacción es gravitante para el comportamiento y variabilidad del clima, lo que se ve reflejado en la descripción efectuada de las tendencias y proyecciones de parámetros oceanográficos de interés. Complementariamente, se ilustra el potencial impacto sobre conformaciones naturales, puertos y ciudades en el litoral nacional, además de las medidas de adaptación factibles de aplicar en el país.

El capítulo 5, «Recursos minerales y energéticos en la zona costera», contiene antecedentes e información relativos a los variados recursos minerales existentes en el litoral de Chile y describe las riquezas energéticas disponibles en el país, con énfasis en las energías renovables no convencionales y en particular en aquellas de origen marino, factibles de explotar en la costa y sus inmediaciones.

Finalmente, el capítulo 6, «El ordenamiento jurídico y gestión de la zona costera», resalta la importancia de disponer de un ordenamiento jurídico para el adecuado manejo del borde costero. Es así como se documenta la normativa internacional en resguardo del medio ambiente marino y costero, incluyendo políticas regionales, protocolos, acuerdos y convenciones internacionales. Complementariamente, se incluyen definiciones relevantes para la gestión de la costa, exponiendo estrategias para el manejo costero e identificando a los organismos nacionales directamente involucrados en esta temática.

Se estima que esta obra debiese ser un material de apoyo educativo para profesores y estudiantes, además de una guía práctica y amena para todos aquellos que desarrollen actividades en la zona costera del país. Las atractivas imágenes que contiene, que dan cuenta de lo que acontece en el medio ambiente marino, cautivarán al lector y le permitirán conocer cómo operan los procesos oceanográficos y meteorológicos, facilitarán la comprensión de los cambios que experimenta el litoral y le proporcionarán una orientación en aspectos jurídicos que son aplicables en esta zona.

Invito al lector a conocer las «Costas de Chile», conformadas a través de los siglos por la acción del océano de mayor extensión del planeta y respecto del cual, durante el año 2020, se conmemoran los 500 años desde que el navegante portugués Hernando de Magallanes, lo bautizara como «Pacífico».

PATRICIO CARRASCO HELLWIG

Contraalmirante

Director del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile

Presidente del Comité Oceanográfico Nacional

TABLA DE CONTENIDOS

EDITORIAL

SOBRE LOS AUTORES.....	IV
AGRADECIMIENTOS	VI
PREFACIO.....	IX
PRÓLOGO	XI
PRESENTACIÓN	XIII
TABLA DE CONTENIDOS	XV
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO 1

LA NATURALEZA DE LA ZONA COSTERA	2
1.1 FACTORES HIDRODINÁMICOS	3
1.2 MORFOLOGÍA COSTERA	7
1.2.1 Costas rocosas.....	8
1.2.2 Costas de material no consolidado.....	10
1.3 FORMACIONES GEOMORFOLÓGICAS TÍPICAS	11
1.3.1 Costas de acumulación.....	12
1.3.1.1 Playas	12
1.3.1.2 Dunas	17
1.3.1.3 Estuarios	19
1.3.1.4 Humedales	20
1.3.1.5 Deltas.....	20
1.3.2 Costas de ablación	22
1.3.2.1 Acantilados.....	22
1.3.2.2 Rías	22
1.3.2.3 Fiordos.....	23
1.3.3 Tipos de costas inexistentes en Chile	24
1.3.3.1 Atolones.....	24
1.3.3.2 Manglares.....	25
1.4 LA DINÁMICA SEDIMENTARIA	25
1.4.1 Fuentes de sedimentos	25
1.4.2 Transporte de sedimentos en la zona rompiente.....	25
1.4.2.1 Transporte transversal de sedimentos	26
1.4.2.2 Transporte longitudinal de sedimentos.....	26
1.4.2.3 Mecanismos fundamentales de transporte	26
1.4.3 Técnicas de estudio de evolución de playas	28
1.4.3.1 Balance sedimentológico.....	28
1.4.3.2 Técnicas de percepción remota.....	30
1.4.3.3 Levantamientos topo-batimétricos	31
1.4.3.4 Modelación física y numérica.....	32
1.4.4 Erosión natural en las costas	36
1.4.5 Erosión provocada por el hombre.....	38
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO.....	40

CAPÍTULO 2

LA ZONA COSTERA DE CHILE	42
2.1 MARCO DE REFERENCIA.....	42
2.2 DEMOGRAFÍA.....	43
2.3 CLIMATOLOGÍA.....	45
2.3.1 Climatología entre Arica a Coquimbo.....	45
2.3.2 Climatología entre Coquimbo al Golfo de Penas.....	46
2.3.3 Climatología entre el Golfo de Penas hasta Cabo de Hornos.....	46
2.4 OCEANOGRAFÍA.....	47
2.4.1 Corrientes oceánicas.....	47
2.4.2 Marea astronómica.....	49
2.4.2.1 Las mareas en Chile.....	50
2.4.2.2 Corrientes de marea.....	51
2.4.3 Marea meteorológica y meteotsunamis.....	53
2.4.4 Oleaje.....	55
2.4.5 Tsunamis.....	56
2.4.6 Nivel medio del mar.....	57
2.5 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	58
2.5.1 Formación del relieve.....	59
2.5.2 Unidades geomorfológicas principales.....	61
2.5.3 Actividad sísmica y volcánica.....	62
2.5.4 Geomorfología litoral.....	64
2.5.4.1 Las costas abiertas.....	64
2.5.4.2 La zona centro-sur.....	66
2.5.4.3 La zona de fiordos y canales.....	68
2.5.5 Geomorfología submarina.....	72
2.6 TERRITORIO CHILENO ANTÁRTICO.....	73
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO.....	74

CAPÍTULO 3

LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA Y COSTERA	76
3.1 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS OBRAS MARÍTIMAS.....	76
3.1.1 Obras de abrigo.....	77
3.1.2 Obras de atraque.....	77
3.1.3 Obras de gestión y protección del litoral.....	79
3.1.4 Conducciones submarinas.....	79
3.2 DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS.....	80
3.3 CONSTRUCCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS.....	83
3.4 OBRAS DE GESTIÓN Y PROTECCIÓN DEL LITORAL.....	84
3.4.1 Métodos no estructurales.....	84
3.4.1.1 Gestión del retroceso de costa.....	84
3.4.1.2 Alimentación artificial de playas.....	84
3.4.1.3 Restauración de dunas.....	86
3.4.2 Métodos estructurales.....	87
3.4.2.1 Diques.....	89
3.4.2.2 Muros de contención.....	89
3.4.2.3 Malecones.....	89
3.4.2.4 Espigones.....	90
3.4.2.5 Rompeolas.....	91
3.5 ASPECTOS ECONÓMICOS.....	92
3.5.1 Beneficios de la protección del litoral.....	92
3.5.2 Costos de la protección del litoral.....	93
3.6 EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO.....	96
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO.....	97

CAPÍTULO 4

EL CAMBIO CLIMÁTICO	98
4.1 LA ATMÓSFERA	98
4.2 EFECTO INVERNADERO	99
4.3 TENDENCIAS Y PROYECCIONES	102
4.3.1 Temperatura superficial del mar	103
4.3.2 Oxígeno	104
4.3.3 Acidificación	104
4.3.4 Nivel medio del mar	104
4.3.5 Oleaje	105
4.4 IMPACTOS EN LA ZONA COSTERA DE CHILE	108
4.4.1 Playas	108
4.4.2 Humedales costeros	111
4.4.3 Puertos	112
4.4.4 Ciudades costeras	114
4.5 ADAPTACIÓN	115
4.5.1 Medidas orientadas a la comprensión del cambio climático	115
4.5.1.1 Mejora en los registros oceanográficos	115
4.5.1.2 Evaluación de la vulnerabilidad en zonas costeras	117
4.5.2 MEDIDAS ORIENTADAS A CONTROLAR LA EROSIÓN COSTERA	118
4.5.2.1 Protección de humedales y praderas de macroalgas	118
4.5.2.2 Generación de cuotas de extracción de arenas	120
4.5.3 MEDIDAS ORIENTADAS A MEJORAR LA OPERATIVIDAD PORTUARIA	120
4.5.3.1 Mejoras orientadas a la operación portuaria	121
4.5.3.2 Mejoras orientadas a la gestión de la infraestructura marítima	122
4.5.4 MEDIDAS ORIENTADAS A LA ADAPTACIÓN DE INFRAESTRUCTURA	124
4.5.5 MEDIDAS ORIENTADAS AL ORDENAMIENTO TERRITORIAL	127
4.5.5.1 Gestión integrada de zonas costeras	127
4.5.5.2 Política Nacional de Uso del Borde Costero	128
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO	129

CAPÍTULO 5

RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS EN LA ZONA COSTERA	132
5.1 EXPLOTACIÓN DE ÁRIDOS	132
5.2 EXPLOTACIÓN DE MINERALES	133
5.3 EXPLOTACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES	134
5.4 LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES	136
5.5 LAS ENERGÍAS MARINAS	137
5.5.1 La energía mareomotriz	137
5.5.2 La energía undimotriz	139
5.5.3 La energía eólica en la costa	141
5.6 LOS HIDRATOS DE METANO	141
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO	143

CAPÍTULO 6

EL ORDENAMIENTO JURÍDICO Y GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA.....	144
6.1 PRINCIPIOS GENERALES.....	144
6.2 NORMATIVA INTERNACIONAL EN RESGUARDO DEL MEDIO MARINO Y COSTERO	145
6.2.1 Las primeras normas destinadas a la protección del medio marino	146
6.2.2 La determinación de la responsabilidad por la contaminación marina.....	149
6.2.3 El reconocimiento de la protección de la biodiversidad marina.....	152
6.3 DEFINICIONES RELEVANTES PARA LA GESTIÓN DE LA COSTA	157
6.4 LA GESTIÓN DE LA COSTA.....	159
6.4.1 Particularidades del territorio costero.....	159
6.4.2 Estrategias de manejo y gestión de la zona costera	161
6.4.3 Actores relevantes en la gestión de la zona costera	162
6.4.3.1 Ministerio del Medio Ambiente	162
6.4.3.2 Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)	163
6.4.3.3 Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)	163
6.4.3.4 Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Directemar).....	163
6.4.3.5 Autoridad Marítima.....	164
6.4.3.6 Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Subpesca).....	165
6.4.3.7 Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (Sernapesca)	165
6.4.3.8 Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)	165
6.5 ASPECTOS DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL.....	165
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO.....	170

EPÍLOGO

PALABRAS FINALES	173
GLOSARIO.....	174

Se sugiere citar como:

Morales, E., P. Winckler y M. Herrera (2020). *Costas de Chile. Medio Natural, Cambio Climático, Ingeniería Oceánica, Gestión Costera*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Valparaíso: 182 pp.

INTRODUCCIÓN

En estas últimas décadas, el océano y su zona costera han sido objeto de numerosas acciones de orden político, jurídico, científico y tecnológico, las cuales han permitido comprender su naturaleza y mejorar la gestión de sus recursos. Estas acciones se produjeron ante una combinación del crecimiento demográfico, la expansión de la industria energética, la explotación de las pesquerías, el transporte marítimo y la intensificación de otros usos civiles y militares. En ocasiones, estas acciones antrópicas, o las mismas fuerzas de la naturaleza han provocado desastres ambientales, generando una creciente sensibilidad sobre el deterioro del océano e impulsado modelos orientados a su mejor conocimiento, ordenamiento y gestión.

La zona costera alberga medios de distinta naturaleza — como son la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera— que interactúan en forma muy dinámica y compleja. Estas interacciones devienen en cambios físicos, biológicos, geomorfológicos y químicos en diferentes escalas temporales y espaciales, que plantean un desafío en términos de su comprensión.

Desde el punto de vista de su gestión, por otra parte, la zona costera es un espacio estrecho y por lo mismo muy deseado debido, entre otros, a la existencia de recursos naturales, clima benigno, fertilidad en los suelos, diversidad de usos, concentración de asentamientos humanos e infraestructuras, además de su valor paisajístico.

Finalmente, desde el punto de vista de los aspectos jurídicos y administrativos, destaca el carácter público de la mayoría de las zonas costeras del mundo, como asimismo la convergencia de numerosos organismos que actúan en ella a escala nacional, regional y sectorial. De allí la diversidad en las fórmulas para su administración y gestión.

«Costas de Chile» constituye un esfuerzo conjunto de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, el Comité Oceanográfico Nacional y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, para dar a conocer fundadamente la importancia que la zona costera tiene en el desarrollo nacional. Mediante este texto buscamos poner a disposición de estudiantes, científicos y profesionales de distintos campos disciplinarios, un panorama de las cuestiones que surgen como consecuencia de la intensificación del uso de la zona costera.

El texto cubre materias tan disímiles como los procesos que definen la naturaleza de la zona costera, la infraestructura costera y portuaria, los impactos del cambio climático en algunos de sus sistemas, los recursos minerales y energéticos que se encuentran en el océano inmediato, y aspectos sobre el ordenamiento jurídico y la gestión de la zona costera. Esta lista de contenidos, naturalmente, no cubre todos los aspectos que caracterizan a la zona costera, y tiene un claro sesgo de parte de los autores, quienes venimos de los mundos de la ingeniería, la geografía, la biología marina y el derecho. Es, en suma, un libro de divulgación científica con contenidos introductorios a temas que pueden ser explorados por el lector en otros textos especializados.

Hemos procurado escribir un texto en lenguaje simple y con abundante material gráfico, con el ánimo de apuntar a un público amplio. El libro fue pensado en versión digital y gratuita, pues estamos convencidos de que este material tiene un valor público que no debe tener barreras de acceso.

Esperamos que el lector disfrute explorando estas líneas tanto como lo hemos hecho nosotros, junto al equipo editorial, al producirlo.

LA NATURALEZA DE LA ZONA COSTERA

Páginas 2 - 41

El territorio costero es un espacio sometido a incesantes interacciones por parte de la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. Para comprenderlo, se requiere examinar cuidadosamente la función, tanto individual como de conjunto, de cada uno de estos componentes a través de sus diversas manifestaciones.

Del mismo modo, se ha de considerar que la línea delimitadora entre el espacio marítimo y el terrestre es difusa; ya que dos veces al día sube y baja al compás de la marea. Estas fluctuaciones diarias son acompañadas por aquellas que ocurren a escala geológica y climática, cuyos períodos más largos las hacen imperceptibles al ojo humano; y otras de período corto, como el oleaje, que se generan por la interacción entre la atmósfera y el océano. La zona costera y la plataforma submarina adyacentes modifican y

determinan la mayor o menor intensidad de estos procesos. A movimientos como el oleaje, las corrientes y las mareas, se unen los ataques derivados de las aguas salinas y de los organismos marinos, cuyas acciones químicas y biológicas juegan un rol importante en la erosión de las costas.

El incremento del uso del territorio costero ha permitido acuñar el concepto de zona costera, definido como una franja del litoral, de anchura variable, resultante del contacto entre la naturaleza y las actividades humanas que se desarrollan en terreno bajo la influencia del mar. A pesar de ser limitado, este espacio permite usos que pueden ser exclusivos, excluyentes o compatibles, y que obligan a definir un empleo sustentable. El desarrollo de la industria inmobiliaria, los cultivos marinos, la energía, el turismo y el movimiento portuario, por mencionar algunas de las acti-

vidades más recurrentes, han promovido la ocurrencia creciente de controversias que se generan entre los diferentes usuarios.

Para que los distintos usos de la zona costera sean compatibles, se requiere que la Autoridad y los usuarios estén informados, tanto de la complejidad de los fenómenos que allí ocurren como de los potenciales efectos del cambio climático global en las costas. En efecto, los estudios científicos evidencian un aumento sostenido a nivel global del nivel del mar, que a largo plazo puede ser responsable de una erosión costera generalizada en sectores poblados.

A los efectos climáticos se deben agregar los movimientos tectónicos que, en cuestión de minutos, modifican las cotas de nivel y promueven la erosión, tal como ha ocurrido en Pichilemu, luego del terremoto de 2010 (Figura 1.1).

En suma, los fenómenos vinculados a los grandes sistemas de la estructura planetaria y su manifestación a escalas menores promueven la erosión y las inundaciones costeras a lo largo de toda la costa chilena, con independencia de su ubicación.

La zona costera marca entonces una difusa transición entre el mar y la tierra, que se produce sobre las plataformas sumergidas y los estuarios de todo el mundo. Los fenómenos costeros se inician allí con la mezcla, la separación y el transporte de los sedimentos, nutrientes y aguas continentales que escurren desde la tierra. Las olas, los vientos, las corrientes, el nivel del mar, el tipo de sedimento y la batimetría de la costa adyacente se encargan entonces de modular la configuración de la costa.



Figura 1.1

Figura 1.1:

Erosión costera en playa Punta de Lobos, Pichilemu, activada por la subsidencia ocurrida por el terremoto del 27 de febrero y su réplica del 11 de marzo de 2010.

(Foto: P. Winckler).



Figura 1.2 a



Figura 1.2 b



Figura 1.2 c

Figura 1.2:

Ciclo de vida del oleaje:

a) En su nacimiento el oleaje es altamente irregular, con una gran cantidad de frecuencias, direcciones y alturas. En la literatura, este tipo de oleaje se denomina *sea*.

b) Lejos de la zona de generación, el mar de fondo es bastante más ordenado. En la literatura, este tipo de oleaje se denomina *swell*.

c) En su arribo a la costa, el oleaje disipa energía en forma de turbulencia, moviendo arenas en costas arenosas y generando abrasión en costas rocosas.

En el litoral se localizan los puertos, las instalaciones que proveen energía y combustible; la infraestructura donde se realizan actividades económicas —como la acuicultura—; de recreación y también la habitabilidad humana. Asimismo, alberga la mayor parte de la vida animal y vegetal del mar, además de depósitos petrolíferos, de gas y minerales.

La rápida expansión del uso del mar por el hombre, el creciente tráfico sobre su superficie y el acceso a regiones cada vez más alejadas están relacionados, en su mayor parte, con fenómenos que tienen lugar en las aguas de poca profundidad. A su vez, acciones humanas como la descarga de desechos, la pesca, el dragado y las construcciones de estructuras costeras tienen impactos en la ribera oceánica.

Las aguas costeras cubren las plataformas continentales de todo el mundo, abarcando un área de 29 000 000 km², que corresponde a un 5.5% de la superficie del globo y a un 8% del área de los océanos. Las aguas someras están limitadas por líneas de costa que totalizan unos 400 000 km de longitud, con accidentes geográficos como las grandes bahías, los estuarios, los deltas, las lagunas litorales, los manglares, las dunas costeras y los arrecifes coralinos. En el límite oceánico de las plataformas continentales se produce un **talud continental** escarpado y profundo. Por convención, se considera que la profundidad que limita el borde externo de la plataforma es de 200 m, aunque en algunos lugares puede llegar a los 400 m, como en el Territorio Chileno Antártico. En el mundo, la profundidad media de las plataformas continentales es de unos 130 m y su ancho alcanza al promedio de unos 74 km.

En la actualidad, la delimitación de la zona costera, del suelo y subsuelo están sujetos a normativas legales, tanto nacionales como internacionales, cada vez más complejas y generadas por los países ribereños con la intención de salvaguardar y proteger los numerosos recursos allí presentes.

1.1 FACTORES HIDRODINÁMICOS

El modelado de los paisajes en las costas abiertas al océano Pacífico se debe en gran medida a los agentes mecánicos. Las olas hacen la mayor parte del trabajo geomorfológico, el cual se complementa con el efecto de la marea y el viento.

La función de las mareas es cambiar el nivel del agua en forma periódica, lo que permite que la energía de las olas actúe a diferentes cotas en cada sector. Las mareas generan también corrientes que erosionan, transportan y depositan los materiales no consolidados a lo largo de las costas.

Las olas son una forma de manifestación de la energía que se origina por el calentamiento diferencial de la atmósfera y del mar debido a la radiación solar. Ello produce vientos, que a su vez generan olas superficiales que se desplazan en la zona de generación, en la misma dirección en la cual estos soplan. Las olas transportan la energía eólica absorbida por el océano a grandes distancias, impactando finalmente a las costas, donde disipan su energía (Figura 1.2).

La mayor parte de la energía que llega a la costa está contenida en el oleaje generado por el viento, el cual asume dos modalidades comunes:

- Las marejadas (*sea*), que se caracterizan por olas sumamente irregulares y de crestas aguzadas, comprendiendo una vasta escala de longitudes y frecuencias (Figura 1.2a).
- El mar de fondo (*swell*), de apariencia más regular, semejante a una senoide y que, por lo general, se encuentra fuera del alcance de los sistemas eólicos locales (Figura 1.2b).

Cada ola tiene una **longitud** y un período, definido este último, como el tiempo en que dos crestas de olas sucesivas pasan por un punto. Por su parte, la **altura** de la ola depende de la velocidad, duración del viento y del *fetch*, el cual corresponde a la distan-

cia horizontal sobre la superficie del agua en la que actúa el viento que genera oleaje. Cuando el *fetch* es grande, las olas son largas y sus crestas están muy separadas entre sí; si el *fetch* es pequeño, las olas son cortas y de menor longitud. Por su parte, la duración del viento también influye de modo importante en el tamaño de las olas, pues cuanto más tiempo se mantenga el viento en una misma dirección, generará olas más altas y largas (Beyá et al., 2016).

A medida que las olas se aproximan a la costa se transforman drásticamente, debido a los siguientes procesos (Figura 1.3):

- Asomeramiento
- Refracción
- Reflexión
- Difracción
- Rotura

En efecto, al disminuir la profundidad y actuar el asomeramiento, las ondas se reducen en longitud y aumentan en altura y se propagan más lento.

Si las olas se aproximan a la costa en forma oblicua, se refractan cambiando su altura y experimentando una desviación progresiva que tiende a alinearlas con los veriles del fondo. Por este efecto, en las penínsulas se propicia una convergencia de la energía y una amplificación en la altura de la ola. Como consecuencia de ello, las penínsulas tienden a ser erosionadas más rápidamente que los sectores adyacentes, como las bahías o las costas rectas, transformando una línea de costa inicialmente irregular en una más suave. En contraste, en las bahías se genera una divergencia de la energía del oleaje y, por ende, una disminución de la altura. Las corrientes generadas por la refracción y otros procesos



Figura 1.3

transportan el sedimento erosionado de los promontorios a los sectores adyacentes, donde tienden a formar playas.

La difracción es el efecto por el cual la energía se distribuye producto de obstáculos naturales y antrópicos. Cuando el oleaje es interrumpido por dichos obstáculos, se desvía en forma gradual de acuerdo con los diferentes períodos existentes en el tren de olas. En presencia de estos obstáculos, el oleaje también experimenta reflexión, invirtiendo su sentido de propagación.

La rotura se produce cuando la profundidad es comparable con la altura del oleaje. La pendiente de la playa genera distintos tipos de rompientes (Figura 1.4). En playas de pendiente suave, se produce una rotura en «descrestamiento» (*spilling*), que se caracteriza por la abundancia de espuma en las crestas y varias líneas de rompientes que cubren una zona extensa (Figura 1.7). La primera línea de rompiente puede estar a varios centenares de metros costa afuera, y el agua entrante genera olas más bajas que vuelven a romper a profundidades menores. Por su parte, la rotura «en voluta» (*plunging*) se caracteriza por un vórtice de aire al romper, bastante violento y que pierde su energía rápidamente. Por lo general, este tipo de rotura arrastra más sedimentos que la anterior. Finalmente, la rotura «en colapso» (*collapsing*) se produce en zonas de pendiente muy pronunciada y se caracteriza por un arrastre de sedimento menor.



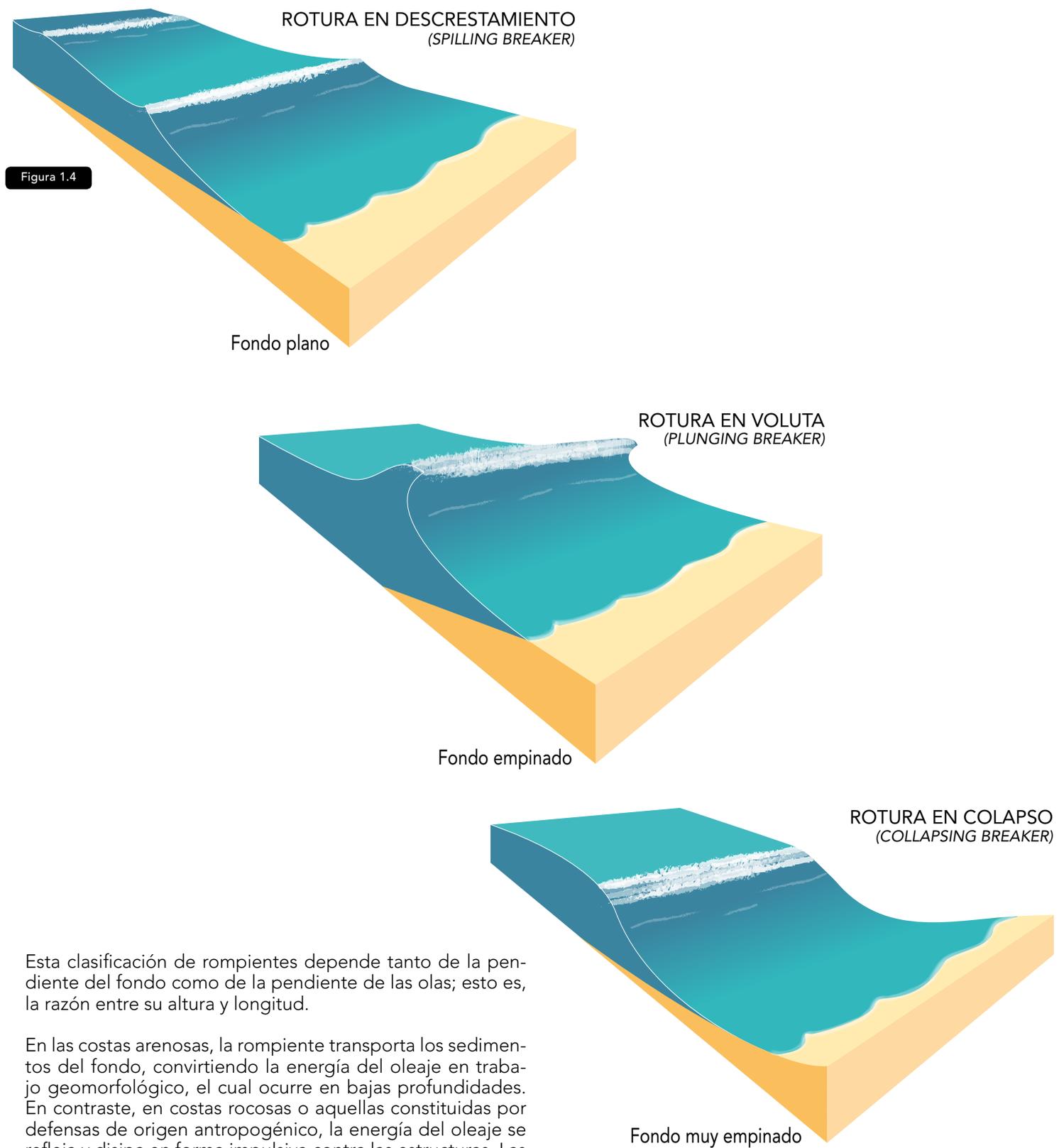
Figura 1.3:

Procesos costeros que experimenta el oleaje al aproximarse a la costa.

(Adaptado de Svendsen & Jonsson, 1976).

Figura 1.4:

Tipos de rompientes de oleaje.
(Adaptado de Komar, 1976).



Esta clasificación de rompientes depende tanto de la pendiente del fondo como de la pendiente de las olas; esto es, la razón entre su altura y longitud.

En las costas arenosas, la rompiente transporta los sedimentos del fondo, convirtiendo la energía del oleaje en trabajo geomorfológico, el cual ocurre en bajas profundidades. En contraste, en costas rocosas o aquellas constituidas por defensas de origen antropogénico, la energía del oleaje se refleja y disipa en forma impulsiva contra las estructuras. Las mayores presiones son ejercidas cuando la cresta comprime el aire contenido entre el frente de ola y una pared vertical o acantilado.

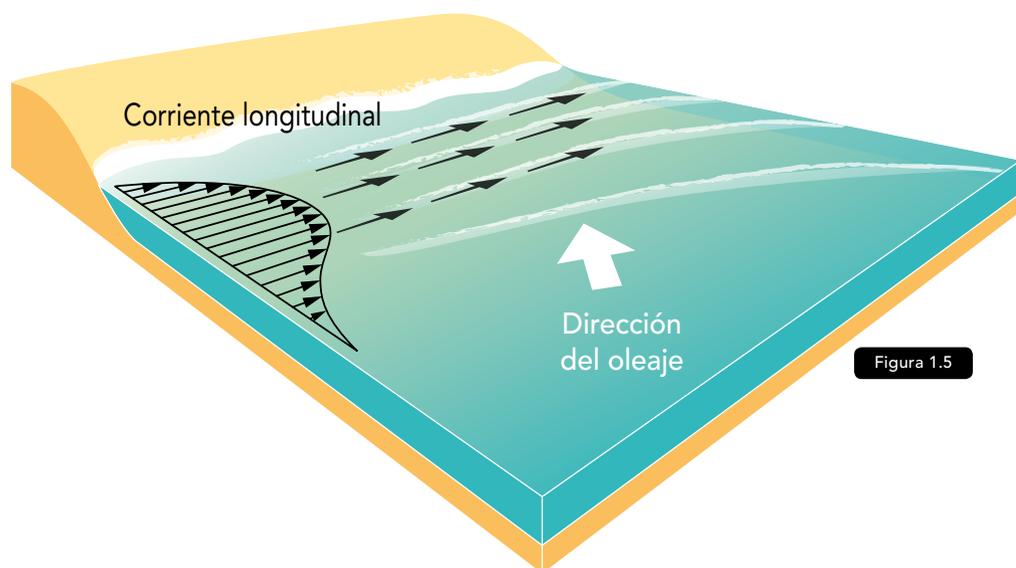


Figura 1.5

Este impacto es de corta duración, pero su persistencia durante el ataque de muchas olas puede desplazar bloques de roca y desgastar las partículas del lecho.

La zona de rompiente se caracteriza por fenómenos hidrodinámicos y morfológicos bastante complejos. Las corrientes generadas por el oleaje, denominadas **corrientes litorales** (*longshore currents*), se disipan rápidamente fuera de la línea de rompientes (Figura 1.5). Estas corrientes son generadas por las olas que rompen en un ángulo oblicuo en la costa y constituyen el mecanismo más eficiente de transporte de sedimentos en las playas.

Las corrientes de retorno (*rip currents*), por su parte, se producen cuando, debido a la incidencia casi normal del oleaje, se acumula un exceso de agua en las barras litorales, que busca entonces una brecha para fluir al mar (Figuras 1.6 y 1.7). Estas corrientes transportan sedimentos a mayores profundidades, pero con volúmenes menores que las corrientes litorales, debido a su relativo confinamiento y poca duración.

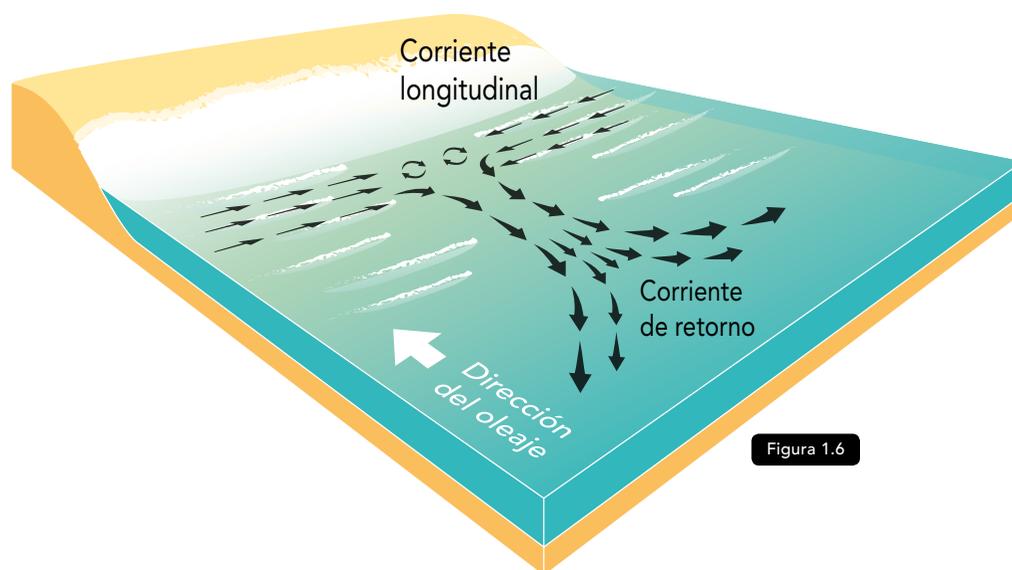


Figura 1.6

En algunos litorales se debe tener presente además, la ocurrencia de tempestades, huracanes, ciclones, tifones y tsunamis.

En el caso de los huracanes, ciclones y tifones, estos son esencialmente el mismo fenómeno meteorológico, cuya denominación varía según el lugar donde se producen.

Durante las tormentas, la baja presión atmosférica en combi-

nación con el viento soplando hacia la costa generan un aumento del nivel del agua, conocido como marea meteorológica. La magnitud de este fenómeno es determinada por la intensidad del viento, la velocidad de propagación de la tormenta y la batimetría del sector. Un ejemplo de este tipo de fenómeno ocurrió el 8 de agosto de 2015 en la zona central de Chile, con graves consecuencias a la infraestructura costera (Carvajal *et al.*, 2017).

Los huracanes son eventos extremos que afortunadamente no ocurren en Chile (Figura 1.8). Se generan en una región de convergencia intertropical del hemisferio norte entre agosto y septiembre y giran hacia la derecha o la izquierda según el hemisferio. El viento rotatorio alcanza velocidades del orden de 250 km/hora, en tanto que el centro de la baja presión puede elevar el nivel del mar en hasta 7 m.

Figura 1.5:

Corrientes litorales (*longshore currents*).

(Adaptado de The COMET Program).

Figura 1.6:

Corrientes de retorno (*rip currents*).

(Adaptado de The COMET Program).

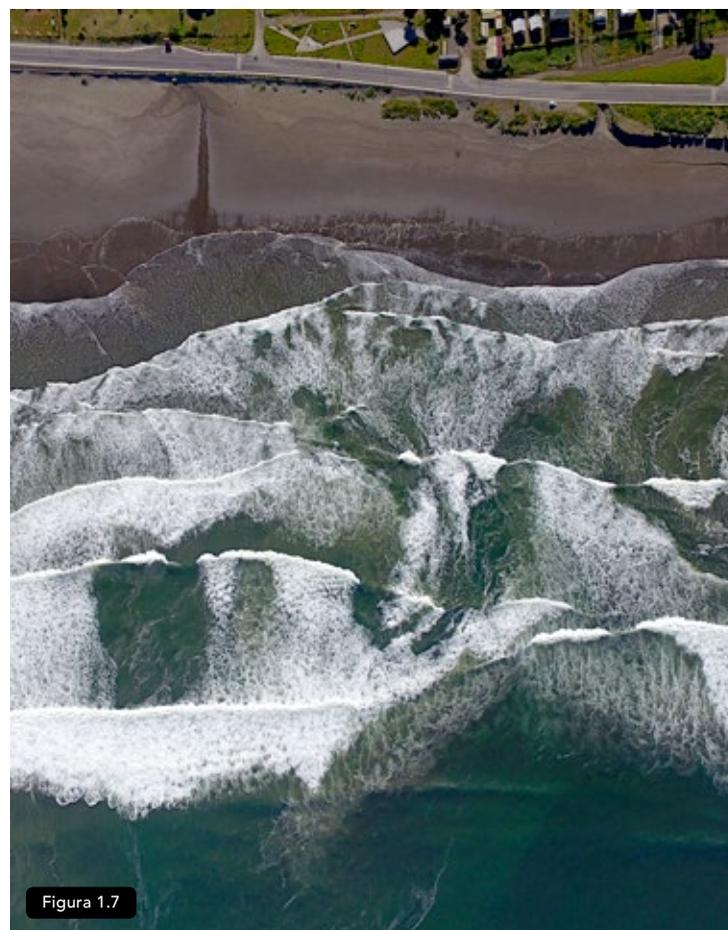


Figura 1.7:

Rotura en descrestamiento (*spilling*) en la playa de Mehúin, Región de Los Lagos.

(Foto: P. Winckler).

Figura 1.7

Si la marea meteorológica o el huracán coinciden además con una pleamar en lugares con estuarios y golfos relativamente cerrados, se produce un gran incremento del oleaje, inundando las ciudades y causando cambios permanentes de la línea costera. Un ejemplo de ello fue el huracán Sandy, que causó grandes daños en Nueva York, en 2012.

En la zona costera de Chile, los tornados ocurren en forma esporádica. Estos fenómenos meteorológicos son generados a partir de una tormenta convectiva severa; se caracterizan por tener movimiento circular y forma de embudo alargado, el cual desciende desde la base de una nube de desarrollo vertical. Por otra parte, las trombas marinas, que ocurren en el océano, requieren menos energía para su formación y son un tanto más comunes y de más fácil formación.

En el invierno de 2019 se presentaron estos fenómenos tanto en la ciudad de Los Ángeles como en Talcahuano (Región del Biobío) provocando inquietud en la ciudadanía. Estos eventos no son ajenos ni de data reciente. En el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile se registra su ocurrencia histórica en Carelmapu (Región de Los Lagos) en 1663; Valdivia (Región de Los Ríos) en 1881; Concepción (Región del Biobío) en 1934 y San Carlos (Región del Ñuble) en 2013.

1.2 MORFOLOGÍA COSTERA

La línea de la costa se modifica en forma constante como consecuencia del contacto entre el aire, la tierra y la acción incesante de los movimientos del mar. La morfología también es el resultado de procesos geológicos, como la elevación

Figura 1.8:

Trayectorias de los huracanes, para el período comprendido entre 1848 y 2013. Los colores cálidos representan vientos más fuertes. Chile se encuentra fuera de la ruta de estos fenómenos.

(Fuente: NOAA).

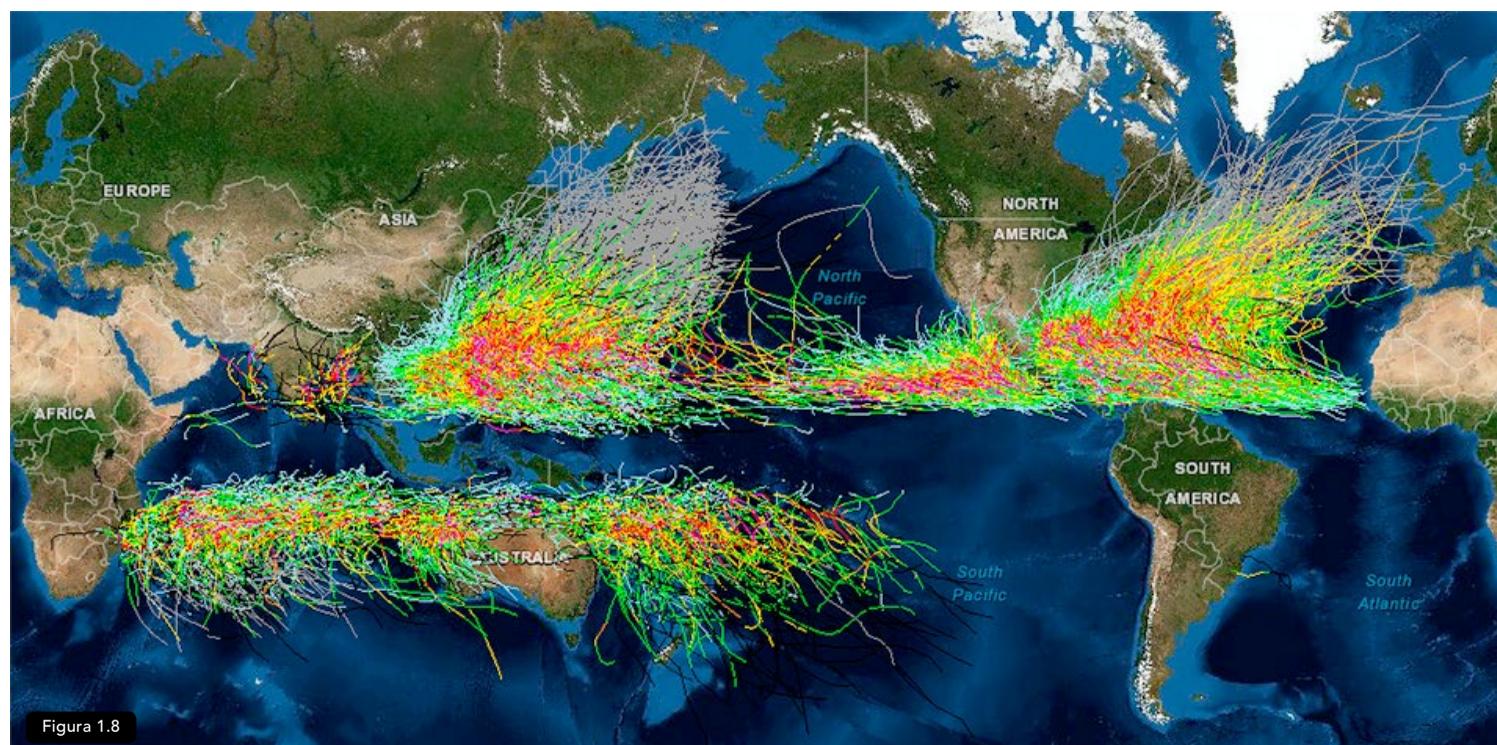


Figura 1.8

del nivel del mar producto de la fusión de los glaciares al final del Pleistoceno (Figura 2.21). Esta circunstancia permitió el ingreso de las aguas oceánicas a un paisaje que también había sido anteriormente afectado por las glaciaciones, la actividad volcánica y la tectónica. El litoral que hoy contemplamos, además, está siendo modificado por la acción antropogénica y por el impacto del cambio climático.

1.2.1 Costas rocosas

Los materiales que conforman la línea de la costa están constituidos por rocas duras (granito, **basalto** y dolerita), rocas metamórficas (gneis y esquisto) y rocas sedimentarias (cuarcita, pedernal, piedra caliza y creta). Concurren a su configuración, asimismo, rocas más blandas provenientes de formaciones sedimentarias, como las **areniscas** poco cementadas, el limo, el esquisto arcilloso y los sedimentos compuestos de arcilla. Los limos y arcillas son materia-

les blandos y de grano fino, que cuando están humedecidos se conocen como **lodo**. También están presentes la **arena** y la grava, que son acumulaciones sedimentarias sin cemento natural.

Las costas en que predominan rocas duras se caracterizan por una resistencia a la erosión mecánica del oleaje y al desgaste químico del agua de mar. Hay costas acantiladas sumamente estables en que la línea costera se encuentra a menos de 10 km de donde se encontraban hace 10 millones de años. No obstante, las rocas están sujetas a un proceso llamado intemperismo, el cual consiste en su disgregación por la acción química o física resultante de su exposición al aire y al agua. Por ejemplo, a pesar de ser una roca muy dura que subsiste casi sin alteraciones a escala humana, el granito se disgrega gradualmente en

un período largo de tiempo, en terrenos húmedos y ricos en materias orgánicas.

El intemperismo se produce en tres situaciones: en el proceso subaéreo normal de las superficies terrestres próximas a la costa; el intemperismo submarino debido al agua marina y el intemperismo intermareal de la zona de transición, creada por la acción de las olas, humedad alternante y la acción de la espuma. Una manifestación del intemperismo es el de una verdadera corrosión debido a la espuma salina, la que desarrolla cristales de sal que separa los granos rocosos, y abre alvéolos en las rocas.

El intemperismo submarino es mucho más lento que el subaéreo. Por su parte, las rocas de carbonatos, como el mármol, la piedra caliza, la creta y las formaciones de **coral**, son especialmente susceptibles al intemperismo biológico. A ello se agrega que ciertos organismos segregan ácido, acelerando la tasa de intemperismo del carbonato en varios órdenes de magnitud. Esos organismos crecen en la zona intermareal, que es la que sufre los mayores efectos del sol, la turbulencia y los nutrientes. Por ello, es erosionada con mayor rapidez por agentes mecánicos, químicos y biológicos, que en otros sectores de la costa rocosa.



Figura 1.9:

Costa rocosa en Montemar, Viña del Mar, Región de Valparaíso. Al fondo, se aprecian las dunas colgantes de Concón y el exacerbado desarrollo inmobiliario sobre el territorio costero.

(Foto: Gentileza de David Jara).

Figura 1.9

Figura 1.10:

Deslizamiento masivo de terreno que provocó el tsunami del fiordo Aysén el 21 de abril de 2007.

(Fuente: Sepúlveda & Serey, 2009).



Figura 1.10

Además de las costas de roca dura, hay acantilados en que el material consiste en piedra caliza y grava poco consolidada. Estos sectores de rocas blandas son algo más estables que las costas arenosas; pero están sujetos a la socavación del oleaje y a deslizamientos masivos de terreno desencadenados por terremotos. Un ejemplo de este tipo de deslizamientos causó el tsunami del fiordo Aysén, el 21 de abril de 2007 (Figura 1.10), y que terminó con la vida de 10 personas. La resistencia de un acantilado rocoso a la erosión por oleaje depende en gran parte de la estructura geológica y la dureza de las rocas.

Cuando estos acantilados se degradan, se reducen a un ángulo de moderada estabilidad y se protegen con vegetación cuyas raíces ligan el material blando. De este modo, los riscos degradados se mantienen estables por largos períodos, siempre que el mar no socave la base y se impida que hombres o animales destruyan la vegetación.

La estructura de las rocas puede ser masiva como en el granito, que muy lentamente sufre los efectos del intemperismo. En este caso, el oleaje corroe las rocas formando grandes bloques y capas; pero, las fracturas naturales del lecho rocoso son pocas y la tasa de erosión es insignificante a escala humana. Por su parte, el granito que haya sido fracturado por movimientos geológicos tiene muchos planos débiles, y las olas ejercen un efecto hidráulico, comprimiendo aire en los intersticios y rajando los bloques. Otras rocas duras, tales como el basalto, suelen

estar dispuestas en estructuras columnares duraderas, pero las uniones entre las columnas sufren los efectos de un lento intemperismo.

Las formaciones constituidas por rocas sedimentarias, en su origen, se formaron a partir de sedimento suelto y blando en las aguas de los mares, ríos y lagos. En el curso de las eras geológicas (Figura 2.21), esos sedimentos se han endurecido y litificado; es decir, petrificado. Estos sedimentos endurecidos pueden datar de un período superior a los 30 millones de años y, usualmente, son más duros cuanto más antiguos. Las rocas sedimentarias que han sufrido los efectos del movimiento que dio forma a las montañas, por lo general, experimentaron un calentamiento que los hizo recristalizar con el consiguien-

te endurecimiento, constituyendo hoy las llamadas rocas metamórficas.

En general, la estructura de las rocas sedimentarias es estratificada en capas. Depositadas originalmente sobre el lecho marino y levantadas por los movimientos tectónicos, estas rocas son erosionadas por el oleaje formando escalinatas. Las capas más blandas se disgregan primero, provocando el colapso y la ruptura de las capas más duras. En los movimientos geológicos que han acompañado la formación de las montañas, los estratos son a menudo plegados, combados y ladeados. Como resultado de ello, muchos acantilados exhiben bandas oblicuas y hasta verticales. También en este caso, las olas desintegran las capas blandas y luego las capas duras.

[mm]		Wentworth	Norma alemana DIN	[mm]	
63	Muy grueso	Gravas	Grueso	63	Grueso
32	Grueso		20	Medio	
16	Medio		6.3	Fino	
8	Fino		2		
4	Muy fino				
2		Arena	Grueso	2	Grueso
1	Muy grueso		0.63	Medio	
0.5	Grueso		0.2	Fino	
0.25	Medio		0.063		
0.125	Fino				
0.063	Muy fino	Limo	Grueso	0.063	Grueso
0.032	Muy grueso		0.02	Medio	
0.016	Grueso		0.0063	Fino	
0.008	Medio				
0.004	Fino				
0.002	Muy fino				
		Arcilla			

Figura 1.11

1.2.2 Costas de material no consolidado

Las costas constituidas por materiales no consolidados, como las playas, son las más expuestas a la erosión. De acuerdo con su granulometría, estos materiales se clasifican en gravas, arena, limo y arcilla, según la escala de Wentworth (Figura 1.11).

El material granular puede ser transportado por el oleaje, los ríos o aportado desde antiguos glaciares cuaternarios. Las arenas que se depositan en las playas también son transportadas por el viento (transporte eólico). Su composición mineralógica presenta una proporción de material marino a veces muy superior a la mineral, como es el caso de playas muy blancas y brillantes, de grano redondeado y origen coralino.

En las playas, el material dominante es el cuarzo, donde el diámetro de los granos oscila entre 0.2 a 2 mm. Los de mayor tamaño corresponden a cristales de cuarzo presentes en el granito. Normalmente, los granos inferiores a 0.2 mm son agudos debido al choque mecánico entre ellos. Además del cuarzo, las arenas contienen minerales como mica, granate, anfíboles, piroxenos y minerales pesados; los cuales en algunas regiones son explotados comercialmente (Figura 5.3).

En ocasiones, los cantos rodados en costas sometidas a un fuerte oleaje ocupan la parte más alta de la playa. Pero en general, se extienden en toda la zona batida por el mar, llegando en lugares a sustituir la arena en playas angostas y enmarcadas por paredes rocosas. Este tipo de formaciones se conoce como playa de gravas (Figura 1.12).

Figura 1.11:

Clasificación de sedimentos. Escala granulométrica según Wentworth y la norma alemana DIN 4022.

(Adaptado de geovirtual2.cl)



Figura 1.12

Figura 1.12:

Playa de gravas en Caicaén, Calbuco, Región de Los Lagos.

(Foto: Gentileza de José González Chacón).

Figura 1.13:

Tómbolo natural formado en playa Totoralillo, Región de Coquimbo.

(Del video «Totoralillo, invierno 2018», Andrómeda Records, disponible en Youtube).



Según sean las condiciones del oleaje, los cantos rodados y gravas dan origen a acumulaciones de variada configuración, constituyendo en oportunidades istmos que enlazan islas rocosas a la tierra firme. Si estas restingas, cordones litorales o flechas llegan a cubrirse por dunas de arena, reciben el nombre italiano de **tómbolo** (Figura 1.13). En el siglo XX, el ser humano utilizó diques exentos (Figura 1.16), que formaban tómbolos para combatir la erosión costera. Esta práctica está en retroceso debido al impacto ambiental asociado.

Las arenas normalmente provienen del continente a través de los ríos, de los fondos arenosos de la plataforma continental o de los farellones costeros. La permanencia de la arena en la playa depende de la mecánica del oleaje, y presenta marcadas diferencias entre invierno y verano (Figura 1.18). En efecto, al comenzar el otoño, las marejadas arrastran grandes volúmenes de arena, que se depositan en forma de barras a profundidades relativamente grandes. Al llegar la primavera, la playa vuelve a rellenarse con la arena de las barras, donde ha permanecido varios meses. Este ciclo anual, activado por el denominado transporte transversal, puede variar si las corrientes litorales aportan o quitan arena a la playa.

La arena cenagosa está constituida por **granitos** de cuarzo y otros minerales revestidos por una cubierta de **cieno**. Este material, compacto y homogéneo, se encuentra en zonas abrigadas en las que la turbulencia del oleaje no es suficientemente alta para mantener partículas sólidas en suspensión. Las orillas de los estuarios, que afloran durante la marea baja, están cons-

tituidas por una **matriz** sedimentológica de arenas finas y elementos coloidales adheridos, que se caracteriza por ser blanda, de superficie tersa y sin vegetación. En algunos lugares, la presencia de vegetación halófila (que crece en ambientes salinos) acaba por convertir la uniforme tersura del cieno en una estructura granulosa y porosa, a la que la lluvia se encarga de extraer el exceso de sal.

1.3 FORMACIONES GEOMORFOLÓGICAS TÍPICAS

La costa corresponde a una transición entre la tierra emergida y el mar. En Chile, se caracteriza por formaciones geomorfológicas entre las que destacan las playas, las dunas, los estuarios, los fiordos, los humedales, los deltas,

los acantilados y las plataformas de **abrasión**. En Chile, no se encuentran otros tipos de costa como las rías o manglares. Las formaciones coralinas, por su parte, son muy poco representativas en el Chile continental.

Los litorales presentan una amplia gama de formas que se han estructurado, tanto en función de la erosión marina como de las condiciones bioclimáticas existentes en cada uno de los paisajes geográficos del planeta. En consecuencia, la acción del mar sobre las formas iniciales ha moldeado los diferentes tipos de costa. Entre ellas, destacan las costas de **ablación**, que resultan de la acción destructiva del mar sobre los relieves costeros, y las de acumulación, consecuencia de la sedimentación marina o de la actividad de los seres vivos.

Las costas de material no consolidado constituyen, en general, zonas de acumulación y se localizan en zonas bajas o adosadas a otras rocosas, presentando una diversidad que responde a las condiciones que presenta el medio que la ha acogido. Están representadas por los estuarios, los humedales, los deltas, las playas y las dunas litorales.

1.3.1 Costas de acumulación

1.3.1.1 PLAYAS

Las playas son extensiones relativamente planas de arena o grava, ubicadas a orillas del océano, ríos o lagos, donde se transfiere la energía de las aguas a tierra firme. Su constitución granular hace que su forma sea susceptible de

modificación como respuesta a las condiciones del oleaje, las mareas, las corrientes y la disponibilidad sedimentaria. Una playa es una acumulación de materiales que va desde arenas muy finas a gravas o cantos rodados. Se suele considerar como playa a la parte que queda al descubierto entre la pleamar y la bajamar, pero su extensión es mayor. Generalmente, comprende la playa sumergida, la zona intermareal, la playa seca y la parte superior que se constituye por dunas o cordones litorales (Figura 1.14). La playa seca puede estar marcada por escarpes relacionados con los efectos de marejadas anteriores.

El material que da pie a estas formaciones es suministrado por los aportes fluviales (Figura 1.15), por los acantilados o por la disociación de

rocas previamente desagregadas. En su granulometría pueden coincidir arenas, gravas y guijarros. Si la producción de residuos acumulados procede en gran parte del continente, el mar ejerce, a su vez, una acción de modelado generando arenas brillantes, guijarros redondeados y, en ocasiones, ovoides. Una selección muy elaborada sitúa la fracción fina en la parte inferior de la playa y en la parte superior, al nivel de las pleamares, la fracción de mayor tamaño.

En costas bajas, los materiales aportados por el oleaje tienden a colmatarse, haciendo desaparecer las irregularidades e iniciando el desarrollo de playas largas y rectilíneas. Cuando estas entrantes son de mayor dimensión, se desarrollan playas de acumulación y «flechas litorales», que se edifican con los aportes de la deriva litoral procedentes de la playa o de los ríos colindantes. Cuando estos materiales se depositan, forman «barras de antecosta», las cuales, en el tiempo, emergen tomando una forma de flecha en el mismo sentido que la playa de la cual proceden estos sedimentos. Al generarse posteriores episodios de deriva, se van generando nuevas flechas, conformando sectores litorales de flechas compuestas. Otro tipo de acumulación litoral son los denominados cordones litorales libres, o «lidos», los cuales son cadenas alargadas de varias decenas de kilómetros. Estos presentan dibujos arqueados como resultado del retroceso frontal más rápido que en los sectores extremos y, generalmente, son interrumpidos por pasos que permiten la circulación de corrientes de marea y el vertido de las aguas continentales.

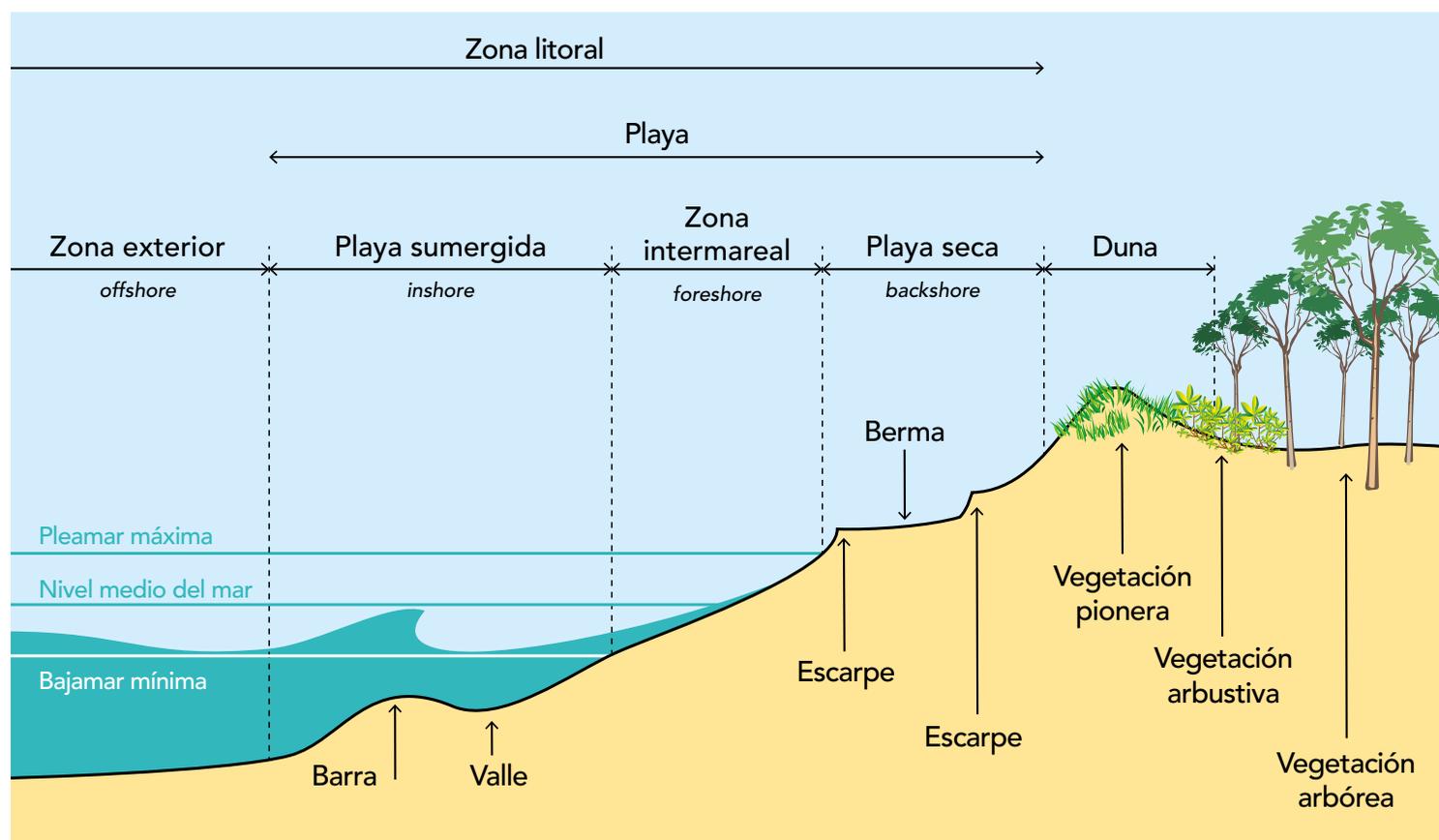


Figura 1.14:

Definición de partes de un perfil de playa.

(Elaboración propia).

Figura 1.14



Figura 1.15:

Estuario y desembocadura del río Chaihuín y la flecha formada por la combinación de sedimentos abundantes y el oleaje, tomada desde un dron.

(Foto: P. Winckler).

Figura 1.15

Existen otras formaciones arenosas que se modelan por la presencia de estructuras de origen antropogénico, cuyo objetivo es retener arena, generar un encauzamiento de la desembocadura de un río o albergar un puerto. Cuando una playa está asociada a un relieve litoral rocoso, suele ubicarse al fondo de una ensenada, donde desarrolla un arco armonioso entre los acantilados que les sirven de apoyo. También existen playas en forma de medialuna esculpidas en cordones litorales y playas que consisten en series de hundimientos regulares, abiertos hacia el mar y separados por crestas de bordes afilados, denominados *beach cusps*.

A veces las playas no están plenamente ligadas a tierra firme, y forman lagunas en su parte posterior. Las dunas coronan frecuentemente la cresta del cordón y forman, tras este, verdaderos campos de vegetación (Figura 1.15). Los litorales de costa rocosa pueden ofrecer las más variadas formas de acumulación; pero la mayor variedad se da cuando los materiales de

soporte son blandos y abundantes. Ello ocurre en zonas con aporte fluvial, en llanuras y colinas glaciales, en áreas con rocas volcánicas poco consolidadas o en sectores con material coralino.

- Mecanismos de transporte de sedimentos

El complejo movimiento de sedimentos en la zona de rotura del oleaje se entiende como la combinación de un transporte transversal a la costa (*cross-shore transport*),

controlado por el oleaje, y un transporte longitudinal (*longshore transport*), debido a las corrientes inducidas por el oleaje, también conocido como deriva litoral.

En las costas expuestas al océano, el aporte de sedimentos es principalmente resultado de la deriva litoral generada por el oleaje que rompe en forma oblicua respecto de la costa y, en forma secundaria, por las corrientes mareales, de menor magnitud. Las condiciones que promueven la deposición de sedimentos se

hallan influenciadas por la presencia de obstáculos, como bajíos o escollos, que reducen la capacidad de transporte. Naturalmente, la **batimetría** condiciona los procesos costeros que experimenta el oleaje (refracción, asomeramiento, difracción, reflexión y rotura) y modifica su dirección, altura y potencial de transporte sedimentario.

La dinámica de evolución se halla profundamente marcada en las playas, a diferencia de lo que sucede en los acantilados,

donde los procesos erosivos ocurren a escalas de tiempo mayores. En estos últimos, el oleaje, las mareas y otros procesos hidrodinámicos de mayor complejidad originan el desgaste de la roca y la generación de arenas y guijarros.

- La influencia del oleaje

En los tramos de costa más abiertos al mar, las playas tienden a orientarse ortogonalmente a la dirección del oleaje, debido a que esta con-

dición origina la mínima deriva y permite la **sedimentación** de materiales más estables. Cuando el oleaje es de baja energía y el viento es fuerte, entonces este último también juega un rol en la geometría de la playa.

El ángulo de incidencia del oleaje tiene gran importancia en el sistema de circulación costera. Cuando hay una dirección de oleaje dominante, se produce un transporte neto de sedimentos a lo largo de la costa, producto de la deriva litoral. Este proceso es fundamental en la formación de flechas litorales e islas barrera. La dirección del oleaje puede variar según la ubicación de las perturbaciones atmosféricas que lo generan, originando ocasionalmente componentes opuestas de deriva litoral en la misma playa a lo largo del año. Si la playa está en **equilibrio dinámico**, las diferentes componentes del transporte litoral se compensan. Por el contrario, si predomina una dirección de oleaje, se produce un transporte neto en un sentido.

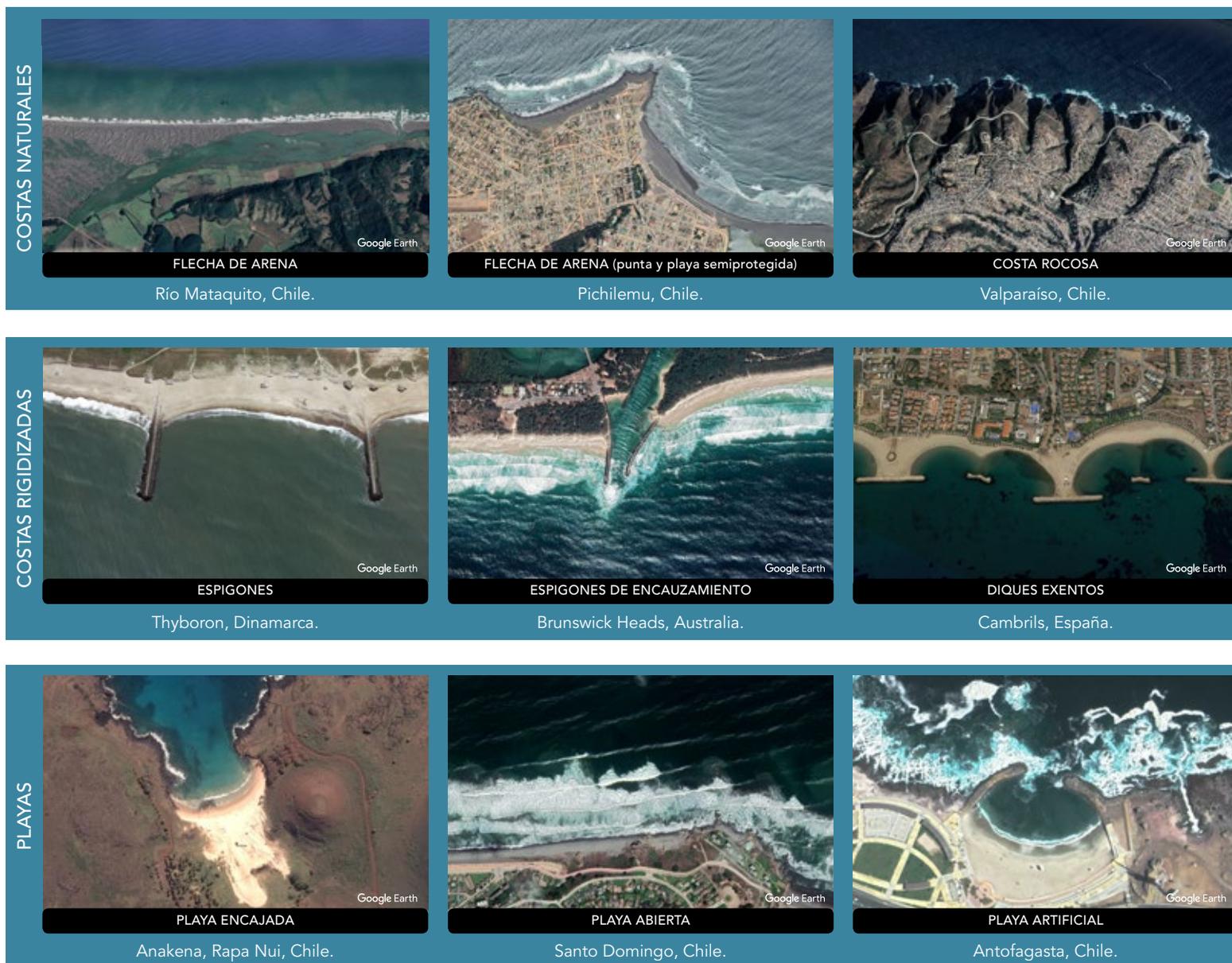


Figura 1.16

Figura 1.16:

Diferentes formaciones arenosas de las costas. En las fotografías, se presentan ejemplos de costas naturales y costas rigidizadas; estas últimas, son aquellas modificadas artificialmente con la construcción de espigones, diques exentos, muros de contención, etc.

Asimismo, se muestran tres tipos de formaciones de playas.

(Elaboración propia. Imágenes de Google Earth).



Figura 1.17

Figura 1.17:

Playa Reñaca, previo al inicio de los temporales invernales. Al fondo la Estación de Biología Marina de Montemar, donde se creó la Escuela de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso.

(Foto: P. Winckler).

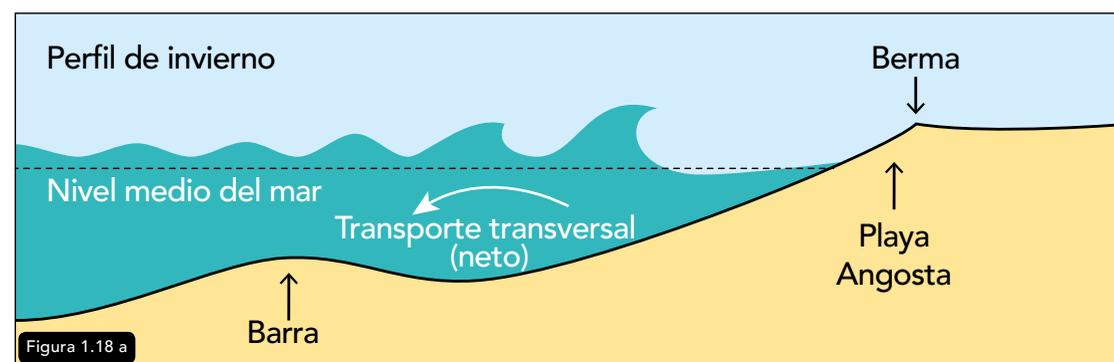


Figura 1.18 a

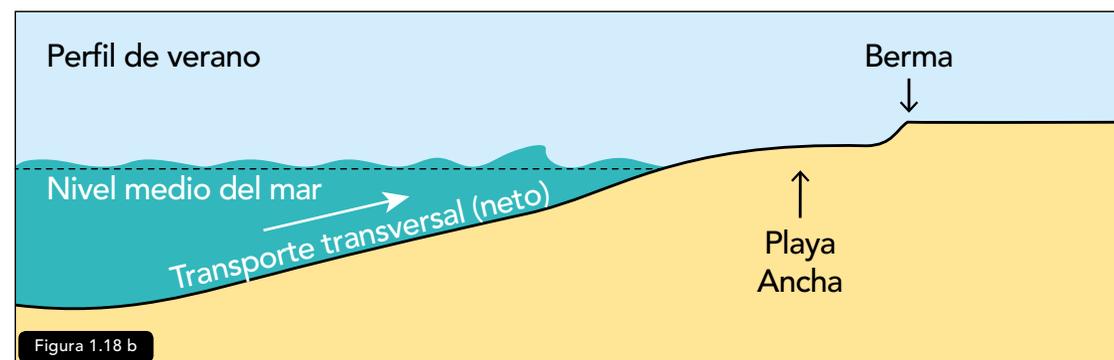


Figura 1.18 b

Figura 1.18:

Perfiles de playa.

(Elaboración propia).

Durante el año, el clima de oleaje se modifica producto de las estaciones, donde es más intenso en invierno que en verano. Ello trae repercusiones en la forma de las playas (Figura 1.18). Por lo general, durante el verano se produce un transporte neto de arenas hacia la parte alta de la playa, formando lo que se conoce como un «perfil de verano», con un ancho de playa relativamente grande. Cuando se producen marejadas en invierno, en combinación con la marea meteorológica, el oleaje pone en movimiento una fracción importante de los materiales de una playa, originando la formación de barras a profundidades mayores. Estas barras, características de un «perfil de invierno», reducen la profundidad y promueven la rotura de las olas grandes durante las marejadas. El hecho de que la playa modifique su forma ante cambios en las condiciones hidrodinámicas, la convierte en un sistema adaptativo y natural muy eficiente para disipar la energía del oleaje.

Las playas con suministro adecuado de arena presentan bermas bien formadas (Figura 1.17); mientras que las deficitarias carecen prácticamente de ellas. La berma suele destruirse total o parcialmente durante los temporales y, en general, presenta un perfil erosivo en invierno. La estructura interna de la berma consiste en laminación paralela horizontal o inclinada hacia el mar. En detalle, las láminas pueden mostrar micro secuencias de grano, cada una de las cuales registra un episodio de inundación. La berma crece por un proceso de gradación vertical y alcanza una cota más elevada que el resto de la playa. El agua puede cubrir la berma en pleamar o cuando hay marea meteorológica; pero, según va creciendo, es cada

vez más difícil que permanezca sumergida. No obstante, la tendencia a la acreción se revierte durante las marejadas.

En la superficie de la berma, se aprecian los restos de antiguas bermas generadas después de que las barras se soldaron a ellas. En conjunto, forman las crestas de playa, separadas por suaves **depressiones**. En períodos de buen tiempo, la berma está sujeta a una importante **deflexión** eólica por las brisas y vientos diurnos. El resultado es un activo transporte de arena que se acumula en las dunas costeras o es arrastrado hasta el mar, dejando tras de sí la acumulación de **cantos** y restos. Un factor limitante es el encostramiento superficial debido a las sales que deja el agua al evaporarse, el cual protege la superficie y permite la acumulación de arena en ripples eólicos.

- La influencia de la marea

La posición de la rompiente varía con el nivel de la marea astronómica, que oscila con una periodicidad de 12.42 horas, el tiempo entre dos pleamares sucesivas en las costas chilenas. Durante la **pleamar**, la línea de costa se desplaza hacia tierra y durante la **bajamar** lo hace hacia el mar (Figura 1.19). Ello permite al oleaje actuar sobre una zona más amplia, modificando continuamente la configuración de la playa.

Otro factor es la acción de los temporales locales que apilan agua sobre la costa producto de la marea meteorológica (Figura 2.14). Estos permiten al oleaje atacar zonas altas de la playa y, de esta manera, re-

mover sedimento mar adentro. Las mareas pueden dar lugar a un amplio abanico de corrientes oblicuas o incluso paralelas a la costa, que son usualmente menores en magnitud a las corrientes generadas por el oleaje y se caracterizan por tener mayor regularidad en el tiempo. Las corrientes mareales son relevantes en los procesos de mezcla de agua, pero, salvo excepciones, no en aquellos relacionados con el transporte de sedimentos.

- Estados morfodinámicos de las playas

La caracterización modal de los perfiles de verano e invierno, descrita anteriormente, se complementa con una descripción más detallada mediante los estados morfodinámicos que relacionan la forma de una playa —tanto en perfil como en planta— con la hidrodinámica local. De acuerdo con Wright y Short (1984), en función de parámetros del oleaje y de las características del sedimento, las playas se clasifican en: disipativas; de barra longitudinal y seno; de barra y playa rítmicas; de barra transversal y corriente de retorno; de barra-canaleta o **terrazza** de bajamar y reflejante. Conforme se modifican el oleaje y la marea en diferentes escalas de tiempo, también lo hace el estado morfodinámico de la playa.



Campo dunar al norte de la desembocadura del río Huasco, Región de Atacama.

(Foto: P. Winckler).

Figura 1.19:

Influencia de la marea astronómica en la rompiente del oleaje.

(Fotos: Michael Marten, 2013, www.michaelmarten.com).

1.3.1.2 DUNAS

Las dunas se conforman por depósitos superficiales sueltos y no consolidados de sedimento fino. Se generan cuando, debido a la presencia de obstáculos topográficos, rocas o arbustos, disminuye la capacidad de transporte eólico, promoviendo la acumulación de las partículas en sectores calmos. A medida que el proceso persiste, el depósito inicial se incrementa en volumen y se transforma en una duna.

Este proceso es promovido cuando las condiciones litorales crean un medio árido a causa del viento y las salpicaduras de aguas salada, reducen la vegetación continental. Basta con que en las inmediaciones de la costa exista abundante material fluvial, arena cristalina o caliza proveniente de morrenas desarrolladas durante la recesión del nivel del mar en el Cuaternario. Cuando el rango de mareas es débil, las dunas también pueden construirse a partir de la arena que la deriva litoral suministra a las playas.

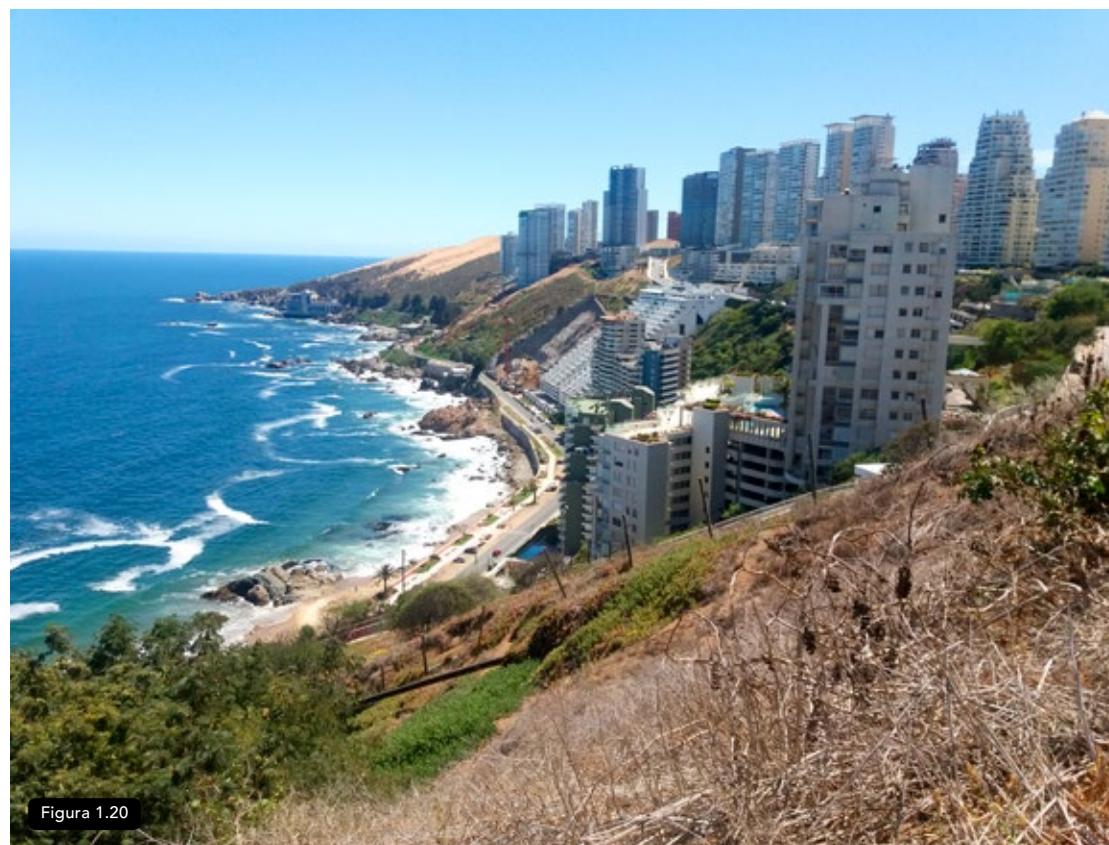


Figura 1.20:

Dunas fósiles de Reñaca (noviembre de 2019), donde se aprecia en la actualidad, la construcción de decenas de edificios.

(Foto: P. Winckler)



Figura 1.21:

Dunas fósiles de Reñaca en la década de los cincuenta.

(Autor desconocido).

Las condiciones de edificación de las dunas litorales se diferencian de aquellas ubicadas al interior del continente; pues en la costa, el viento suele ser menos estable, la arena más húmeda y su movilización más difícil.

En general, las dunas adoptan modelos relativamente estables cuyo tamaño y forma dependen de la dirección y velocidad del viento, la disponibilidad de arena y la cantidad de vegetación. Las dunas

costeras suelen ser frágiles debido al viento que abre brechas, desarraigando la vegetación en un proceso progresivo.

Una clasificación de las dunas se presenta a continuación (Figura 1.22):

a) Las dunas semilunares (barjanes) tienen crestas que se mueven continuamente apuntando a sotavento. Este tipo de dunas se forma cuando el suministro

de arena es limitado. Se desplazan en forma lenta, con migraciones anuales de hasta 15 metros. Su forma de media luna es casi simétrica si el viento se mantiene relativamente constante; pero, cuando eso no ocurre, una de las puntas se hace mayor que la otra.

b) Las dunas longitudinales (*seifs*) se caracterizan por la forma alargada en la dirección de sotavento. Al parecer este tipo de dunas procede de semilunares que se han anclado parcialmente.

c) Las dunas transversales se forman en regiones donde los vientos predominantes son uniformes, la vegetación es dispersa y hay abundante arena. Estas dunas conforman una serie de crestas separadas por depresiones y orientadas en ángulo recto con respecto al viento predominante.

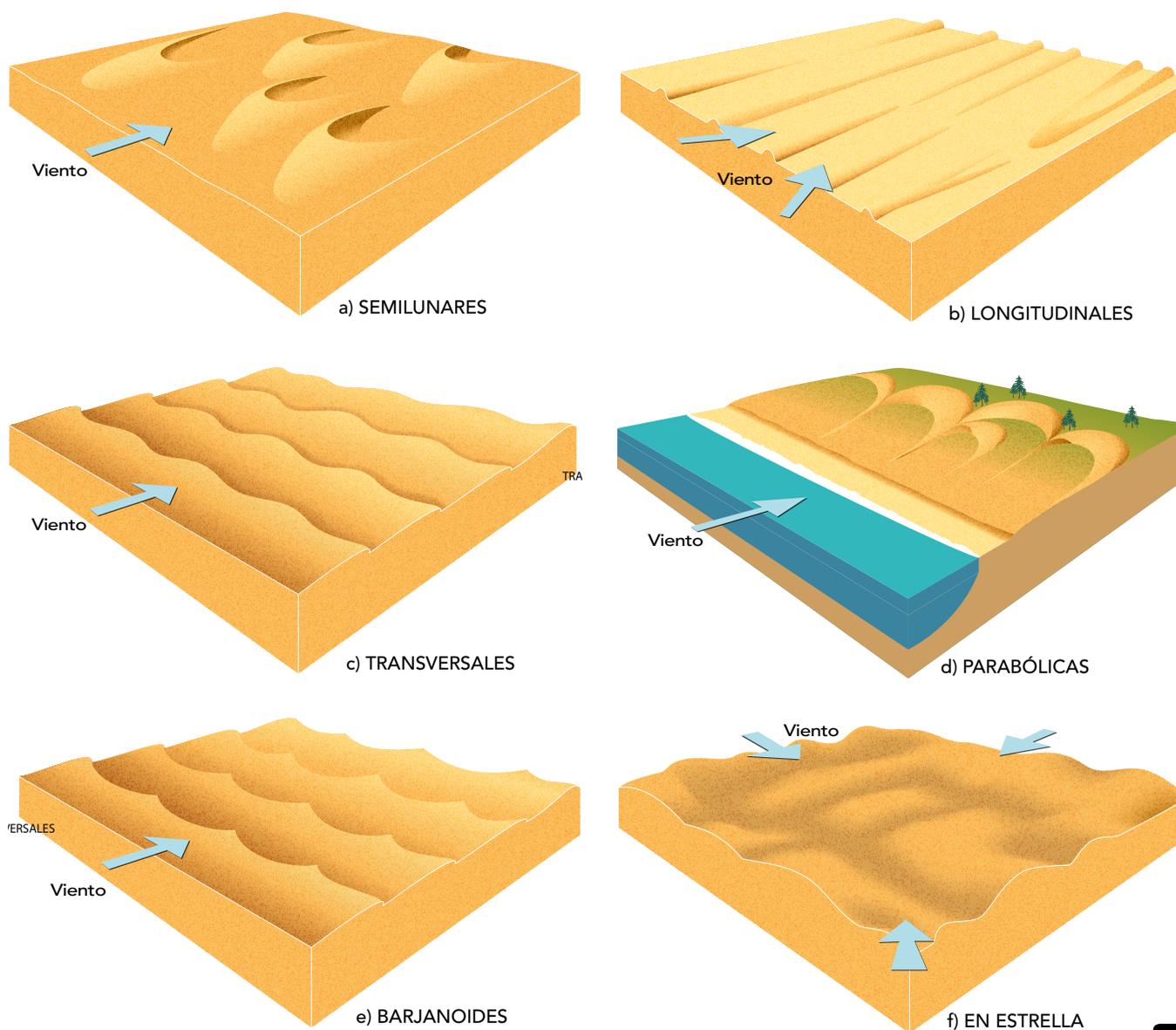


Figura 1.22

Figura 1.22:

Tipos de dunas.

(Adaptado de Tarbuck & Lutgens, 1999).

- d) Las dunas parabólicas se establecen donde la vegetación cubre parcialmente el terreno, los vientos soplan al interior y el suministro de arena es abundante. Su forma se asemeja a la de los barjanes, excepto por sus extremos que apuntan en dirección contraria al viento. Por su parte, si la cubierta vegetal se interrumpe en algún punto, la deflación crea una depresión. De esta forma, la arena es transportada fuera de la depresión y depositada como un reborde curvo que se hace más alto a medida que la depresión aumenta.
- e) Las dunas barjanoides son formas intermedias entre las semilunares (barjanes) aisladas y extensiones de dunas transversales.
- f) Las dunas en estrella, tienen forma de pirámides. Se forman en lugares con regímenes de viento fuertes y multidireccionales.

Finalmente, cuando aumenta la distancia entre la duna y la costa, disminuye la velocidad del viento y la disponibilidad de arenas, promoviendo la vegetación y fijando las dunas.

1.3.1.3 ESTUARIOS

Los estuarios corresponden al tramo terminal de los sistemas fluviales y son propios de costas con mareas. De hecho, su nombre, de la raíz latina *aestus*, significa marea. Desde el punto de vista morfológico, un estuario asocia procesos continenta-

les y fluviales con fenómenos hidrodinámicos, como la penetración de las mareas y el encuentro del agua de mar con aguas fluviales. De todo ello resulta un medio caracterizado por una extraordinaria biodiversidad. La mezcla del agua salada del mar con el agua dulce de la cuenca, afecta la sedimentación y la ecología, generando contrastes entre la parte alta del río y la boca del estuario (Figura 1.23). Invadidos por el mar, los estuarios se diferencian de los deltas, en que, a la inversa, son el río y sus sedimentos los que penetran en el mar. Difieren asimismo de los fiordos, que son valles sumergidos cuya topografía está marcada por el movimiento de los glaciares.

res, pero siempre subordinadas al progresivo ensanchamiento. En esta configuración, la penetración de la marea puede ser muy profunda, amplificándose en ocasiones tierra adentro. En casos donde los estuarios están encajonados río abajo por una angostura, franja de rocas más resistentes o *horsts*, el río desemboca en una rada abrigada. La penetración de la marea se ve, por consiguiente, obstaculizada y la subida de las aguas mitigada en la rada. Finalmente, existen estuarios cerrados por una flecha de arena que emerge entre cabos y que crea una rada en la que desembocan las aguas continentales (Figura 1.15).

Los estuarios tienen forma de embudo, es decir, se van abriendo paulatinamente hacia la desembocadura. Pueden presentar sinuosidades meno-

Figura 1.23:

Estuario en la zona del archipiélago de Chiloé, Región de Los Lagos; al fondo el volcán Calbuco.

(Foto: H. Horta/ Armada).



Figura 1.23



Figura 1.24:

Humedal en Cartagena, Región de Valparaíso.

(Foto: Gentileza de Manuel Contreras-López).

1.3.1.4 HUMEDALES

Los humedales costeros, usualmente separados del océano por playas o cordones de arena (Figura 1.24), juegan un rol fundamental en los ciclos reproductivos de algunos animales, en el crecimiento de las plantas y la subsistencia de comunidades en sus riberas (Jaramillo et al., 2015). Estos sistemas son parte de un delicado equilibrio, en el cual el hombre y el cambio climático tienen un gran impacto, como se profundiza en la sección 4.4.2.

1.3.1.5 DELTAS

Un delta es un depósito de sedimentos aproximadamente triangular formado en la desembocadura de un río que vierte sus aguas a un lago o al mar. El depósito de sedimentos se debe a aluviones que acumulan material en el sector donde el río encuen-

tra al mar. Los sedimentos depositados avanzan sobre la plataforma sumergida en una extensión considerable. Normalmente, se desarrollan en zonas calmas donde las corrientes litorales tienen poca capacidad de transportar los sedimentos a lo largo de la costa. Su proceso de construcción es complejo y trae como consecuencia la formación de canales, albuferas, marismas y redes de pequeños riachuelos.

En un delta se distinguen tres partes: el prodelta que se forma en la parte que da al mar; el frente deltaico, formado por capas inclinadas que avanzan debido a la acumulación sobre las capas del prodelta, y la llanura deltaica, constituida por capas depositadas encima de la plataforma deltaica. Estas formaciones consideran áreas de acumulación emergidas y sumergidas. Así, por ejemplo, el delta del Níger cubre 17 600 km² de superficie emergida, a la que se añaden una orla cos-

tera y barras a lo largo de 1600 km². Su parte exterior cuenta con 4500 km² de materiales, englobando en conjunto un total de 34 000 km². El delta del Misisipi, por su parte, se extiende sobre 34 000 km² emergidos y el del Yangtsé, en China, es aún mayor.

La distribución geográfica de un delta ofrece indicios sobre la modalidad de su formación. Los ríos Nilo, Po, Tíber y Ródano en las orillas del Mediterráneo, el Danubio en el mar Negro, el Volga en el Caspio y el Amur-Daria en el mar de Aral, demuestran la eficacia de los regímenes hidrológicos en regiones semiáridas con rangos de marea pequeños. En regiones subtropicales e intertropicales, con regímenes pluviométricos que facilitan el trabajo geomorfológico, se encuentran grandes deltas como los de los ríos Níger, Indo, Ganges, Mekong, Yangtsé y Amarillo. Otra región con deltas originados por acciones morfogenéticas continentales se localiza en la zona fría del hemisferio norte, donde destacan el Lena en Siberia, además de varios deltas en Alaska y la Columbia Británica.

Aunque favorable, la ausencia de mareas no basta para formar deltas. En los grandes ríos, por ejemplo, dominan factores como la pendiente de la plataforma continental. De hecho, el delta no se forma cuando la pendiente del fondo marino es muy fuerte, como en el río Amazonas, o cuando se presentan cañones submarinos, como en el río Congo. En cambio, la formación del delta se promueve cuando la pendiente es suave, especialmente si se ve afectada por la subsidencia, generada por la propia acumulación de material. En consecuencia, los deltas son resultado de un equilibrio geomorfológico, caracterizado por factores como el transporte fluvial, la subsidencia, las mareas y los aluviones fluviales, que dependen a su vez del clima y del eustatismo.

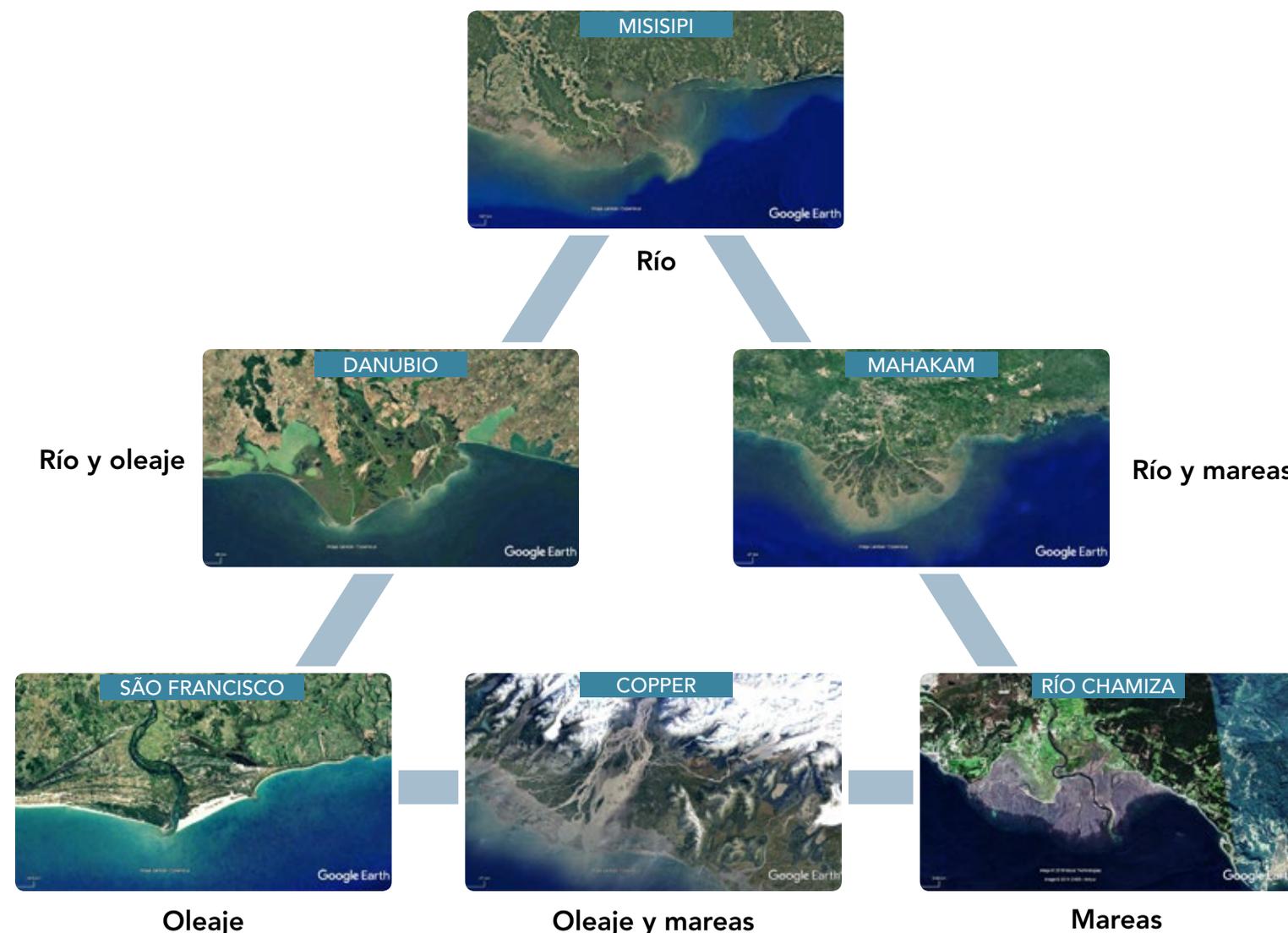


Figura 1.25:

Clasificación de los deltas en función del proceso sedimentario dominante.

(Elaboración propia).

Figura 1.25

La sedimentación se debe a la pérdida de capacidad de transporte de los aluviones fluviales al encontrarse con el mar. La acumulación en el fondo del canal origina a su vez un obstáculo, de manera que el fenómeno se retroalimenta. Esta barra crece río arriba debido a la disminución de la pendiente del canal, y hacia la desembocadura, donde el curso de agua se enfrenta a fuerzas antagónicas del oleaje y la superficie del mar.

Mientras la provisión y la redistribución de sedimentos estén garantizadas, las formas se mantienen embrionarias y sumergidas. Ello genera un cono de suave pendiente en el eje del canal que, en un estadio ulterior, deriva en la aparición de divisiones y bancos móviles que afloran durante el estiaje. Si la emersión es permanente, puede nacer una vegetación que fija el terraplén y constituye islas a ambos lados de los canales.

La sedimentación en los deltas tiene una evolución característica. Al ser más rápida la corriente en el eje que en las orillas del canal central, durante las crecidas se conforman levantamientos naturales en ambas riberas. Estos levantamientos sufren eventualmente tajos que permiten la creación de nuevos canales y el abandono de otros. El oleaje, por su parte, tiene la función de redistribuir las arenas en el frente exterior del delta, ge-

nerando flechas y crestas pre-litorales. Cuando varias crestas se forman con rapidez, delimitan cubetas externas debido a la interferencia de los levantamientos fluviales y litorales.

Existen numerosas clasificaciones de los deltas. La más conocida es fundamentalmente descriptiva, en función de la influencia relativa del oleaje, la marea y el río (Figura 1.25).



Figura 1.26

Figura 1:26:

Acantilados típicos del sur de Chile, producidos por la acción erosiva del oleaje. Las superficies planas y rocosas al pie de los acantilados son testimonio de su retroceso.

(Foto: H. Horta/Armada).

1.3.2 Costas de ablación

Las costas de ablación enfrentan océanos con un oleaje de alta energía que, en el transcurso de los siglos, genera litorales rocosos como los que se encuentran en gran parte de Chile. En este tipo de costas se encuentran los acantilados y las plataformas de erosión litoral.

1.3.2.1 ACANTILADOS

Los acantilados son formas litorales que se originan por la acción erosiva del oleaje sobre la base del terreno costero. A medida que la erosión progresa, las rocas se desmoronan y el acantilado retrocede, dejando una superficie rela-

tivamente plana y horizontal que se conoce como **plataforma de abrasión**. El término acantilado se usa muchas veces para designar el conjunto de elementos surgidos de la propia forma continental y el tramo vertical que sufre de la acción marina. La litología y el **buzamiento** son responsables de la diversidad de formas de los acantilados. En su base expuesta, con la ayuda de los guijarros, el oleaje forma grutas y bancales, además de desplomes continuos o localizados que endurecen la pendiente y hacen retroceder al frente rocoso. Las condiciones favorables para este trabajo mecánico proceden de la heterogeneidad del terreno, de las líneas de debilidad y de las diferencias litológicas. La Figura 1.26 muestra acantilados típicos del sur de Chile.

La existencia de plataformas escalonadas y heterogéneas se debe a procesos como la abrasión mecánica, la descomposición, la desagregación, la acumulación y la dispersión de los residuos por las corrientes. En cualquier caso, cuando se trata de roca heterogénea es raro que una plataforma se muestre perfectamente regular y muy desarrollada.

1.3.2.2 RÍAS

Las **rías** nacen de un valle o de un conjunto ramificado de ellos todavía reconocible río arriba (Figura 1.27). Estas formaciones se extienden por todo el globo, con excepción de regiones donde ha existido una importante actividad glacial. Las rías se han formado a partir de ríos que excavaron grandes valles, donde el sistema fluvial fue parcialmente invadido por el mar. Aunque el encajamiento de los valles se considera como esencial en su formación, es necesario también que la longitud de sus lados sea mucho mayor que la anchura. Si esto no se cumple, se trata más bien de una bahía o de una ensenada.

Existen diferentes tipos de rías. El caso más sencillo está representado por el valle inferior inundado de un río que ha tomado la forma de embudo y donde el retroceso de las vertientes o la tectónica, han contribuido a su formación. Las denominadas

Figura 1.27:

Ría de Ferrol, La Coruña, España.

(Foto: SempreVolando/Wikipedia)



rías en forma de botella se caracterizan por la intervención de estructuras longitudinales, como flexuras y fallas, que llevan a una configuración original con estrechamiento o angostura hacia el exterior. Otro tipo de rías, dominadas por la tectónica, se caracterizan por cursos de agua muy pequeños, trazados rígidos, y bordes a veces paralelos. Por último, hay rías nacidas de la inundación de cubetas de alteración hacia las que convergen diferentes cursos de agua.

De acuerdo con el tipo, la velocidad de sedimentación interior y la exposición al oleaje, las costas de una ría evolucionan de diferente modo. A menudo, y sobre todo en un medio tropi-

cal, su colmatación crea marismas. Si se trata de ríos activos, aparecen deltas interiores río arriba. Los salientes y bordes exteriores, por el contrario, parecen tallados en forma de acantilados.

1.3.2.3 FIORDOS

Un fiordo es una entrante larga y escarpada, la que se ha originado como resultado de la intensa glaciación en un sistema fluvial que existió en un área montañosa cerca del mar. Los valles originalmente emergidos habrían sido hundidos por el peso de los glaciares, permitiendo la entrada del mar al derretirse el hielo.

Los fiordos son formas mayores en el relieve litoral, excediendo en algunos casos cientos de kilómetros, y presentando centenares de metros de profundidad bajo el nivel actual del mar. Suelen estar precedidos de numerosos islotes rocosos. No todos presentan, sin embargo, pendientes verticales continuas o elevadas como el Sognefjord noruego, la fosa tectónica de Wijdebay en el Spitzberg o

en el fiordo Francisco José de Groenlandia oriental. Los más notables se sitúan en macizos antiguos de fuerte relieve como en Groenlandia, Noruega, el archipiélago de Spitzberg y al Nordeste de la tierra de Baffin. La geomorfología del sur de Chiloé está dominada por fiordos (Figura 1.28).

Aunque su origen glacial no se discute, sí se plantean algunas consideraciones sobre su localización, muchas veces facilitada por la tectónica o por la erosión diferencial. En el caso de los fiordos mayores, puede pensarse en una preparación previa en valles preglaciales, en valles inundados tras una preparación del terreno subaérea o en antiguos estuarios que han sido transformados por el hielo. Solo los fiordos más cortos son obra únicamente de los glaciares. En ellos, la acción del mar es limitada y su colmatación, lenta a causa de su profundidad. En general, los fiordos presentan un umbral que da al mar y que corresponde a la zona de la morrena frontal donde disminuye el poder del hielo al alcanzar el mar.

Figura 1.28:

Geomorfología del sur de Chiloé dominada por fiordos.

(Foto: H. Horta/Armada).



1.3.3 Tipos de costas inexistentes en Chile

1.3.3.1 ATOLONES

Algunos bordes costeros están constituidos por asociaciones biológicas donde los elementos dominantes son las colonias de madréporas. Estos organismos viven en simbiosis con algas unicelulares denominadas zooxantelas, que obtienen carbono por fotosíntesis del gas carbónico disuelto en el agua y expulsan el oxígeno no utilizado del que respiran las madréporas. Las

zooxantelas contribuyen así a la localización de formas coralinas. La asociación se completa con algas calcáreas incrustantes del grupo de las coralináceas, pertenecientes a la familia de las *Lithothamnium*. Estas algas aportan el cimiento necesario para la aglutinación de colonias. A este sistema se añaden gasterópodos, equinodermos y foraminíferos.

Los corales se forman en aguas bastantes saladas con temperaturas superiores a 18 °C, idealmente de 25 a 30 °C. Las zooxantelas exigen por su parte mucha luz para la fotosíntesis. La agitación del agua es

otra condición indispensable para renovar el oxígeno disuelto y conferir valor nutritivo al medio; pero, en la preservación de los corales, no debe ser desmedida: una excesiva turbiedad es nociva para muchas especies.

Hoy, los corales activos se distribuyen en las Bermudas, en el norte del mar Rojo, en Hawái, en el sudoeste de Australia, en Madagascar y en Brasil oriental. Su proliferación se reduce sensiblemente en la costa occidental de los continentes — como la chilena— a causa de las corrientes frías que vienen de los polos. No están presentes en los sectores de los grandes deltas y en lagunas de agua estanca.

En cuanto a su forma, existen múltiples familias de formaciones coralinas. El atolón corresponde a un anillo de coral típico de 1 a 60 km de diámetro cuya estructura comprende varios elementos. Por el lado exterior, presenta un talud escarpado que tiende al desplome a causa del empuje lateral de los corales que luchan por la luz, el oxígeno y el alimento. El talud se rodea de escombros que están soldados a la



Figura 1.29 a



Figura 1.29 b

Figura 1.29:

Dos tipos de costas inexistentes en Chile son los atolones y los manglares.

a) Imágenes satelitales de atolones en el océano Pacífico:

-Atafu en Tokelau (Izquierda)

-Mururoa, archipiélago Tuamotu, Polinesia Francesa. Lugar que hasta el año 1995 fue utilizado para pruebas nucleares (Derecha).

(Fuente: Wikipedia/ Centro Espacial Johnson de la NASA).

b) Manglares ubicados en la región Urabá, al sur del Caribe colombiano.

(Foto: Manglares en Antioquia/ Natalia Moreno).

construcción principal por medio de algas calcáreas, de forma compacta, que son sometidas a la acción del oleaje. El borde externo es la parte más elevada y, más alta a **barlovento** que a **sotavento**. Este anillo con canales de 3 a 4 km de ancho presenta cavidades, cavernas o túneles desde donde surgen géiseres y plataformas en forma de pilón construidas por algas. Una pendiente interna suave conduce a una laguna interior, que encierra generalmente una playa y colonias de coral vivo, sobre todo en sectores abrigados. Su fondo arenoso se halla frecuentemente erizado por pináculos o **arrecifes** de pendiente abrupta, constituidos por corales vivos.

Otra familia corresponde a las construcciones lineales. Los más conocidos son los arrecifes barrera, edificados por varios a centenares de kilómetros en las costas de islas no coralinas. La gran barrera australiana en Queensland, por ejemplo, forma una cinta de 200 a 500 km de ancho y 1500 km de largo, con grandes discontinuidades. Otras barreras se ubican en las islas Marshall, Tuamutu, Fiji y en Nueva Caledonia. Su morfología se compone de bloques y elementos detríticos más pequeños. Su borde exterior y **escarpado** está provisto de espolones de coral vivo que alcanzan entre 30 y 80 km de longitud, separados por intervalos de 10 a 30 km. Tras ellos, se perfila una playa al borde de una laguna, de la que surgen en ocasiones **cayos**, antes de pasar a los fondos más profundos.

1.3.3.2 MANGLARES

En costas tropicales y subtropicales de aguas tranquilas y poco profundas se encuentran los manglares, verdaderos bosques sobre **fango** donde, salvo por los canales de drenaje, la vegetación es casi impenetrable. Estos bosques están conformados por los géneros *Rhizophora*, *Avicennia* y *Conocarpus*, cuyas raíces en forma de arco dan resistencia a los fondos blandos. Los **manglares** se extienden en bandas paralelas al litoral de bajamar, caracterizadas por un entrelazamiento inextricable que conforma un importante elemento de captación de sedimentos.

1.4 LA DINÁMICA SEDIMENTARIA

En esta sección se presentan los procesos erosivos que ocurren en la costa, comenzando por las fuentes y los mecanismos de transporte que los movilizan. Se repasan las técnicas de estudio, incluyendo el balance sedimentológico, la percepción remota, los levantamientos en terreno y el uso de trazadores. Finalmente, se revisan las causas y consecuencias de la erosión natural en las costas y aquella causada por el hombre.

1.4.1 Fuentes de sedimentos

La mayor parte del sedimento que constituye la costa proviene de los ríos que conectan paisajes en erosión al interior de las cuencas, seguido en volúmenes considerablemente meno-

res, por la erosión directa del oleaje y el transporte eólico. La granulometría y la composición química del sedimento que proviene de los ríos están determinadas por la naturaleza de la roca madre y de los procesos que ocurren durante el transporte fluvial, desde la fuente a la desembocadura. Por su parte, la erosión y el desprendimiento de grandes masas de roca en los acantilados marinos producen inicialmente sedimento mal clasificado, que es graduado por tamaño y peso específico en forma muy eficiente por las corrientes litorales. Durante la sedimentación, los materiales pasan por diferentes procesos, entre los que destacan el **intemperismo**, el transporte, la depositación y la mitificación.

La sedimentación comienza cuando los fragmentos son dislocados de la roca madre por el intemperismo, el cual ocasiona un cambio del estado masivo al estado clástico, y desintegra las rocas en fragmentos menores debido a procesos físicos, químicos y biológicos. El intemperismo físico modifica el tamaño de las partículas, el área de la superficie y el volumen de la roca madre, sin que tenga lugar un cambio significativo de su composición. El intemperismo químico, por su parte, genera un cambio de las propiedades químicas y un aumento del volumen total, tanto por la menor densidad de los nuevos compuestos como por la porosidad adicional del material. El intemperismo biológico es semejante al químico, pues origina cambios del estado de agregación y de la composición química.

El denominado complejo de intemperismo es el producto final de estos mecanismos y la fuente principal de material detrítico arrastrado mecánica-

mente y transformado en sedimento clástico por agentes geológicos. El sedimento es acarreado por las corrientes litorales en forma de arrastre de fondo y suspensión y por las corrientes oceánicas, como transporte en suspensión, entre otros procesos menores. Los fragmentos no consolidados que deja el intemperismo quedan disponibles para ser movidos por las corrientes más energéticas.

1.4.2 Transporte de sedimentos en la zona rompiente

Los sedimentos se transportan a lo largo de las playas debido a la acción del oleaje, las corrientes, las mareas y el viento, donde el primero es el más importante en las costas expuestas al océano Pacífico. Este transporte masivo de arena, análogo a un «río de arena» en la zona rompiente (Inman & Sheldon, 1965), tiene por consecuencia la erosión o acreción en un determinado sector de la costa. Se estima que más del 90% del transporte de arena se produce en la zona del oleaje rompiente.

El transporte se produce de dos formas. La primera, denominada transporte transversal, ocurre de manera perpendicular a la línea costera debido al oleaje de rompientes. La segunda, denominada transporte longitudinal, ocurre en forma paralela a la costa debido a la corriente litoral producida por el oleaje. La magnitud de ambos tipos de transporte de arenas depende de las características del oleaje; esto es, de su energía y de su orientación respecto de la línea costera (Figura 1.30).

1.4.2.1 TRANSPORTE TRANSVERSAL DE SEDIMENTOS

El transporte transversal es causado por el flujo turbulento que ocurre en la rompiente, el cual pone en suspensión y advecta los sedimentos del fondo. La magnitud del transporte hacia y desde la costa depende además de las características del oleaje, del grosor de la arena y de la pendiente de la playa. Es difícil evaluar la cantidad de arena que se mueve, pues para ello se requiere de levantamientos batimétricos costosos o modelaciones numéricas cuya calibración no es sencilla. Sin embargo, pueden obtenerse estimaciones estudiando los cambios de nivel de la arena mediante varillas clavadas en el lecho marino, el uso de drones topográficos, la comparación de imágenes satelitales o vuelos aerofotogramétricos y el acople de modelos de oleaje, corrientes y morfodinámica (ver sección 1.4.4).

1.4.2.2 TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS

Cuando la acción de las olas sobre una costa es oblicua (Figura 1.30a y b), la rompiente produce tanto un movimiento oscilatorio con períodos de entre 3 a 30 segundos y una corriente longitudinal que permanece relativamente constante durante un estado de mar. El transporte longitudinal de sedimentos en la rompiente se compone, por lo tanto, del movimiento longitudinal originado por las corrientes litorales, usualmente inferiores a 1 m/s (Figura 1.30c), y del zigzagueo de la arena producto del *runup* y *rundown*: límite superior e inferior alcanzado por el oleaje, respectivamen-

te (Figura 1.30d). En general, el movimiento zigzagueante de la arena a lo largo de la playa es menor que el transporte debido a las corrientes litorales. La excepción ocurre cuando el oleaje es aproximadamente perpendicular a la playa, en cuyo caso el transporte longitudinal resulta casi nulo y se generan corrientes de retorno (Figura 1.6). Desde luego, ambos tipos de transporte interactúan e intensifican la remoción de arena en un tramo de playa.

La velocidad de una corriente litoral depende, entre otros factores, de la pendiente de la playa, de las propiedades del sedimento y del oleaje. Este se caracteriza, como primera aproximación, por el período, la altura y la dirección, donde estos últimos parámetros son predominantes en el transporte sedimentario. La tasa real de transporte de sedimentos, por su parte, puede ser igual a la tasa potencial en caso de haber sedimentos abundantes, o menor en caso de haber escasez de fuentes de material.

1.4.2.3 MECANISMOS FUNDAMENTALES DE TRANSPORTE

Cuando el flujo actúa sobre un fondo arenoso, los granos pueden rodar sobre el lecho, ser levantados por las fluctuaciones verticales de velocidad en lo que se conoce como saltación, o ser suspendidos en la columna de agua (Figura 1.31). A continuación, se describe cada uno de estos mecanismos:

- Rodadura

El movimiento por rodadura tiene su inicio cuando el arrastre generado por el flujo vence a las fuerzas gravitacionales y



Figura 1.30:

Mecanismos de transporte de sedimentos en la zona rompiente.

- Zona rompiente;
- frentes del oleaje experimentando refracción, asomeramiento y rotura;
- corriente longitudinal forzada por el oleaje rompiente y
- trayectoria de granos de arena producto del transporte transversal y longitudinal.

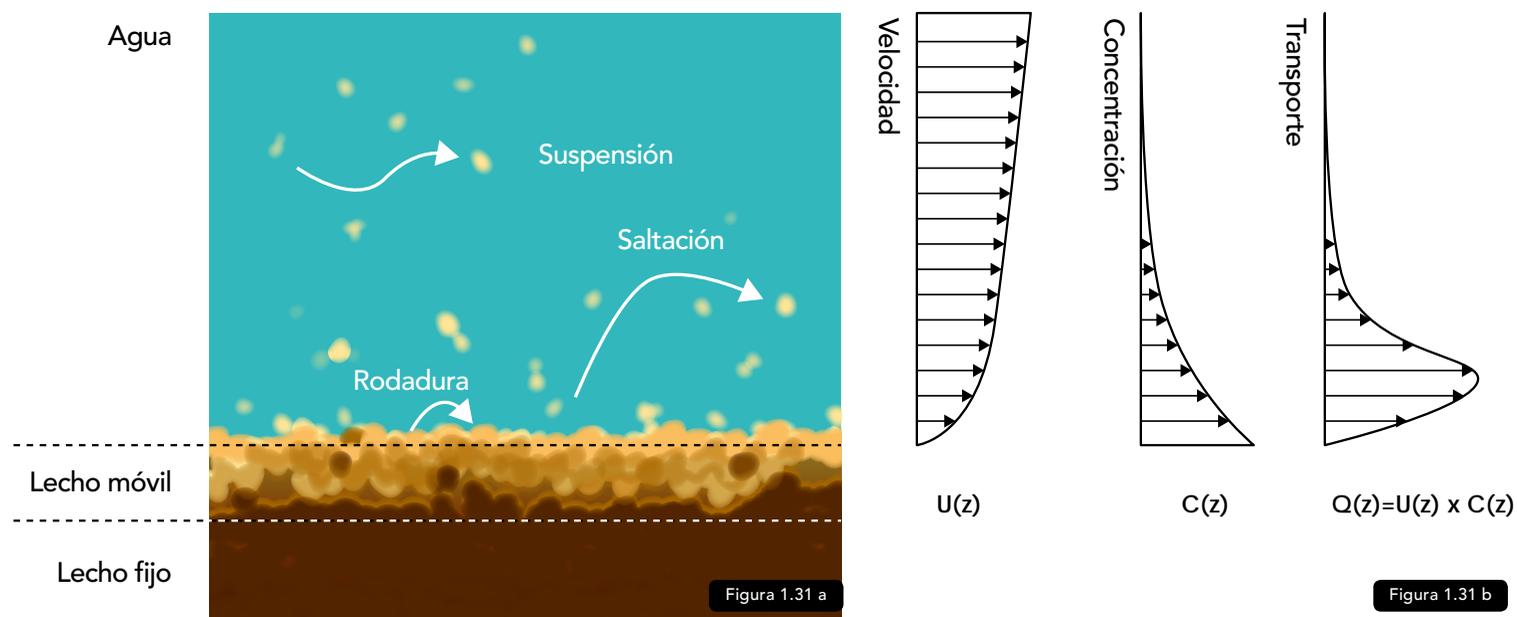
(Adaptado: Inman & Sheldon, 1965).

Figura 1.31:

a) Mecanismos de transporte de granos de arena en un lecho móvil ubicado bajo el agua.

b) Distribución vertical de velocidad media del flujo, $U(z)$, concentración de los sólidos en suspensión, $C(z)$, y transporte de sedimentos en suspensión, $Q(z)=U(z) \times C(z)$, en sedimentos finos, la concentración y el transporte en suspensión son más uniformes en la profundidad.

(Elaboración propia).



cohesivas que tienden a mantener quietas a las partículas en el lecho. Cuando la velocidad media del flujo es relativamente baja, las partículas ruedan junto con el fluido. Si la velocidad aumenta, el transporte se efectúa mediante saltación o suspensión. Las partículas esféricas son más propensas a rodar que aquellas de canto anguloso. De igual modo, las partículas más pesadas de la matriz sedimentológica son las que ruedan por el fondo. Así, para un tamaño, forma y densidad dados, las esferas ruedan con mayor facilidad y se adelantan a las partículas de menor esfericidad. El efecto neto de estos factores combinado con la turbulencia genera una segregación compleja del material en el lecho.

Mientras las condiciones de flujo permanezcan inalteradas, el transporte por rodadura continúa en un estado de equilibrio dinámico. En este caso, el esfuerzo de corte que desestabiliza el lecho balancea al peso, que actúa como fuerza restauradora. Cuando hay una reducción de la velocidad media o de la intensidad de la turbulencia, las partículas más grandes, más densas y de menor esfericidad son dejadas atrás.

- Saltación

La saltación es una forma de transporte en la cual las partículas avanzan a lo largo del lecho en una serie de saltos cortos e interrumpidos. Si la fluctuación vertical de la velocidad producto del flujo turbulento es suficientemente grande, la partícula es expulsada del lecho a la columna de agua y eventualmente vuelve a él por la acción de la gravedad.

El movimiento de saltación corresponde a una fase intermedia entre el transporte por rodadura y el por suspensión. Las partículas que no son suficientemente grandes para mantenerse en el lecho ni suficientemente pequeñas para ser arrastradas en suspensión, pueden ser levantadas momentáneamente sobre el fondo y adquirir transitoriamente la velocidad del flujo, moviéndose en una serie de saltos. Ejemplos de saltación co-

rresponden al movimiento de arena efectuado por el viento en las dunas, aquel generado en los ríos por el caudal o el generado en los estuarios por las corrientes mareales.

- Suspensión

Este mecanismo tiene lugar cuando la intensidad de la turbulencia es alta y las partículas son transportadas en forma independiente del lecho. Una partícula suspendida en una corriente turbulenta no sigue una trayectoria uniforme y suave, sino que se mueve en forma aleatoria.

El transporte en suspensión depende, en principio, de la concentración del material en suspensión, de la velocidad del flujo y la distancia al lecho (Figura 1.31b). Las partículas más propensas a la suspensión son las más pequeñas, menos esféricas y menos densas. Aunque debido a la cohesión las partículas muy pequeñas son más difíciles de poner en suspensión que los granos de arena, el movimiento de grandes partículas sobre el lecho disloca comúnmente a las partículas más finas, ha-

ciendo que se unan a la carga en suspensión. Una vez en suspensión, los granos gruesos se asientan rápidamente y los finos permanecen en suspensión a causa de su menor peso.

Las observaciones en laboratorio muestran que la concentración de las partículas es mucho mayor cerca del lecho que de la superficie (Figura 1.31b). Además, el perfil vertical de concentración depende del tamaño de las partículas. Así, la concentración del material muy fino puede ser casi igual en toda la columna de agua, mientras que las partículas más gruesas —como las de limo y arena fina— exhiben gradientes bien definidos entre la superficie y el fondo.

Para un diámetro dado, la cantidad de material que cae es proporcional al producto del gradiente vertical de concentración y la velocidad de sedimentación con que caerían las partículas en estado de reposo (velocidad terminal de sedimentación). La cantidad de material que se eleva, por el contrario, depende de la difusión turbulenta en sentido vertical. Cuando el movi-

miento ascendente debido a la turbulencia se vuelve igual al movimiento descendente debido al peso, existe un equilibrio dinámico. La depositación ocurre cuando, producto de la disminución de la velocidad media del flujo, disminuye la intensidad de la turbulencia. Esta explicación, no obstante, excluye la eventual presencia de flujos ascendentes que, al advectar las partículas, se suman al efecto de la difusión turbulenta. Este tipo de flujos advectivos se observa en los ríos o canales altamente energéticos, como el canal Chacao.

Para un tamaño dado de partícula, las esferas se asientan con mayor rapidez que los discos, debido a que ofrecen menor resistencia al flujo. Asimismo, los minerales pesados se depositan con mayor rapidez que los menos densos. Así, las partículas más planas y livianas se elevan más alto y/o permanecen en suspensión por mayor tiempo que las partículas esféricas o más pesadas, las cuales tienden a permanecer cerca del fondo o se depositan.

Sumado a estos efectos de corto plazo, existen procesos de mayor escala que tienen lugar cuando las partículas colisionan unas contra otras durante su transporte, especialmente cerca de la fuente de sedimentos. A medida que las partículas ruedan y se deslizan a lo largo de un río o de una zona de rompientes, sus aristas desaparecen por desprendimiento o abrasión, aumentando su redondez. Si las condiciones son extremadamente vigorosas, las partículas pueden partirse en fragmentos, dando origen a aristas ásperas y a cambios bruscos en el tamaño y en su forma. En condiciones normales de transporte, la rotura es menos importante que la abrasión y las partículas tienden a formar cantos redondeados.

1.4.3 Técnicas de estudio de la evolución de playas

Para calcular las tasas de transporte litoral y ver los impactos en la evolución de playas, se aplican varios métodos, entre los que destacan el balance sedimentológico, los sistemas de percepción remota, los levantamientos en terreno, la modelación numérica y el uso de trazadores, entre otros. El transporte de arena se mide o estima comúnmente a lo largo de un año, de modo de capturar el comportamiento morfodinámico de verano e invierno. Usualmente, se consigna como un volumen de arena que pasa por un punto de medición, en $m^3/año$.

1.4.3.1 BALANCE SEDIMENTOLÓGICO

Una técnica común para evaluar los cambios en la costa es el denominado balance sedimentológico. Esta herramienta se basa en la cuantificación de las fuentes, los sumideros y las tasas de transporte, a partir de los cuales se estima la erosión o el depósito de sedimentos. Usualmente, el balance se aplica a la fracción pesada de sedimentos que se transporta por deriva litoral en la zona de rompientes. La fracción de finos en suspensión que se difunde y advecta en la columna de agua requiere para su estudio de otras técnicas, como la modelación numérica.

Playa de grava en Chiloé,
Región de Los Lagos.

(Foto: H. Horta/Armada).

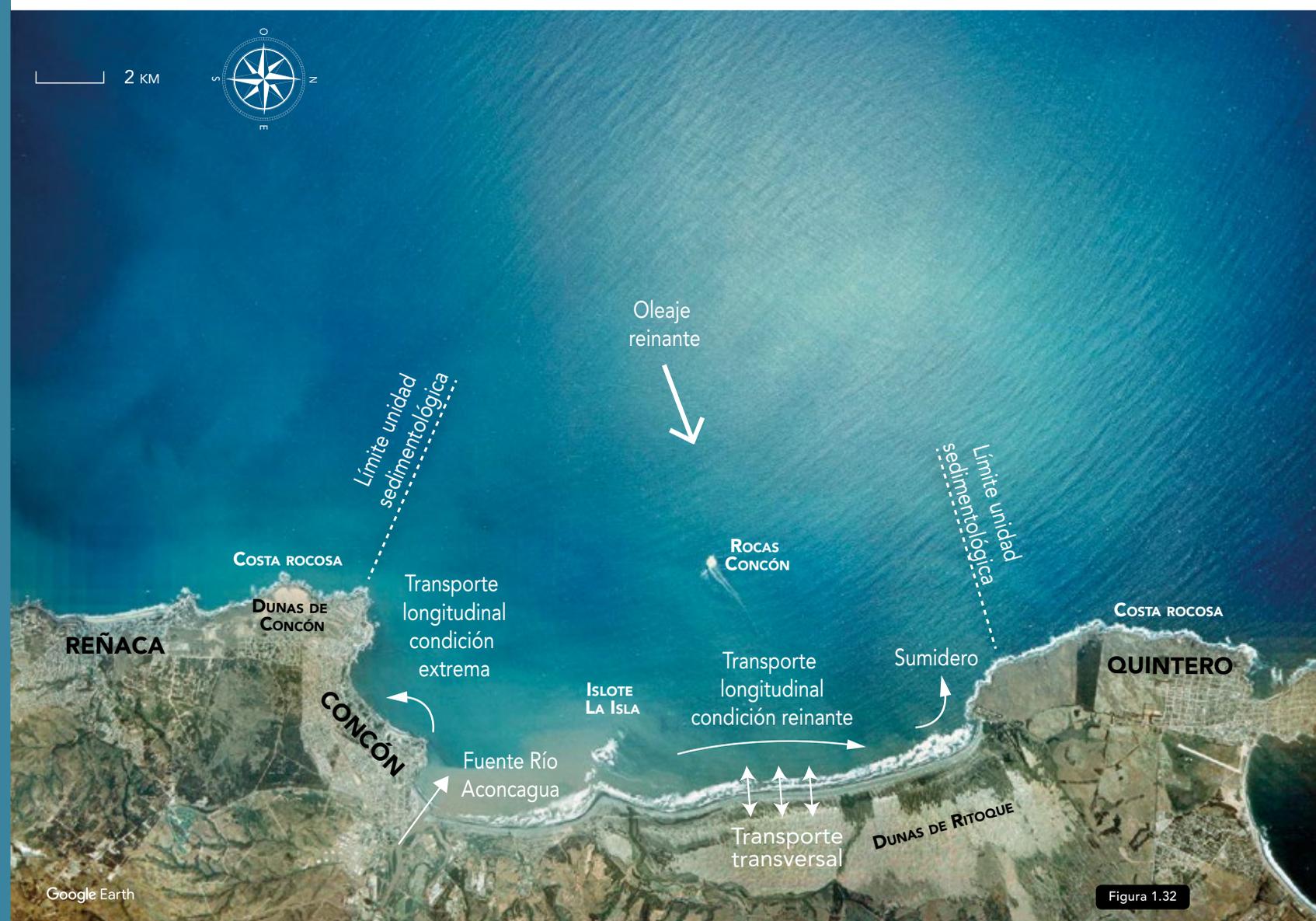


Figura 1.32:

Balance sedimentológico en la bahía de Concón y dunas de Ritoque, Región de Valparaíso.

(Elaboración propia).

En la Figura 1.32, se presenta un balance sedimentológico a nivel conceptual aplicado en la bahía de Concón, en cuyo extremo norte se encuentran las dunas de Ritoque.

Las fuentes de información típicamente utilizadas para evaluar el cambio morfológico en la costa son las cartas náuticas, fotografías aéreas, registros del relleno de playas, registros de dragado y levantamientos geológicos. Cuando se dispone de datos históricos es posible determinar específicamente las tendencias de la erosión o de la acumulación. Si se trata de una región vasta puede hacerse un inventario de la erosión costera en diferentes tramos de ella, a partir de fotografías aéreas de la región. En algunos casos, se utilizan cartas topográficas y náuticas antiguas si se consideran que son fidedignas.

Si mediante el balance sedimentológico se concluye que en un tramo de la costa se acumula más arena que la transportada por el oleaje, la línea costera acrecerá. Ello ocurre, por ejemplo, en la desembocadura de los ríos que forman deltas. Por otra parte, si el suministro de arena es menor que la cantidad

que mueve el oleaje, la costa se erosionará. Cuando existe un equilibrio aproximado entre el suministro de sedimento y la capacidad de transporte litoral, la línea costera se mantiene relativamente constante. Por supuesto, hay factores externos, como los cambios de nivel del mar, alteraciones en el suministro de sedimentos o la obstrucción de rompeolas, que pueden modificar bastante esa estabilidad. Si por algún motivo, el suministro de sedimento en un tramo de playa se reduce (aumenta), se espera que ocurra erosión (acreción). La ruptura del equilibrio es resultado de factores como

la alteración de los sistemas de drenajes; la construcción de edificaciones costeras; la estabilización y tierras altas producto de programas de conservación de suelos; la intervención de los ríos mediante presas o la extracción de arena. Si bien estos corresponden a la categoría de erosión causada por el hombre, las desembocaduras y los deltas están sumamente expuestos a cambios naturales del suministro de sedimentos.



Figura 1.33:

Cambios en la línea de costa en la playa de Anakena (Rapa Nui). Los cambios fueron calculados mediante 30 transectas aproximadamente, perpendiculares a la costa, a partir de las cuales se evaluaron las condiciones de estabilidad, acumulación y erosión, durante el período comprendido entre 1996 y 2017.

(Gentileza de Carolina Martínez Reyes. Disponible en Winckler et al., 2019).

1.4.3.2 TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota (*remote sensing*) es la disciplina que busca obtener información de un objeto a partir de datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. En el caso de los estudios de evolución de playas, se utilizan series superpuestas de fotografías aéreas y/o satelitales de la zona de interés. Para lograr un buen resultado, se requieren fotografías tomadas en forma anual, aunque en la medida que retrocedemos en el tiempo es más difícil contar con esa resolución temporal.

Si se busca estudiar la posición de la línea de costa, es necesario además conocer la fecha y la hora en que se tomó dicha fotografía, de modo de estimar el nivel de marea en dicho momento.

El análisis consiste en establecer puntos fijos en tierra, reconocibles en todas las fotografías, que servirán de referencia para cuantificar la magnitud de la erosión o acumulación producida durante el período considerado. La distancia entre dos puntos de referencia permite, por lo tanto, calcular las dimensiones en la fotografía. Los resultados del estudio pueden presentarse mediante mapas que señalen las zonas

de la costa donde se haya experimentado estabilidad, erosión, acumulación, o alternancia entre alguno de estos estados.

En la Figura 1.33 se muestra un ejemplo de este tipo de estudios para la playa de Anakena (Rapa Nui). En este caso, se considera que un tramo de playa es estable si la distancia horizontal en que se desplaza la línea de costa es inferior a 20 cm/año, erosiva si esta retrocede más de 20 cm/año y acumulativa si avanza más de dicho valor. Cabe notar que las tasas de movimiento de la línea de playa son valores promedio durante el período del estudio (por lo común varias décadas), y no permiten, salvo que se cuente con muchas fotografías durante un año, evaluar la variación estacional de una playa.

Otro tipo de estudios que se efectúa para inferir el movimiento del sedimento en suspensión, se basa en el seguimiento de trazadores naturales o artificiales radiactivos y no radiactivos. Esta técnica es también fundamental para el diseño de sistemas de captación y descarga de efluentes en el mar, como emisarios submarinos de aguas servidas, descargas de residuos industriales líquidos (RILES), sistemas de enfriamiento de plantas térmicas, sistemas de regasificación de gas natural licuado o derrames

Figura 1.34:

Estudio de la hidrodinámica y la capacidad de mezcla en la bahía de Quintero mediante un trazador (rodamina) vertido desde una lancha. El seguimiento del trazador para diferentes puntos de vertido se efectúa mediante un dron. El trabajo fue efectuado en 2019 por exalumnos de Ingeniería Civil Océanica, para la empresa Ecotecnos. (Elaboración propia).



de hidrocarburos. En la Figura 1.34, se muestra el estudio de la hidrodinámica y la capacidad de mezcla en la bahía de Quintero mediante un trazador (rodamina) vertido desde una lancha.

1.4.3.3 LEVANTAMIENTOS TOPO-BATIMÉTRICOS

Los levantamientos topo-batimétricos contemplan mediciones en el mar y la tierra. En el mar, se utilizan técnicas batimétricas que se efectúan desde una embarcación cuando las condiciones oceanográficas lo permiten; mientras que, en tierra se recurre a técnicas topográficas efectuadas en terreno.

La topografía es la disciplina que estudia el conjunto de principios y métodos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie terrestre, tanto en sus formas naturales como aquellas generadas por el hombre. La topografía se suele dividir en la planimetría, que se orienta a la representación de la superficie sobre un plano paralelo al horizonte, y la altimetría, que representa las distancias verticales o cotas, respecto del plano de referencia. La topografía se restringe a pequeñas extensiones de terreno; en tanto que la geodesia permite cubrir áreas mayores donde la curvatura de la Tierra cobra importancia.

La Figura 1.35a muestra un esquema de medición altimétrica comúnmente utilizado para la medición de perfiles de pla-

ya, costas rocosas o para el posicionamiento de cotas de marea. Los instrumentos para mediciones topográficas son: niveles, taquímetros, estacio-

nes totales y drones; además de equipamiento de apoyo como las miras, huinchas y trípodes, entre otros (Figura 1.35b).

Figura 1.35:

a) Mediciones altimétricas en zonas costeras.

(Foto: SHOA).

Esta figura continúa en la página siguiente.



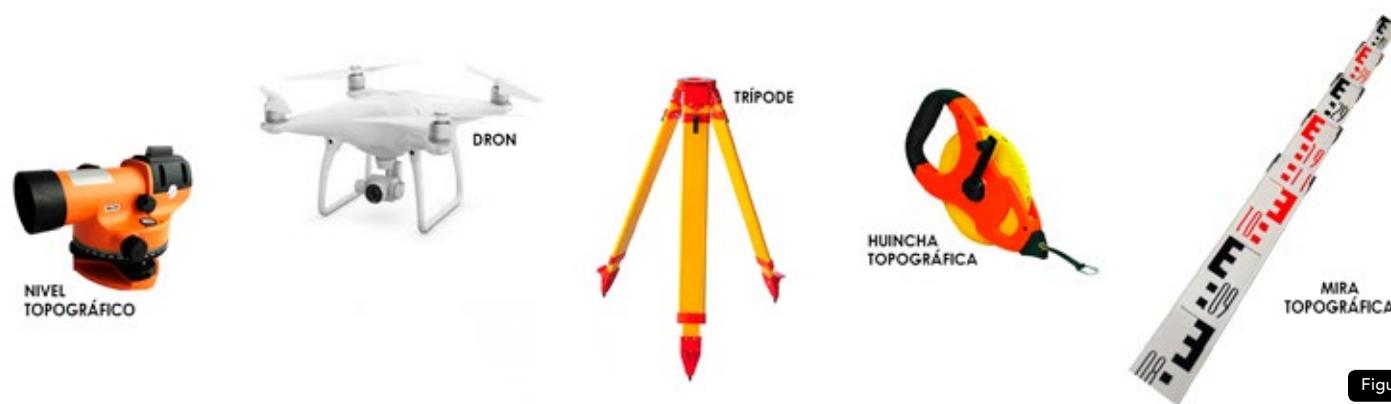


Figura 1.35 b

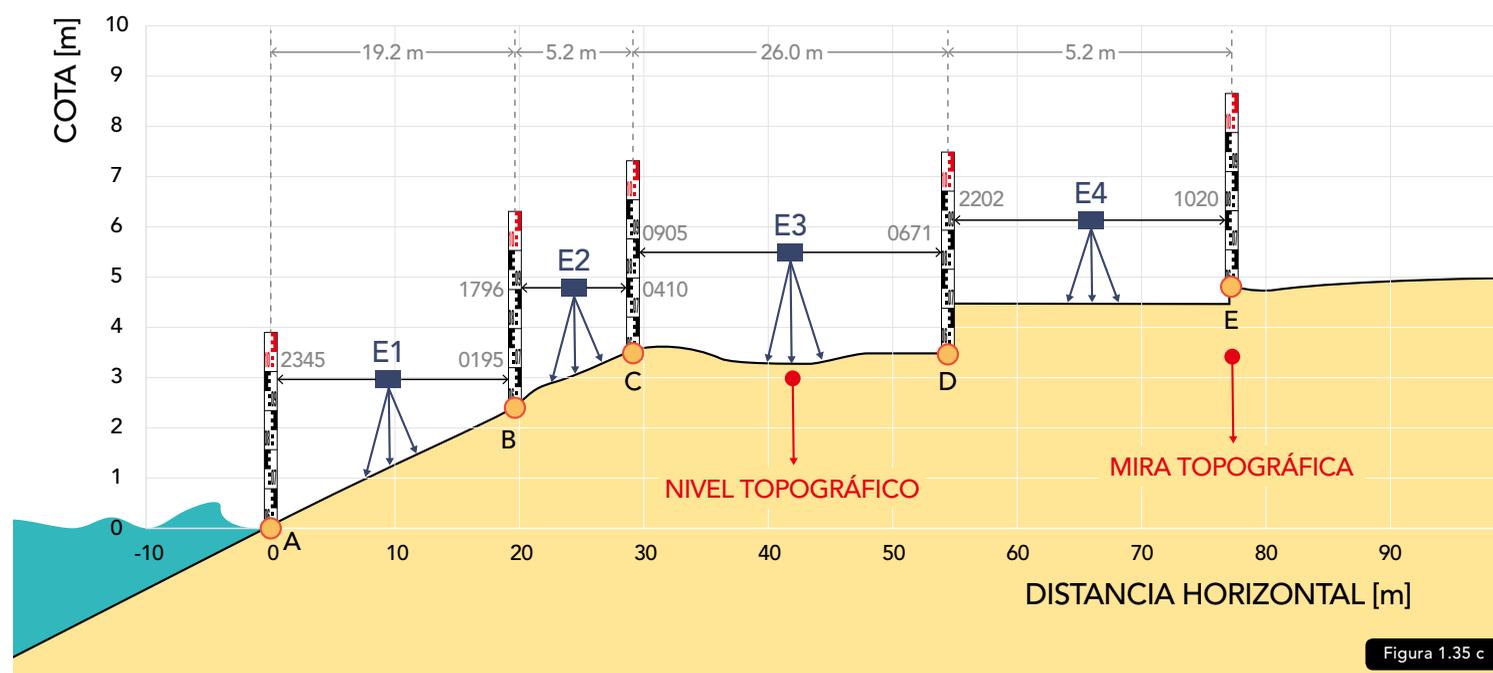


Figura 1.35 c

Figura 1.35 (continuación):

b) Instrumentos típicos para medición topográfica.

c) Esquema de medición altimétrica orientada a definir la geometría de un perfil de playa en Los Marineros, Viña del Mar. El terreno real es representado mediante los puntos A, B, C, D y E. Donde se ubican las miras topográficas, se incluyen mediciones de distancias horizontales y verticales. Por ejemplo, la cota de B (CB) en milímetros, se calcula como $CB = CA + 2345 - 0195$.

(Elaboración propia).

La batimetría, por su parte, es el equivalente submarino de la topografía. Los datos de profundidad (sondajes) utilizados para la confección de mapas batimétricos se obtienen de técnicas hidroacústicas que se basan en la propagación de ondas de sonido en el agua. La cantidad de tiempo que tarda el sonido en propagarse desde un instrumento, rebotar en el fondo y volver al mismo, permite calcular la profundidad local. Entre los instrumentos comúnmente utilizados están los sonares, los monohaz o los multiscan, que se montan bajo la quilla

o en el costado del casco de un buque.

Los planos topobatimétricos utilizan el sistema de representación de planos acotados, mostrando la elevación del terreno mediante líneas que conectan los puntos de igual cota, denominadas curvas de nivel en topografía y veriles o isóbatas en batimetría. En topografía, se utiliza como plano de referencia el nivel medio del mar (NMM); en tanto que en la batimetría se utiliza el nivel de reducción de sondas (NRS). En Chile, este corresponde al plano determinado

por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en el perigeo. El hecho de que las mediciones de topografía y batimetría sean efectuadas respecto de diferentes planos de referencia, obliga a llevar los datos correspondientes a planos y cotas de referencias comunes, durante el post-proceso de la información levantada en terreno.

En la Figura 1.36 se muestra, como ejemplo, la carta náutica de la bahía y puerto de Valparaíso, que incluye sondajes batimétricos e información adicional para la navegación en superficie.

1.4.3.4 MODELACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA

Un modelo corresponde a la representación simplificada de un fenómeno que interesa comprender o predecir, y se alimenta de datos de campo obtenidos mediante percepción remota, levantamientos en terreno u otras fuentes de información.

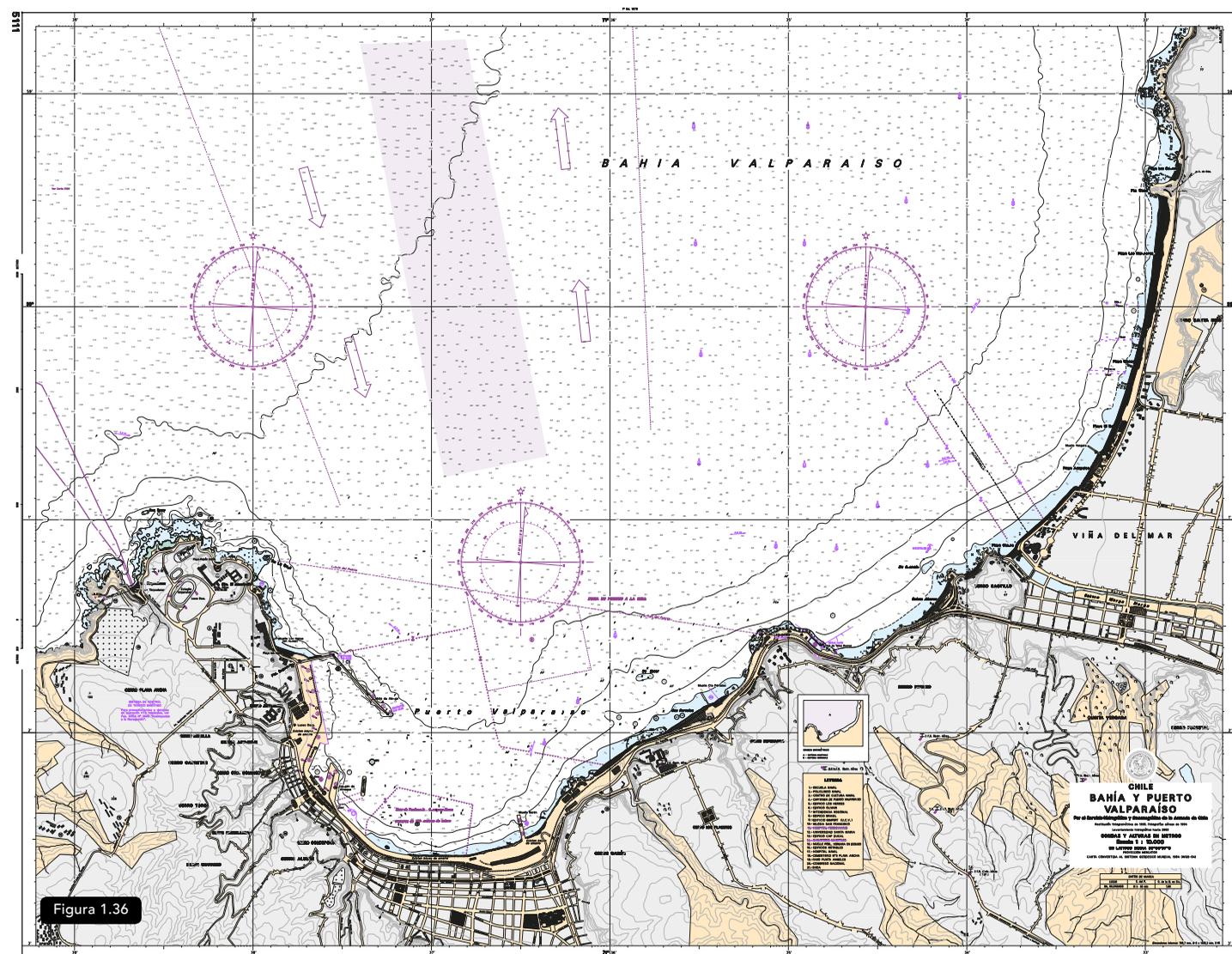
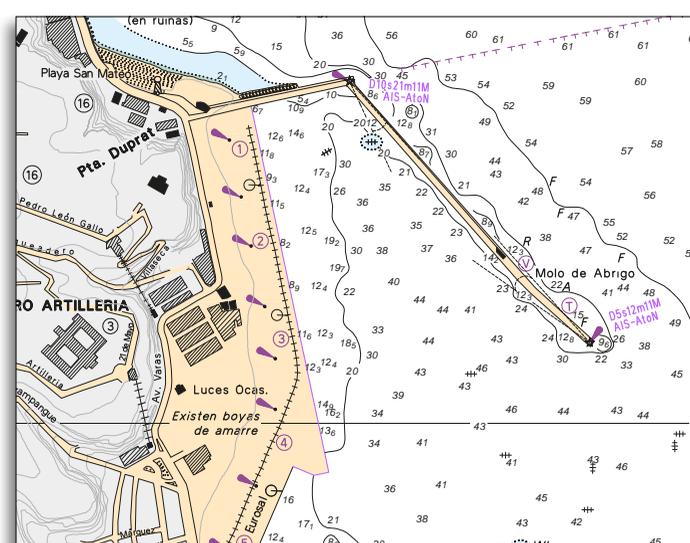


Figura 1.36:

Carta náutica de la bahía y puerto Valparaíso. En el recuadro, se muestra el molo de abrigo construido en las primeras décadas del siglo XX. Su profundidad es de 40 a 50 m, uno de los más profundos a nivel mundial.

(Fuente: Carta SHOA 5111).



Detalle Carta SHOA 5111.

La complejidad de los fenómenos naturales que ocurren en la costa—donde confluyen el agua, el aire, los sedimentos y las obras marítimas—obliga a modelar los procesos dominantes y descartar aquellos que tienen una relevancia menor. Los modelos permiten determinar la importancia relativa de dichos procesos y predecir escenarios futuros ante intervenciones humanas o cambio climático, entre otros.

En la ingeniería oceánica se utilizan comúnmente modelos físicos y numéricos, que son complementarios entre sí. Los primeros son represen-

taciones de un sistema real a escala y bajo condiciones controladas en un laboratorio (Figura 1.37). En los modelos físicos, se escalan en forma simultánea la geometría, la cinemática (desplazamientos, velocidad y aceleración) y la dinámica (fuerzas) del prototipo en tamaño real a un modelo a escala usualmente menor, donde se ejecutan las observaciones. Los modelos físicos tienen la ventaja de permitir la visualización real de los procesos costeros; pero presentan la limitación de descartar algunas fuerzas secundarias que no se pueden representar al reducir el tamaño de la realidad que reproducen.



Figura 1.37

Figura 1.37:

Modelación física de la morfodinámica de playa Lisera, (Arica, Región de Arica y Parinacota) realizada por ingenieros del Instituto Nacional de Hidráulica (INH), ubicado en Peñaflo, Región Metropolitana.

(Foto: Gentileza de Karla González Novion, Directora Ejecutiva del INH).

Debido a la dificultad y costo de estudiar los procesos morfodinámicos mediante modelos físicos, especialmente para escalas de tiempo del orden de años a décadas, se recurre a la modelación numérica como una herramienta de ayuda para entender la dinámica de estos sistemas. Los modelos numéricos representan los principios de conservación de la masa (agua contaminante o sedimentos, según sea el

caso), mediante ecuaciones que permiten caracterizar la evolución de las propiedades del flujo en el espacio y el tiempo. En el caso de los estudios de playas y desembocaduras, se deben acoplar modelos de oleaje, corrientes, transporte de sedimentos y evolución de playas, que deben ser calibrados y validados para reproducir una buena caracterización morfodinámica (Figura 1.38).

En lugares donde no hay fuentes de información, es posible estimar las tasas de transporte litoral sobre la base de la medición o modelado de las condiciones locales del oleaje. Los estudios pueden basarse en un esquema híbrido, donde la modelación física se utiliza para validar los modelos numéricos, con los que se evalúan muchos más casos que no serían factibles mediante modelación física, por los costos y plazos que esta implica. Los estudios se efectúan a escala horaria, diaria, anual o interanual, dependiendo del proceso que interese estudiar.

Figura 1.38:

Modelos de propagación de oleaje y de respuesta morfodinámica de playa para la marejada del 8 de agosto de 2015 en Viña del Mar:

a) Altura significativa de oleaje obtenida del modelo Wavewatch III.

(Fuente: Esparza, 2017).

b) Topobatimetría levantada en el sitio, incluyendo un perfil utilizado en la modelación.

c) Modelo olaFOAM, a escala 1:30, utilizado para el cálculo de sobrepaso en la defensa costera.

d) Series de tiempo de las forzantes de marea astronómica Z_a y oleaje; este último especificado mediante altura significativa H_{m0} y el período punta T_p a 20 m de profundidad.

e) Respuesta de playa al momento de máxima socavación, en el perfil indicado en b.

(Fuente: Fritz, 2018).

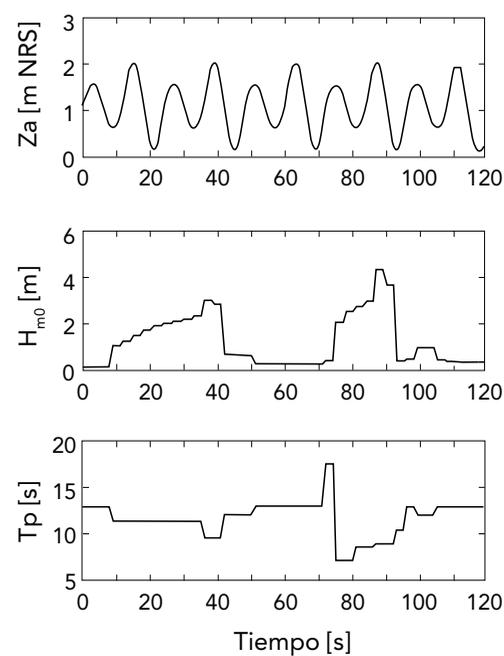
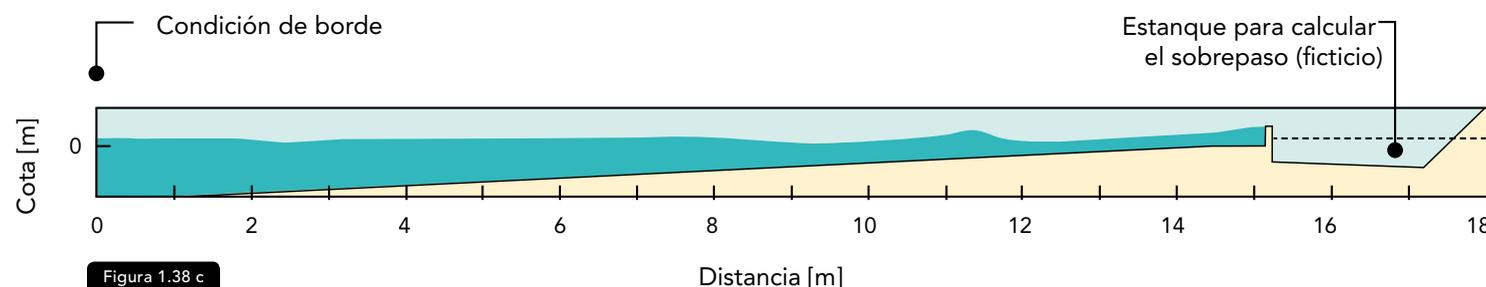
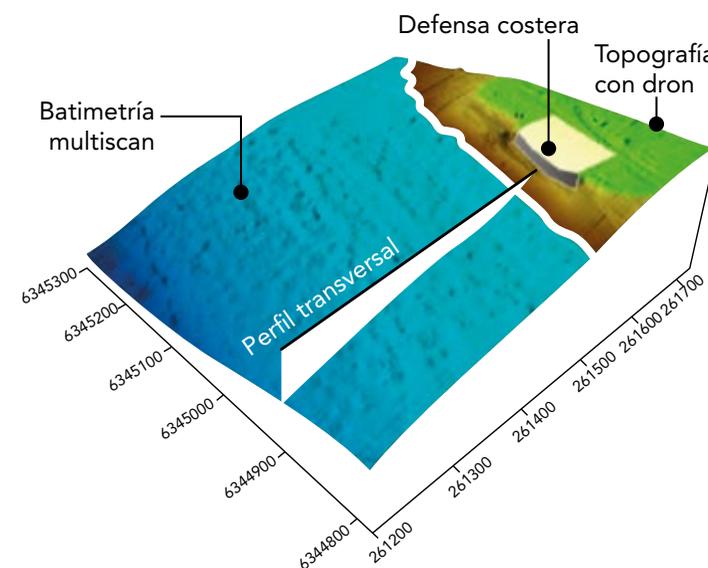
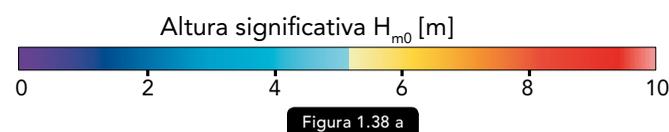
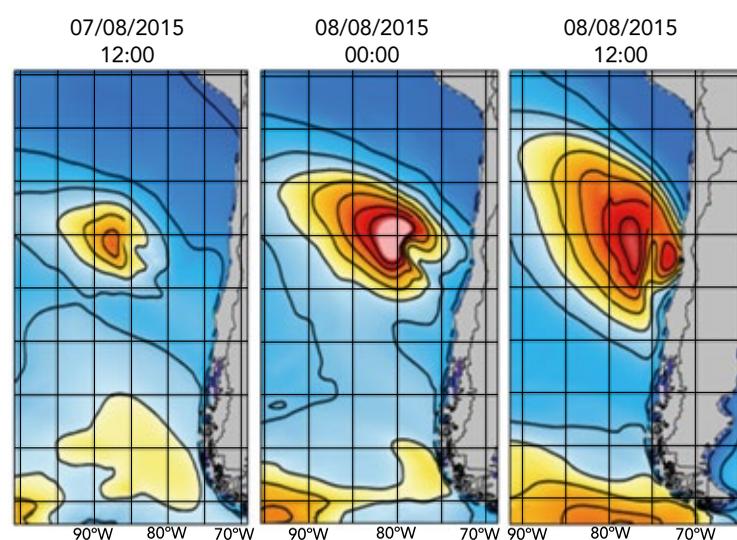


Figura 1.38 d

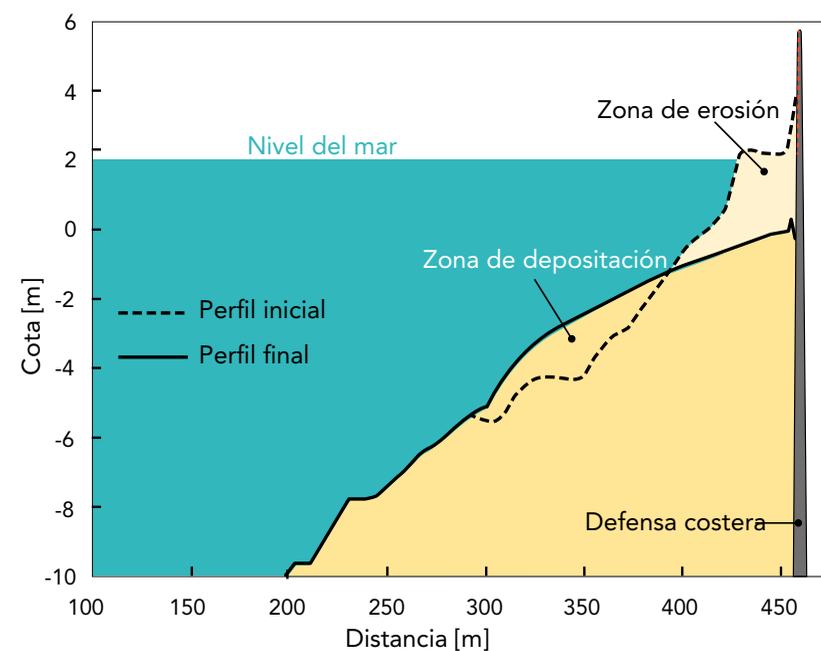


Figura 1.38 e

1.4.4 Erosión natural en las costas

La posición de la línea costera en un momento dado es el resultado de interacciones entre los sedimentos y procesos costeros asociados al oleaje, al viento, a la marea y al nivel del mar. La erosión natural se entiende, entonces, como un proceso geológico, por el cual la naturaleza tiende a equilibrar estas interacciones. Cuando estas permanecen relativamente constantes en el tiempo, se alcanza el «perfil de equilibrio» de una playa. No obstante, dado que el entorno costero se caracteriza por tendencias a largo plazo, variaciones cíclicas regulares e irregulares, cambios repentinos y fenómenos a veces indescriptibles, que se denominan «ruido» (Figura 1.39), el perfil de equilibrio se alcanza durante períodos relativamente cortos de tiempo, durante los cuales las condiciones oceanográficas experimentan variaciones poco significativas.

Si se analiza la posición de la línea de costa, siguiendo el esquema de la Figura 1.39, la tendencia a largo plazo está asociada al cambio climático (del orden de décadas a milenios) o al período intersísmico (del orden de décadas a centurias), que ocurre entre dos terremotos de gran magnitud.

Las variaciones cíclicas regulares son atribuibles, por ejemplo, al ciclo diario de las mareas (12.42 horas), al ciclo característico de las mareas de sicigia y cuadratura (14.75 días) o a las oscilaciones estacionales (1 año), que hacen que la línea de costa avance o retroceda. Las variaciones cíclicas irregulares se asocian, al oleaje, a la marea meteorológica, debido al descenso de la presión atmosférica y vientos hacia la costa (del

orden de horas), o a meteotsunamis activados por fluctuaciones rápidas de la presión atmosférica (5 minutos a 2 horas). También, y a mayor escala temporal, está el aumento del nivel del mar durante la fase cálida del ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENOS) o su reducción durante la fase opuesta, denominada La Niña (del orden de años).

Los cambios repentinos de la línea de costa se atribuyen a solevantamientos o subsidencias co-sísmicas que ocurren durante un terremoto (del orden de segundos); al impacto de un tsunami o a intervenciones antrópicas. El ruido puede

estar asociado o a errores instrumentales, a procesos físicos que desconocemos. Naturalmente, que este tipo de división de escalas se puede aplicar a cualquier variable en el ámbito de las geociencias.

El movimiento de sedimentos en una playa se produce en forma diferente según suba o baje el nivel del mar. El aumento del nivel tiende a erosionar la playa seca y a acrecentar la **playa sumergida** (Figura 1.14). Su descenso, por el contrario, ocasiona la acreción en la parte superior de la playa. Las mareas, por ejemplo, generan una variación de la zona de la playa que se encuentra expuesta al oleaje. Una pleamar promueve la rotura del oleaje en una zona más alta que una bajamar; del mismo modo, durante una sicigia, los niveles de la playa expuestos a esa acción son más altos que durante una cuadratura.

Cabe notar que no todos estos cambios conducen a una erosión neta a largo plazo. Incluso la erosión causada por las marejadas, los tsunamis o la subsidencia co-sísmica es compensada una vez que se restablecen las nuevas condiciones de equilibrio del sistema. La Figura 1.40, por ejemplo, muestra los movi-

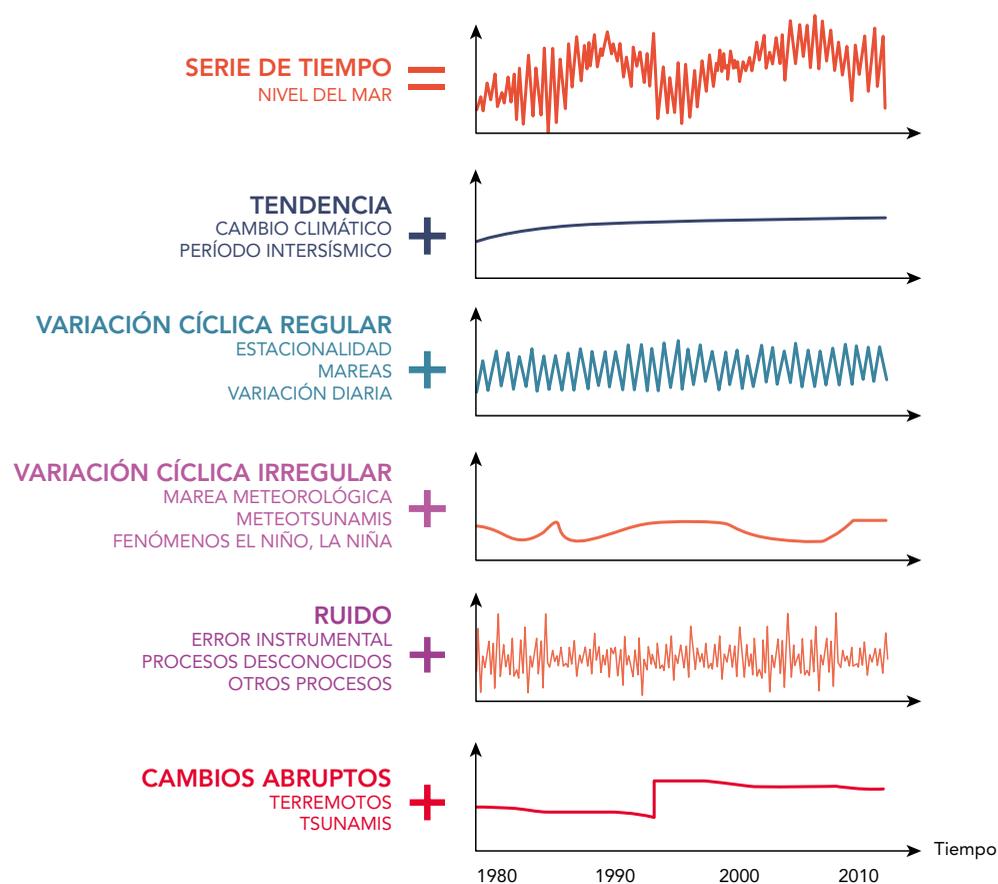


Figura 1.39

Figura 1.39:

Descomposición de una serie de tiempo de nivel del mar mediante un modelo aditivo, donde los fenómenos se asumen independientes. (Elaboración propia).

Figura 1.40:

Desembocadura del Río Mataquito, ubicado en el límite de las provincias de Curicó y Talca, Región del Maule.

a) Las tres imágenes satelitales corresponden a la lengua de arena antes y después del tsunami del 27 de febrero de 2010.

(Fuente: Google Earth).

b) Mediciones de *runup* (cota de inundación respecto al nivel del mar) producido por el tsunami.

c) Nivel de río aguas arriba de la desembocadura, mostrando el aumento abrupto de la profundidad, producto de la subsidencia costera. Se ve también la oscilación de la marea deformada.

(Elaboración propia).



Movimientos masivos de sedimentos en la desembocadura del río Mataquito, producto del tsunami y la subsidencia costera y el tsunami causados por el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central (Fuente: Google Earth).

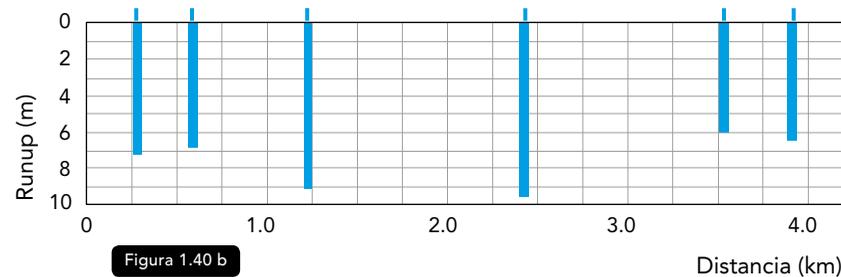
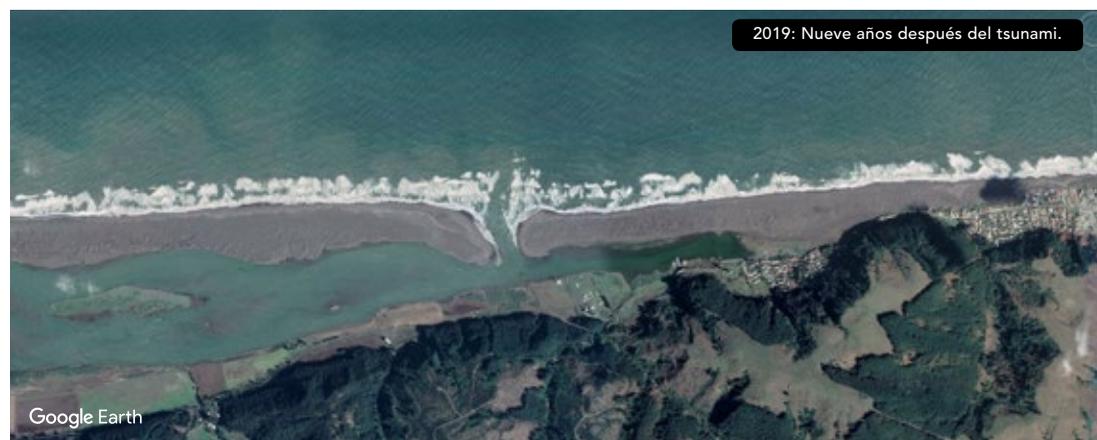


Figura 1.40 b



mientos masivos de sedimentos y el cambio abrupto de la forma de la desembocadura del río Mataquito, producto del tsunami y la subsidencia costera originada por el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central. Al cabo de un par de años, la desembocadura recuperaría parcialmente su forma, mostrando cuán dinámicos son estos sistemas sedimentológicos. La Figura 1.41, por su parte, muestra una línea de costa ubicada en Punta de Lobos, en las cercanías de Pichilemu, que retrocedió producto de la subsidencia costera del mismo terremoto, acomodándose a nuevas condiciones de equilibrio dinámico. Cabe notar que el río Mataquito se ubica a 60 km al sur de Punta de Lobos y constituye junto al río Maule, las fuentes de aporte sedimentario de Pichilemu.

El tiempo de recuperación de un sistema sedimentológico en la costa puede abarcar semanas, meses o incluso años, y es mayor en las playas de arena más gruesa que fina. Salvo en condiciones excepcionales como una marejada fuerte, la playa tiende a mantener una posición cercana al perfil de equilibrio a lo largo del tiempo. Los cambios eustáticos, es decir, la variación global del nivel del mar respecto a los continentes, llevan también a una erosión neta a largo plazo.

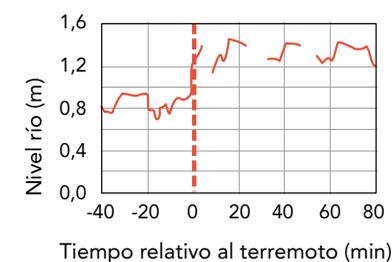


Figura 1.40 c



Figura 1.41:

Erosión natural en Punta de Lobos, 6 km al sur de Pichilemu, producida inicialmente por la subsidencia del terreno producto del terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central, y acrecentada durante el ciclo El Niño de 2016-2017, que se asoció a un aumento del nivel del mar y a marejadas intensas y frecuentes.

a) Ilustra la posición aproximada de la línea de costa, ubicada varias decenas de metros de la posición actual.

b) Muestra el escarpe del orden de 6 m originado por la erosión.

(Elaboración propia).

En una línea costera estable, se mantiene un equilibrio aproximado entre el suministro de sedimento y la capacidad de transporte litoral. Si el aporte sedimentario de un sector de la playa se reduce, el oleaje puede ocasionar una fuerte erosión mediante los mecanismos de transporte transversal o longitudinal. El suministro de sedimento se reduce como resultado de modificaciones naturales o de origen antropogénico en los sistemas de drenaje.

La vegetación terrestre y las algas próximas a la playa influyen directamente en la reducción de la erosión al conglomerar el sedimento y reducir la turbulencia en la columna de agua. En los sitios donde la vegetación costera es densa—como en dunas, manglares y bancos de algas—, la erosión y el transporte de sedimento se ralentizan. En ciertas lagunas y bahías tropicales, los manglares aceleran la sedimentación en fracciones finas como el limo y la arcilla. La pérdida natural de vegetación debido a sequías o desertificación, o aquella debido a la acción del hombre, puede provocar erosión en ciertos casos.

1.4.5 Erosión provocada por el hombre

Las actividades antrópicas causan erosión cuando interfieren con los procesos costeros naturales. Según la distancia a la costa, estas acciones se clasifican como aquellas que se efectúan tierra adentro, en la zona litoral y en la costa propiamente tal.

Al interior del continente se desarrollan actividades tales como la construcción de presas, la extracción de áridos del lecho fluvial y la alteración de los sistemas de drenaje. En la zona litoral se efectúan acciones como la deforestación del suelo, la explotación forestal, la extracción de áridos, la construcción de obras costeras (Figura 1.42) y la descarga de residuos sólidos.

Finalmente, en la costa también se extraen arenas y gravas para dragados, explotación minera o construcción.

Las presas se construyen en los ríos con fines de riego, generación de electricidad, control de inundaciones y formación de embalses. Por formar parte principal del sistema de drenaje de las tierras altas, los ríos son una importante fuente de sedimento, que puede ser interrumpido por estas construcciones. Con la retención de sedimentos en las presas se genera una erosión del río aguas abajo, que requiere de acciones de ingeniería adicionales para la protección de la ribera. La Figura 1.43 muestra la central hidroeléctrica Rapel, cuyo muro tiene 112 m de alto y 350 m de extensión. La central llega a generar 377 MW (megavatios) y almacenar 695 millones de metros cúbicos de agua. Sus efectos aguas abajo, sin embargo, no han sido estudiados a la fecha.

Las arenas y gravas extraídas del lecho fluvial, de las playas y de la zona litoral constituyen una fuente importante de material de construcción en muchos países. Dicha extracción genera un efecto análogo al de las presas; pues reduce la provisión de sedimento y promueve la erosión del río aguas abajo del sitio de empréstito. Si la extracción se efectúa en el tramo más alto de la cuenca, hay posibilidad de que la erosión del lecho fluvial aguas abajo compense la pérdida de sedimento, lo cual depende de la magnitud de la extracción. Pero, si la arena se extrae en las cercanías de la desembocadura, es improbable que la erosión



Figura 1.42:

Erosión de origen antrópico debida, en parte, a la construcción de muros verticales sobre playas.

a) Caleta de pescadores de Pichilemu, donde la rampa de varado de botes se encuentra inutilizada por el descenso de la playa.

b) Playa al sur de la caleta de Algarrobo, donde antiguamente existía una playa arenosa.

(Fotos: P. Winckler).

aguas abajo compense la pérdida de sedimentos, generando un déficit neto en el suministro de las costas. La extracción de sedimentos es evidente en los grandes ríos de la zona central de Chile, como el Aconcagua, el Maipo y el Biobío.

El suministro de sedimento se distribuye también sobre la costa y el litoral por el escurrimiento natural de las lluvias. Los sistemas de drenaje hechos por el hombre pueden interferir con este proceso, pues al concentrar el agua de lluvia ocasionan una erosión localizada y acreencia en otros lugares si son mal diseñados.

La eliminación excesiva de las plantas para uso como combustible y el exceso de pastoreo son causa de deforestación en las zonas costeras. La disminución de la cubierta vegetal que liga físicamente y coloniza los sedimentos, se traduce en un mayor escurrimiento del agua en la superficie. La falta de vegetación también acrecienta la erosión, al exponer al sedimento al viento y oleaje. Por ejemplo, las antedunas que forman una línea defensiva contra esas acciones son destruidas por el pastoreo excesivo.

La arena y la grava se explotan en las costas de muchos países en desarrollo, pues la tecnología es relativamente sencilla. Los depósitos de esos materiales acumulados en las playas constituyen una fuente de suministro para fines constructivos. Un

proceso similar ocurre cuando los urbanizadores alteran indiscriminadamente el perfil de la playa para desarrollos inmobiliarios; los cuales, deberían ejecutarse, idealmente, lejos de la zona influenciada por los agentes oceánicos. Si bien la urbanización no es, necesariamente, la causa primordial de la erosión costera en gran escala, tiene un efecto local que será más marcado cuanto más pronunciada sea la deriva litoral.

Por lo general, las excavaciones destruyen la ligazón del sedimento al eliminar los revestimientos superficiales y aumentar el escurrimiento de las lluvias. Una vez construidas, las estructuras refuerzan el terreno y ocasionan una reducción del suministro de sedimento, que queda inmo-

vilizado bajo las fundaciones. Esta práctica tiene sobre la erosión un efecto parecido al de la deforestación.

Paradójicamente, las estructuras destinadas a impedir la erosión costera contribuyen a generar erosión aguas abajo de las mismas, o socavación en sus contornos. Estas estructuras pueden ser perpendiculares o paralelas a la costa, denominadas **espigones** o **diques exentos** (Figura 1.16), respectivamente. Por lo general, su función es proteger el terreno y las propiedades en tierra firme. La magnitud de la socavación depende de factores naturales como el oleaje, las características del sedimento, el perfil de la playa, además de factores como la geometría, permeabilidad y porosidad de la estructura. Las

Figura 1.43:

Central hidroeléctrica Rapel.

Su infraestructura está compuesta por un muro de doble curvatura que alberga la sala de máquinas y los vertederos tipo salto de esquí que se utilizan para regular el nivel en años lluviosos. Se observa la roca madre aguas abajo de la presa producto del potencial erosivo del caudal de salida.

Aguas arriba, se aprecia el espejo de agua que da forma al lago Rapel.

(Foto: P. Winckler).



Figura 1.43

estructuras verticales y altamente reflejantes, como los malecones que albergan paseos costeros, promueven la socavación (Figura 1.42). Esta es menor cuando el frente de la estructura no presenta singularidades en su geometría, tiene pendientes suaves y es más permeable. Cuando las estructuras son demasiado voluminosas y próximas al agua, se produce una obstrucción de la deriva litoral, generando una acumulación de sedimentos aguas arriba y erosión, aguas abajo de la estructura.

Las zonas costeras suelen emplearse también para descargar residuos sólidos con el objetivo de ganar terreno al mar para instalaciones portuarias. Los rellenos modifican la pendiente y la orientación de la playa, pudiendo también obstruir la deriva litoral, lo cual produce acumulación deriva arriba y erosión deriva abajo. El influjo de aguas cloacales y residuos cenagosos provenientes de zonas urbanizadas, por su parte, no influye en la erosión de la costa; puesto que por su peso constituyen sedimentos en suspensión.

La extracción de arenas submarinas reduce el suministro de sedimento del sistema. Esta actividad altera la geometría del fondo, modificando el patrón de propagación del oleaje y concentrando la energía en lugares puntuales de la costa. Es necesario, asimismo, considerar los dragados que se desarrollan para trazar y mantener canales de navegación, o garantizar la profundidad de sitios de atraque en puertos. Cuando estos se efectúan en sentido perpendicular a la costa, modifican la tasa de acumulación de sedimento en las inmediaciones de la obra, promoviendo la erosión deriva abajo. Por otra parte, la descarga de material dragado en lugares ubicados aguas arriba de una zona potencialmente erosiva puede atenuar el retroceso de la línea de costa.

La planificación de toda actividad extractiva debe, por lo tanto, considerar procesos, mediante estudios que cuantifiquen la dinámica litoral en una franja costera. El presupuesto sedimentario, que no es más que la aplicación del principio de conservación de la masa de sedimentos del litoral (sección 1.4.3.1), requiere del cálculo de las fuentes (crédito), sumideros (débito) y el balance en un compartimento sedimentario dado. La aplicación de este concepto permite obtener información útil para hacer frente a los problemas de erosión en las playas; pues, una vez determinada la fuente de pérdida de sedimento, pueden adoptarse medidas correctivas.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- BEYÁ, J., M. ÁLVAREZ, A. GALLARDO, H. HIDALGO, C. AGUIRRE, & VALDIVIA, C. PARRA, L. MÉNDEZ, C. CONTRERAS, P. WINCKLER & M. MOLINA (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- CARVAJAL, M., M. CONTRERAS-LÓPEZ, P. WINCKLER, & I. SEPÚLVEDA (2017). Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America during an Intense Storm. *Pure and Applied Geophysics*. DOI: 10.1007/s00024-017-1584-0.
- ESPARZA, C. (2017) *Calibración y validación del modelo numérico Wavewatch III en la simulación de marejadas del 3/7/2013 y del 8/8/2015*. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso: 142 pp.
- FRITZ, S. (2018). *Estudio del sobrepaso en avenida Perú, mediante el software CFD -olaFOAM*. Proyecto de Título. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica. Universidad de Valparaíso, 73 pp.
- GALLOWAY, W. E. (1975). *Process Framework for Describing the Morphologic and Stratigraphic Evolution of Deltaic Depositional Systems*, Houston Geol. Soc, Houston, Texas, United States (USA).
- INMAN, D. & J. SHELDON (1965). The Beach: A river of sand. AGI-EBF Earth Sciences Series. Encyclopaedia Britannica Films: www.youtube.com/watch?v=FqT1g2riQ30
- JARAMILLO, U., S. PELÁEZ, C. APONTE, C. FLÓREZ-AYALA, C. AVELLA, O. MANRIQUE & A. RODRÍGUEZ (2015). *Hacia un inventario completo de humedales. Colombia anfibia. Un país de humedales, 1*, 108-109
- KOMAR, P.D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*, Prentice Hall, New York, 429 pp.
- SEPÚLVEDA, S. & A. SEREY (2009). Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aysén earthquake, southern Chile (45.5°S). *Andean Geology* 36 (1): 131-136.
- SVENDSEN, I. A. & I. G. JONSSON (1976). *Hydrodynamics of coastal regions*. Den Private ingeniørfond, Technical University of Denmark.
- TARBUCK, E. J. & F. K. LUTGENS (1999). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. 6a edición. Prentice Hall Iberia. Madrid.
- WINCKLER, P., M. CONTRERAS-LÓPEZ, S. VICUÑA, C. LARRAGUIBEL, J. MORA, C. ESPARZA, J. SALCEDO, S. GELCICH, J.M. FARIÑA, C. MARTÍNEZ, R. AGREDANO, O. MELO, N. BAMBACH, D. MORALES, C. MARINKOVIC, A. PICA (2019). Resumen Ejecutivo, en «*Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile*». Preparado para el Ministerio del Medio Ambiente.
- WRIGHT, L. D., & A. D. SHORT (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56(1-4), 93-118.



Faro monumental en la avenida del Mar, La Serena, Región de Coquimbo.

(Foto: P. Winckler).

LA ZONA COSTERA DE CHILE

Páginas 42 - 75

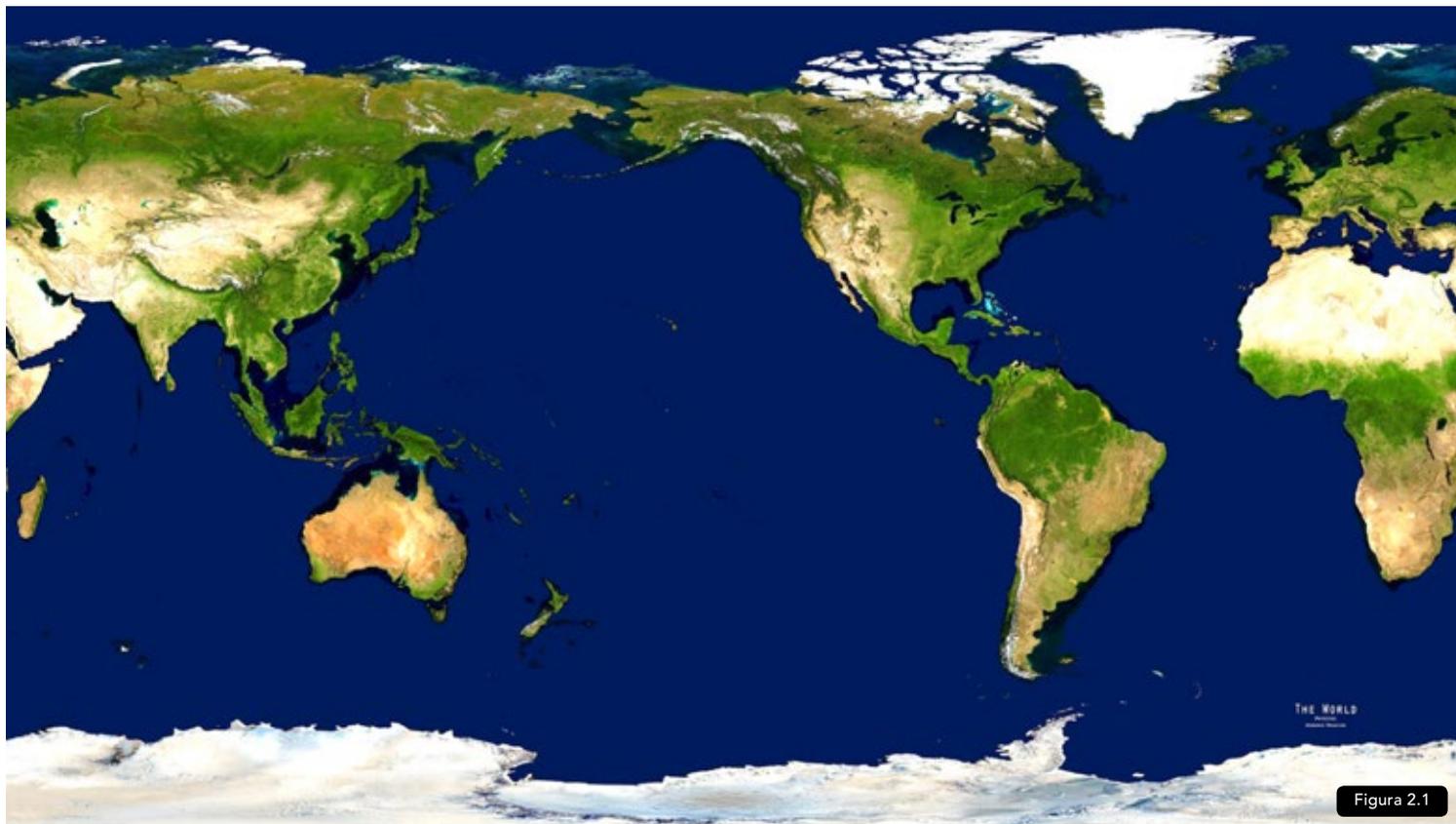


Figura 2.1:

Mosaico de fotografías satelitales (donde no se muestran nubes). En el centro se ubica la cuenca del Pacífico.

(Image courtesy of Great Circle Mapper).

2.1 MARCO DE REFERENCIA

La costa de Chile enfrenta al océano más grande de la Tierra (Figura 2.1). La zona costera y la plataforma continental adyacente están definidas por fenómenos naturales que le confieren al país un conjunto de características propias. Los límites de estas zonas, que se modifican en diferentes escalas de tiempo, permiten la existencia de procesos altamente dinámicos en este extenso litoral.

La influencia de esta gran masa oceánica se manifiesta prácticamente en todo el territorio, puesto que Chile continental tiene un ancho máximo de 445 km y de apenas 90 km en su parte más angosta. Este extenso litoral se extiende desde la latitud 17° 29' 57" S hasta los 56° 32' 12" S, abarcando una longitud de 4270 km en sentido latitudinal¹. Su eje central es el meridiano 70° W en su límite norte, desplazándose paulatinamente hasta el meridiano 74° W en el extremo sur.

Esta particular configuración física constituye el marco donde en forma creciente se manifiesta el uso antropogénico de la zona costera, lo que se evidencia en el extraordinario auge del desarrollo inmobiliario, de los cultivos marinos en la industria salmonera y del turismo. A ello se suma la instalación de plantas eólicas, termoeléctricas y desalinizadoras de agua de mar, la actividad portuaria y de cabotaje, que en su conjunto hacen del litoral una de las unidades geográficas de mayor importancia para el desarrollo de un país como es Chile. De hecho, los puertos cumplen un papel estratégico para su integración comercial con el mundo, pues transfieren en torno al 90% del comercio internacional (SEP, 2006).

En este contexto, los rasgos geológicos, edafológicos, climatológicos, geomorfológicos, geofísicos y oceanográficos desempeñan un papel decisivo, estructurando condiciones complejas que afectan a las poblaciones ribereñas. En el territorio continental existen varias zonas climáticas, desde los márgenes

¹ Datos disponibles en www.gob.cl/nuestro-pais/



Figura 2.2

Figura 2.2:

Mosaico de fotografías satelitales de Chile. Se observa la marcada influencia de la cordillera de los Andes, en la accidentada geomorfología, que se diferencia de las grandes cuencas del río de la Plata y del Amazonas.

(Extracto de la Figura 2.1).

subtropicales en el norte hasta las regiones subpolares del extremo austral.

La naturaleza montañosa de Chile trae como consecuencia que la mayor parte de los suelos sean jóvenes. Asimismo, la actividad volcánica presente en gran parte de la cordillera de los Andes, incorpora materiales que generan su revitalización. Este fenómeno se suma a la erosión provocada por la actividad fluvial en las laderas de los valles, que promueve un aumento de la sedimentación y, por ende, el rejuvenecimiento de los suelos.

Adicionalmente, el relieve constituye un factor importante en la distribución de la población. Más del 60% de la superficie del país presenta altitudes considerables que dificultan el asentamiento. Como consecuencia de ello, la población ha tendido a ocupar áreas bajas y planas en la depresión intermedia. La disponibilidad de agua es otro factor importante en la demografía del país.

Políticamente, el país se organiza en regiones, cada una de ellas con una capital, la cual actúa como centro administrativo y regulador de sus actividades. Las regiones se subdividen en provincias,

que son unidades territoriales intermedias con características económicas semejantes. A su vez, las provincias están constituidas por unidades territoriales menores, llamadas comunas, en donde las acciones gubernamentales se ejercen en forma más directa. Es notable que, con excepción de la Región Metropolitana, todas las regiones tengan una zona costera.

Los factores que han influido en la actual distribución de la población nacional están ligados a las etapas históricas de poblamiento y a la centralización político-administrativa. La preferencia del colonizador hispano por el ambiente mediterráneo contribuye a explicar, en parte, la localización de las ciudades en zonas con ventajas comparativas en términos de pendientes, clima y suelo. La preferencia del colonizador hispano por el ambiente mediterráneo contribuye a explicar, en parte, la localización de las ciudades en zonas con ventajas comparativas en términos de pendientes, clima y suelo.

A partir de la Conquista se produjo la ocupación del centro del país, y su expansión a los extremos norte y sur, manteniendo una centralización político-administrativa desmesurada en Santiago, capital del país. Es digno de atención, desde un punto de vista demográfico, que un tercio de la población se concentre en esta ciudad, ubicada en una depresión longitudinal, a espaldas del océano.

2.2 DEMOGRAFÍA

La demografía es la ciencia que estudia, mediante técnicas estadísticas, las poblaciones humanas según su estado y distribución en un momento determinado o de acuerdo con su evolución histórica.

Según el Censo del 2017, el Instituto Nacional de Estadística (INE) informó que la población de Chile alcanzó a los 17 574 003 habitantes, lo que implica un aumento del 15% respecto del Censo del 2002 (INE, 2018). Las comunidades de los 100 mu-



Figura 2.3

Figura 2.3:

Planta desalinizadora de Minera Escondida en el puerto Coloso, inaugurada en el año 2018. Esta planta es la más grande en su tipo en América y Europa.

(Foto: soychile.cl).

nicipios costeros representaron el 25 % en 2002 (3953562 habitantes); cifra que, sin embargo, no proporciona detalles sobre la población que vive a menos de 10 m sobre el nivel del mar, zonas que se denominan en la literatura especializada LECZ (Low Elevation Coastal Zones), Zonas Costeras de Baja Elevación (McGranahan *et al.*, 2007).

Las estimaciones de la población urbana, rural y total del país, así como el área en las LECZ, están disponibles para 1990, 2000 y 2010 en CIESIN (2013). Estas estimaciones muestran que las LECZ en Chile cubren 7865 km² y representan el 1.09% del territorio (Tabla 2-I). El porcentaje de tierra en las LECZ es mucho más pequeño que para el mundo y América Latina (Tabla 2-II). Esta situación se explica por las terrazas costeras comparativamente altas que resultan de la actividad tectónica en Chile.

Las cifras indican que 214863 habitantes vivían en las LECZ, en 2010; lo que corresponde al 1.2% de la población. De estos, 71.3% se ubicaban en zonas urbanas y 28.3%, en zonas rurales.

La población chilena en las LECZ también es menor que a nivel mundial y latinoamericano, donde representan el 10% y el 6%, respectivamente. Entre 1990 y 2010, la población en estas zonas aumentó en un 30.4 % y la densidad creció de 21 a 27 habs./km². Estas cifras históricas y la predicción para 2100 son consistentes con las tendencias globales que muestran rápidos incrementos en las comunidades costeras y el consiguiente aumento del riesgo de desastres relacionados con el cambio climático en estas zonas (Church *et al.*, 2013).

Entre los factores naturales presentes en nuestra geogra-

Tipo	CHILE (a)			AMÉRICA LATINA	MUNDO (b)
	LECZ [km ²]	Total [km ²]	LECZ / Total [%]	LECZ / Total [%]	LECZ / Total [%]
Total	7865	721 447	1.09	2	2
Urbana	154	12 028	1.28	7	8
Rural	7711	709 419	1.09	-	-

(a) La superficie de Chile es de 2006096 km² (INE, 2016) incluyendo el territorio insular y el Territorio Chileno Antártico. Si se excluye el territorio antártico, cubre 755838 km².

(b) McGranahan *et al.* (2007).

Tabla 2-I

Tipo	Año	POBLACIÓN			DENSIDAD	
		LECZ [miles de habs.]	Total [millones de habs.]	LECZ / Total [%]	LECZ [habs./km ²]	Total [habs./km ²]
Total	1990	164.7	13.2	1.25	21	18
	2000	189.1	15.4	1.23	24	21
	2010	214.9	17.3	1.24	27	24
	2100	330.0	29.5	1.12	42	41
Urbana	1990	113.6	5.8	1.98	738	478
	2000	132.6	7.0	1.91	861	579
	2010	153.2	8.0	1.91	995	669
	2100	238.0	12.4	1.92	1545	1028
Rural	1990	51.1	7.4	0.69	7	10
	2000	56.4	8.4	0.67	7	12
	2010	61.7	9.2	0.67	8	13
	2100	92.0	17.1	0.54	12	24

Tabla 2-II

fía, el clima desempeña un papel importante que marca tres zonas poblacionales.

La zona desértica en el norte (18° S a 30° S) está escasamente habitada; con la excepción de algunas ciudades costeras, con 150 000 a 300 000 habitantes, como Arica, Iquique, Antofagasta y La Serena. Considerando los territorios interiores, esta zona alberga menos de un 9 % de la población del país. Los asenta-

mientos urbanos se han desarrollado en torno a la actividad minera, la cual dio origen a poblaciones que se establecieron alrededor de los yacimientos ubicados al interior y que, en los últimos decenios, se han desplazado hacia ciudades costeras.

La mayor disponibilidad de recursos naturales y las mejores condiciones climáticas de la zona central (30° S a 42° S) han contribuido a una mayor diversidad de la actividad económica, que promovió la ocupación del territorio. Esta zona abarca gran parte de la población costera en las áreas metropolitanas de Valparaíso y Concepción, con casi 1 millón de personas cada una, y ciudades más pequeñas como Puerto Montt y Valdivia. Si se considera el territorio continental, esta región abarca el 91 % de la población del país.

Tabla 2-I:

Extensión territorial en zonas urbanas y rurales ubicadas bajo los 10 m sobre el nivel medio del mar. Se incluye la comparación con estadísticas de América Latina y el mundo.

(Fuente: CIESIN, 2013).

Tabla 2-II:

Población y densidad ubicadas bajo los 10 m sobre el nivel medio del mar en 1990, 2000 y 2010, además de predicciones para el 2100.

(Fuente: CIESIN, 2013).

Figura 2.4:

Por sus condiciones geográficas, Chile posee variados climas, desde el clima seco y desértico de la zona norte, al clima templado y más húmedo del sur.

a) Antofagasta. Clima seco desértico.

b) Torres del Paine. Clima templado frío lluvioso sin estación seca.



Figura 2.4 a

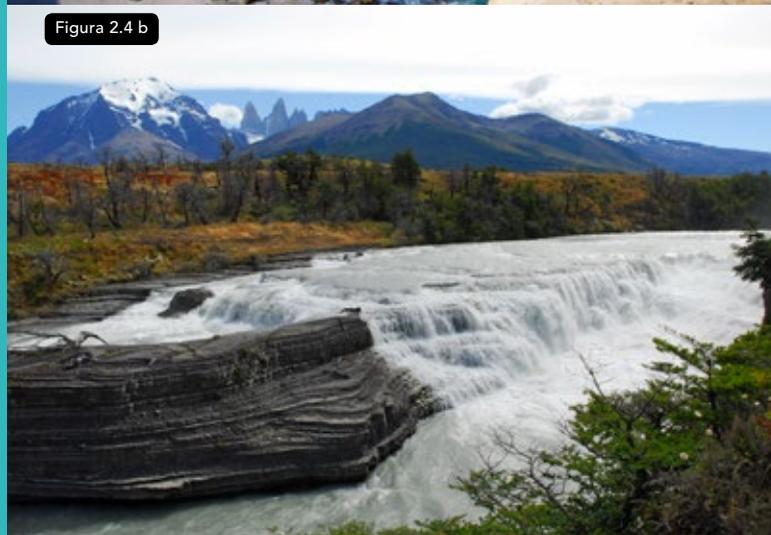


Figura 2.4 b

Figura 2.5:

Dentro de esta rica variedad climática cabe destacar el clima tropical lluvioso de isla de Pascua y el clima polar del Territorio Chileno Antártico.

a) Rapa Nui. Tropical lluvioso.

b) Magallanes. Polar con nieves permanentes.



Figura 2.5 a



Figura 2.5 b

La parte más meridional del país (42° S a 55° S) es inhóspita debido a las duras condiciones climáticas y la compleja geomorfología. Esta zona presenta formaciones vegetales en sectores casi impenetrables, de difícil manejo y suelos poco aptos para la agricultura, lo que dificulta su explotación y limita el asentamiento permanente de la población. La excepción es la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, conocida como la Patagonia Chilena, en donde se da una ganadería ovina a gran escala y una explotación petrolera de orden menor. Estas características causan que la población se encuentre dispersa en pequeños núcleos, y solamente Coyhaique y Punta Arenas constituyan centros urbanos de consideración. En su conjunto, esta zona alcanza al 1.7 % de la población nacional.

2.3 CLIMATOLOGÍA

La climatología es la ciencia de la Tierra que estudia el clima y sus variaciones a lo largo del tiempo. El clima, por su parte, es la descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medios y variabilidad de cantidades, como la temperatura, la precipitación, el viento y la presión atmosférica. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el período normal para la estimación del clima en una localidad es de 30 años.

En Chile, el clima tiene su origen en procesos que se desarrollan en la extensa superficie oceánica que enfrenta, por lo que se debe poner especial atención en el funcionamiento del sistema océano-atmósfera.

A lo largo de sus 4270 km, diferentes climas caracterizan a Chile y lo hacen único en cuanto a la variedad que presenta (Figura 2.4).

2.3.1 Climatología entre Arica a Coquimbo

En la zona norte del país, el clima se caracteriza por la presencia del anticiclón oriental del Pacífico sur (APS), entre 20° S a 40° S y 80° W a 100° W. En esta región predominan las altas presiones superficiales con valores en torno a 1028 hPa en el verano que descienden en el período invernal. El centro de este sistema, se desplaza entre los 35° S en el período cálido y entre 25° S a 30° S, en otoño e invierno. La presencia del APS ha conformado el desierto más árido del mundo, ya que impide la llegada hacia dicho sector de ciclones con lluvias, las que solo ocasionalmente llegan en invierno.

El APS es un centro de altas presiones, presente en el Pacífico sur. Su masa de aire es tropical marítima y presenta lentos desplazamientos estacionales en latitud. En invierno, su margen definido en la isóbara 1017 hPa bordea el territorio desde los 40° S al norte y desplaza hacia el interior la baja térmica mencionada. Durante el verano, se desplaza al sur, desviando la trayectoria de las depresiones hacia el paralelo 50° S.

En la costa chilena, el APS no produce grandes perturbaciones y generalmente trae buen tiempo. En verano, en la zona central, origina una fuerte circulación de viento desde el suroeste y días, generalmente, asoleados. Estos antecedentes permiten asegurar que entre Arica y Coquimbo el clima es muy regular a lo largo del año.

2.3.2 Climatología entre Coquimbo al Golfo de Penas

El sector comprendido entre Coquimbo y la isla Mocha es afectado por fuertes vientos del suroeste entre octubre y marzo, que suelen alcanzar hasta 35 nudos en la tarde y ocasionar marejadas locales. Estos vientos que soplan del mar a la tierra, se deben a una fuerte absorción calórica en el continente durante las primeras horas de la mañana. Desde mayo a septiembre, el sector es afectado por depresiones migratorias, cuya mayor frecuencia ocurre entre junio y agosto.

Por su parte, las condiciones climáticas entre el canal Chacao y el golfo de Penas son menos benignas que en las zonas norte y centro, debido a que esta región de bajas presiones se sitúa al sur del APS. El sistema isobárico oscila latitudinalmente durante las estaciones del año, siguiendo el movimiento estacional del Sol. El predominio anticiclónico alcanza su posición más austral entre enero a febrero y su posición más septentrional entre julio y agosto. Esta zona está afectada, a menudo, por las perturbaciones atmosféricas que se desplazan hacia el este, con violentos temporales de invierno que pueden también ocurrir en las otras estaciones. Las áreas de ma-

yor frecuencia de temporales se encuentran distantes de la costa.

Las precipitaciones son extremadamente variables a medida que se avanza hacia el sur, alcanzando en Valdivia a más de 2700 mm anuales. La mayoría de los lugares de la costa continental y de las islas situadas al sur del canal Chacao reciben más de 2000 mm de agua caída durante el año. Dada la naturaleza montañosa de esta costa, las cantidades de agua caída durante el año difieren considerablemente de un punto a otro. Por ejemplo, en isla Guafo llueve alrededor de tres días de cada cuatro, y su media anual es de solo 1500 mm, mientras que en Melinka llueve uno de cada dos días.

Se puede decir que en esta región se perciben dos estaciones: verano e invierno. El verano comienza usualmente en septiembre, con vientos reinantes del noroeste que en invierno empiezan a rolar al suroeste. En verano, las horas de luz son más prolongadas y el Sol rompe algunas veces la nubosidad. Durante los meses de diciembre, enero y febrero, dominan los vientos intensos del suroeste. El cielo no llega a despejarse del todo, lo que ocurre solo en los días de calma. Las lluvias en esta estación son frecuentes y se presentan bajo la forma de fuertes y copiosos chubascos. A medida que se aproxima el invierno, los vientos se hacen persistentes del cuarto cuadrante, acompañados de lluvias torrenciales y mangas de granizo tan espesas que oscurecen la atmósfera.

2.3.3 Climatología entre el Golfo de Penas hasta Cabo de Hornos

En la región patagónica, el verano abarca de octubre a marzo y el invierno, de abril a septiembre. La época más serena del año ocurre entre febrero y abril, cuando soplan los vientos del tercer y cuarto cuadrantes, con algunos intervalos de calma que suelen prolongarse de tres a cuatro días. Ocasionalmente, se dejan sentir también vientos del segundo cuadrante, que rara vez alcanzan gran intensidad. En mayo suelen observarse ma-

ESCALA DE VIENTO BEAUFORT				
Fuerza	Velocidad del viento (nudos)	Estado del mar	Símbolo	Aspecto del mar
0	0	Calma	○	Mar como un espejo.
1	1 - 3	Llana	—○	Rizos como escamas de pescado, pero sin espuma.
2	4 - 6	Rizada	—○	Olas pequeñas. Crestas comienzan a romper. Escasos rizos.
3	7 - 10			
4	11 - 16	Marejadilla	—○	Pequeñas olas creciendo, cabrilleo numeroso y frecuente de las olas.
5	17 - 21	Marejada	—○	Olas moderadas aumentan en forma. Rizos blancos en aumento. Aparecen rocciones.
6	22 - 27	Gruesa	—○	Olas moderadas aumentan en forma. Rizos blancos en aumento. Aparecen rocciones.
7	28 - 33	Muy gruesa	—○	Olas se amontonan. La espuma de crestas que rompen fluyen elevadas por el viento.
8	34 - 40	Arbolada	—○	Olas de altura media y mayor longitud. Rociones se desprenden de las olas en la dirección del viento.
9	41 - 47	Arbolada alta	—○	Olas altas. Crestas comienzan a enrollarse. Gran cantidad de rocciones reducen la visibilidad.
10	48 - 55	Montañosa	—○	Olas muy altas, con crestas colgantes en aumento. La visibilidad es aún más reducida.
11	56 - 63	Confusa	—○	Olas excepcionalmente altas. Mar cubierto de espuma blanca en forma de parches. La visibilidad se reduce más aún.
12	64 +	Huracanado	—○	El aire está lleno de espuma y rocciones. El mar está completamente blanco debido a bancos de espuma, la visibilidad es muy reducida.

Figura 2.6

Figura 2.6:

Escala de vientos de Beaufort.
(Elaboración propia).

Figura 2.7:

Representación fotográfica de la escala Beaufort. Las fotografías muestran diversas condiciones del mar que resultan cuando el viento ha estado soplando desde una misma dirección durante un tiempo relativamente prolongado sobre un *fetch* suficientemente largo. La profundidad también afecta la apariencia del mar, las olas que corren sobre bajas profundidades son más agudas y propensas a quebrarse, lo que puede inducir a sobrestimar la velocidad del viento. El criterio del mar está concebido solo para aguas profundas.

(Extracto de la Carta SHOA N° 3 Estado del Mar y Escala Beaufort).

**Figura 2.7**

rejadas fuertes, originadas por los temporales que se desarrollan en altamar. En mayo y junio caen las primeras nieves, que continúan durante todo el invierno. Las nevadas son a veces muy espesas, hasta el punto de no permitir mayor visibilidad. El paisaje cambia progresivamente, desde el verdor del verano a un manto de nieve que puede extenderse hasta la cima de las montañas en invierno. En la parte norte de la región, la línea de nieves perpetuas se encuentra normalmente a los 1100 m de altitud, bajando a unos 800 m en su parte sur. Con la entrada del verano, desaparece gradualmente la nieve, lo que produce el aumento del caudal de los arroyos y torrentes que drenan las cuencas. Los mejores meses son septiembre, por sus calmas y vientos del este, y diciembre por sus días largos y despejados. El mal tiempo parece ser el estado normal de la región, que se interrumpe transitoriamente con episodios de buen tiempo.

Entre el golfo de Penas y la boca occidental del estrecho de Magallanes, los vientos del norte y sur disminuyen en frecuencia. En las aguas interiores, los vientos tienden a soplar a lo largo de los canales debido a la topografía, en tanto que las costas están más expuestas a los vientos dominantes. El efecto de la orografía sobre el patrón local del viento es importante en la zona austral de Chile, dado que este tiende a aumentar su velocidad siguiendo la dirección de los senos, esteros, canales y valles. Los chubascos asociados a estos vientos se conocen con el nombre de *williwaws*.

El mejor tiempo entre el golfo de Penas y los islotes Evangelistas es cuando los vientos soplan del noreste. Los peores vientos, en contraste, son los del noroeste; pues forman olas hasta de 8 m de altura en la fachada costera que da al océano, que subsisten varios días hasta que el viento que sopla rola. Los temporales más frecuentes en estas costas y archipiélagos son los del no-

roeste, oeste y este, que duran mucho tiempo y generan mar arbolada, descrita en la fuerza 8 de la Figura 2.6.

El extremo austral se encuentra situado en las vecindades del frente polar, bajo la influencia de la corriente del Cabo de Hornos, que contribuye a mantener una uniformidad climática característica de las zonas heladas del globo. La mayoría de las depresiones que afectan la región se forman entre los paralelos 50° S y 55° S, se desplazan hacia el este y frecuentemente impactan en el territorio austral.

2.4 OCEANOGRAFÍA

La oceanografía es la ciencia que estudia los mares y los océanos preferentemente desde los puntos de vista físico, químico, biológico y geológico. Desde el prisma físico, en el océano se presentan una gran cantidad de movimien-

tos a diferentes escalas temporales y espaciales; desde sistemas a escala planetaria, como las grandes corrientes oceánicas, hasta sistemas locales en las costas.

La oceanografía costera se restringe a un ámbito geográfico donde la acción de las mareas, el oleaje, el viento y las corrientes interactúan con formaciones geológicas de escala relativamente grande, como la plataforma continental, hasta sistemas de menor escala, como las bahías, los estuarios, las costas abiertas y los fiordos. Un lector interesado en la oceanografía a escala oceánica puede consultar textos clásicos como el de Stewart (2008).

2.4.1 Corrientes oceánicas

El litoral de Chile enfrenta al océano más grande del planeta, en el área geográfica denominada Pacífico suroccidental. Desde los primeros

trabajos efectuados en la década de los treinta y posteriores (Gunther, 1936; Wooster y Sievers, 1970; Konow, 1976; entre otros.) hasta las más recientes investigaciones, se han identificado distintas zonas frente al litoral de nuestro país. Entre ellas destaca, la denominada zona norte subtropical, que se extiende entre el límite marítimo con Perú y el área de la convergencia subtropical, ubicada en la latitud 30° S, a la altura de Coquimbo. Inmediatamente al sur, se encuentra la zona central transicional, la cual abarca desde la Convergencia Subtropical hasta aproximadamente los 43° S, en donde se hace sentir con mayor intensidad la penetración de la corriente de Deriva del Oeste, dando origen a la corriente de Humboldt. Más al sur, se encuentra la zona sur-antártica, la cual se extiende desde los 43° S hasta la región de influencia de la corriente del Cabo de Hornos, alcanzando la convergencia antártica o frente polar. Finalmente, la zona antártica comprende las aguas situadas al sur de la Convergencia Antártica, en el denominado océano Austral, y que circunda el Territorio Chileno Antártico.

En la región norte del país, el movimiento de las aguas oceánicas se caracteriza por un complejo sistema de corrientes superficiales, constituido por la corriente oceánica de Humboldt hacia el norte, seguida por un flujo intermedio, en dirección sur, conocido como la contracorriente de Perú-Chile, y la corriente costera de Humboldt hacia el norte (Figura 2.8). La costa central aparece dominada por un sistema de corrientes y contracorrientes que fluyen paralelas a la costa, interactuando en forma compleja. La zona sur subantártica es poco conocida. Una de las caracte-

rísticas más importantes de la circulación en esta región, corresponde a la división de la corriente de la deriva del oeste a la altura de los 43° S. Este fenómeno, único en el hemisferio sur, es el resultado del bloqueo del continente americano a la libre circulación de la deriva del oeste. En el extremo sur, la corriente del Cabo de Hornos se desplaza al este hasta el meridiano de las islas Diego Ramírez, donde gira al noreste, apartándose así del cuerpo principal de la corriente antártica del océano Pacífico, para unirse con la corriente de las islas Malvinas.

Los límites de cada una de estas zonas varían de acuerdo con los cambios estacionales, lo que genera procesos activos de intercambio que hacen de este ambiente marino, un sistema altamente dinámico. Esta compleja interacción se evidencia en las zonas costeras. Es así, como la mayor o menor fuerza de penetración de aguas oceánicas, por ejemplo, modifica los procesos de surgencia costera. Por su parte, la mayor influencia de aguas subecuatoriales que se manifiesta con fuerza durante los años «Niño», produce grandes alteraciones en los regímenes de pluviosidad continental. Del mismo modo, el desarrollo y la persistencia de la corriente de Humboldt dependen de la fuerza con que la corriente de deriva del oeste llega al continente, y esto a su vez resulta en un fortalecimiento del giro anticiclónico causado por el centro de altas presiones situado frente a nuestras costas. Finalmente, la intensidad de los vientos procedentes del suroeste favorece la surgencia costera y determina las características del agua que asciende a la superficie, además de su duración temporal (Stewart, 2008).

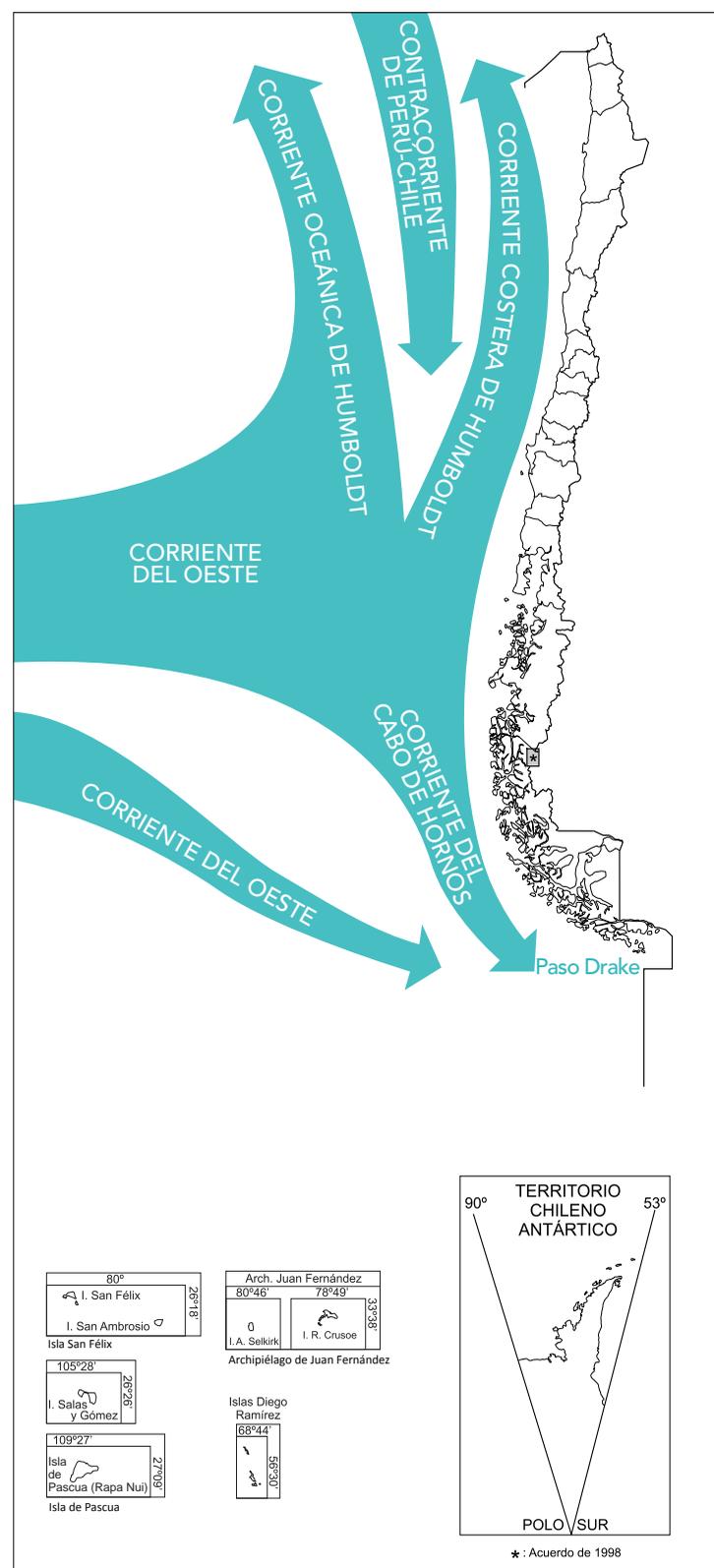


Figura 2.8

Figura 2.8:

Sistema de corrientes frente a las costas de Chile.

Abajo se ilustran los territorios insulares y antártico que obedecen a otros sistemas de circulación local.

Figura 2.9:

Se muestran diferentes instantes del ciclo mareal: en sicigia, en cuadratura y en un instante cualquiera.

Vista en planta de la Tierra mirada desde el polo sur.

Marea de sicigia: Cuando la Tierra, la Luna y el Sol están alineados (luna nueva o llena), se producen los mayores rangos de marea.

Marea de cuadratura: Cuando la Tierra, la Luna y el Sol están en ángulo recto (cuarto creciente y cuarto menguante), se producen los menores rangos de marea.

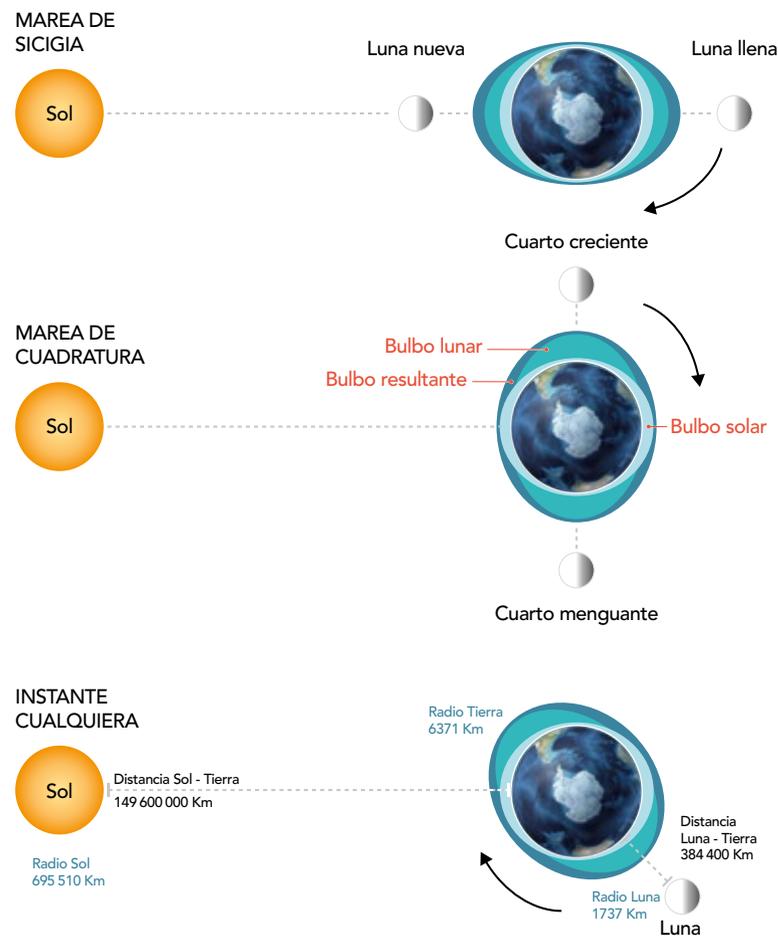


Figura 2.9

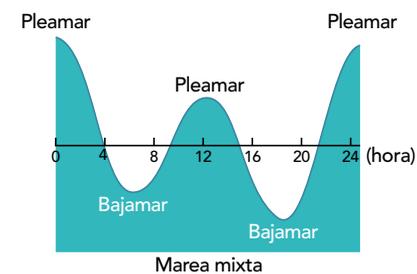
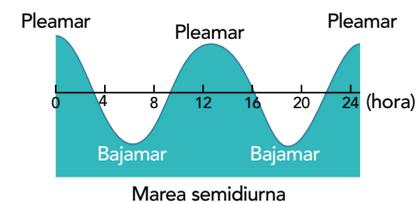
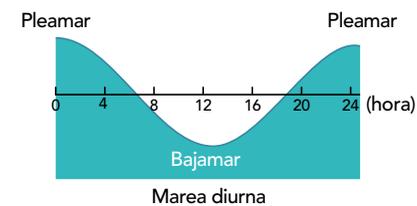


Figura 2.10

Figura 2.10:

Régimen de Marea:

La marea se clasifica en: diurna, semidiurna y mixta y tiene un período de 12.42 horas.

(SHOA, 2002).

2.4.2 Marea astronómica

Las mareas son el resultado del balance entre la atracción gravitacional de la Tierra, la Luna, el Sol y la fuerza centrípeta que experimentan dichos cuerpos durante su trayectoria. Debido a su proximidad y a pesar de su masa, la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la Luna es del orden de 2 a 2.5 veces la que genera el Sol y, por lo tanto, domina en la formación de mareas. Cuando la Tierra, el Sol y la Luna están alineados –lo que se conoce como marea de sicigia– el rango de marea es mayor (Figura 2.9). Por el contrario, cuando estos cuerpos celestes se encuentran formando un ángulo recto, se genera una **marea de cuadratura**, con los menores rangos de marea durante un mes lunar.

Una de las clasificaciones de la marea más utilizada, corresponde a su caracterización según el número de pleamars y bajamars que ocurren durante el día, y la diferencia de altura entre pleamars y bajamars consecutivos. Es así como la marea se

clasifica en diurna, semidiurna y mixta (Figura 2.10). En la marea diurna se produce una sola pleamar y una sola bajamar cada día, durante la mayor parte del mes. En la marea semidiurna se producen dos pleamars y dos bajamars cada día con una desigualdad relativamente pequeña entre las alturas. La marea mixta se caracteriza por presentar una desigualdad manifiesta entre las alturas de las pleamars y/o bajamars consecutivos. Este tipo de mareas se da en la mayoría de las cuencas oceánicas del mundo, incluyendo la costa continental de Chile (SHOA, 2002).

El régimen de marea está definido, entre muchas otras variables, por el tamaño y la forma de las diversas cuencas oceánicas y la latitud. Cada océano, golfo y mar interior tienen su propio régimen de marea, presentando rangos de marea, presentando rangos de entre una decena de centímetros y varios metros, según el lugar geográfico. Los rangos de marea son altos únicamente donde las mareas entran en un cuerpo de agua semicerrado (golfo o mar interior), que tiene la forma y profundidad para entrar en resonancia con la marea.

El rango de marea más grande en el mundo, de aproximadamente 17 m, tiene lugar en la bahía de Fundy, en Canadá. En contraste, mares interiores como el Mediterráneo, el mar Negro y el mar Báltico, experimentan rangos menores. En las costas continentales del Atlántico, Pacífico e Índico, se manifiestan mareas cuyo rango usualmente no supera los 2 m. Los golfos y ensenadas tienen en general rangos típicos de entre 2 y 4 m, producto de la amplificación local. Esta condición se encuentra en el golfo de Tailandia, en la Europa Occidental, en Indonesia, en China, en la costa Pacífica de Panamá y en la desembocadura del Amazonas. Mareas de rango mayor a 4 m se limitan a zonas excepcionales, como el canal de la Mancha, el sur de China, Australia noroccidental, el sector oriental del estrecho de Magallanes y el mar interior de Chiloé.

Las mareas pueden generar corrientes mareales periódicas. Las corrientes más fuertes se desarrollan en canales estrechos que comunican cuencas marinas, donde son capaces de generar erosión y formar profundos cauces submarinos. Bajo ciertas condiciones, las corrientes mareales transportan el sedimento a profundidades mayores que las asociadas al transporte generado por el oleaje.

2.4.2.1 LAS MAREAS EN CHILE

La marea es uno de los fenómenos de la oceanografía física más interesantes y fáciles de percibir. En general, las observaciones de la marea, se efectúan en estaciones de nivel del mar instaladas en sectores costeros. En

nuestro país, a partir del año 1941 el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) inició la instalación de la red mareográfica chilena con el objetivo de registrar metódica y permanentemente las variaciones experimentadas por la superficie del mar a lo largo del territorio nacional. Al año 2019, esta red está integrada por 45 estaciones de nivel del mar y cuenta con capacidades que la constituyen en un ejemplo a nivel mundial (Figura 2.19).

Chile posee costas en los continentes Americano y Antártico, contando además con numerosas islas adentradas en el océano Pacífico que le confieren su carácter de tricontinentalidad. En este vasto territorio, el litoral presenta diversas formaciones geomorfológicas que provocan que las mareas, exhiban características singulares que dependerán del sector por el cual se propagan.

En general, la onda de marea en el océano abierto es de carácter semidiurno, con rangos del orden de decímetros. Por ejemplo, en las islas oceánicas, el rango durante la sicigia alcanza valores de 0.75 m en Rapa Nui y 0.93 m en isla San Félix durante la sicigia. La onda de marea es modificada en la plataforma continental, proceso que se intensifica en las proximidades de la costa debido al asombramiento, la refracción y a la fricción que genera el fondo (Pugh, 2004). Entre Arica y el cabo de Hornos, la marea se propaga de norte a sur, como consecuencia de la oscilación en torno a un punto anfodrómico particular ubicado en las cercanías de Rapa Nui. Esto significa que en general, la pleamar o bajamar se produ-

ce primero en Arica que en muchas otras localidades expuestas a mar abierto y ubicadas más al sur. El rango que exhibe la marea en las costas expuestas al océano Pacífico fluctúa entre 1 y 2 m, cuyo límite superior es ligeramente excedido en conchadas localidades durante las sicigias.

Al sur del paralelo 42° S, la onda de marea se propaga a través de numerosos canales que conectan el océano Pacífico con las aguas interiores. En estos ambientes someros y en particular en zonas estuarinas, la onda de marea es deformada, exhibiendo llenantes y vaciantes de diferente duración, al igual que amplificación o disminución del rango de la marea. Asimismo, durante episodios de mal tiempo, la marea puede ser alterada por factores meteorológicos debidos a los fuertes vientos y a las variaciones en la presión atmosférica que perturban la superficie del mar (marea meteorológica), generando cambios en la altura y hora.

En el mar interior de Chiloé, la marea tiene rangos moderados. Destaca el caso donde esta ingresa con un pequeño desfase a través del canal Chacao y la boca del Guafo, resultando una significativa alteración del rango de la marea, cuya magnitud depende de las condiciones locales. Así, en Quellón se tiene un rango de marea de 5.00 m, el que se incrementa a 6.18 m en caleta Ayacara, golfo de Ancud y a 6.50 m en Puerto Montt, seno Reloncaví. Al sur de la boca del Guafo, se presenta una menor amplificación del **rango de marea** con 3.12 m en caleta Cuptana, en el canal Moraleda, en tanto que en puerto Lagunas, al sur de la constricción-umbral de Meninea, se experimentan rangos del orden de 2.50 m (Fierro *et al.*, 2000).

Otro sector en el cual se producen alteraciones significativas de la marea es el estrecho de Magallanes, donde en la boca occidental se experimentan rangos de marea de 1.80 m (bahía Tuesday, en tanto que en la boca oriental alcanza 10.37 m (banco Dirección, debido a la distorsión que experimenta la marea oceánica sobre la plataforma continental del océano Atlántico. Esta gran diferencia genera un transporte periódico de grandes masas de agua del océano al estrecho de Magallanes y viceversa, lo que da origen a las grandes corrientes en esta zona.

En el océano Austral se aprecia en general una propagación de la marea en dirección al oeste, la que es condicionada por lo angosto del paso Drake entre Sudamérica y la Península Antártica. En el Territorio Chileno Antártico y particularmente a lo largo de la Península de O'Higgins, la marea ocurre con pequeñas diferencias de tiempo y similares rangos de marea.

El disímil comportamiento de la onda de marea en las costas chilenas se aprecia en las curvas en diferentes localidades costeras (Figura 2.11). En las costas abiertas, la marea se presenta mayoritariamente con un régimen mixto. Sin embargo, también existen localidades con régimen semidiurno puro, y sectores de altas latitudes en la península antártica donde se presentan mareas diurnas.

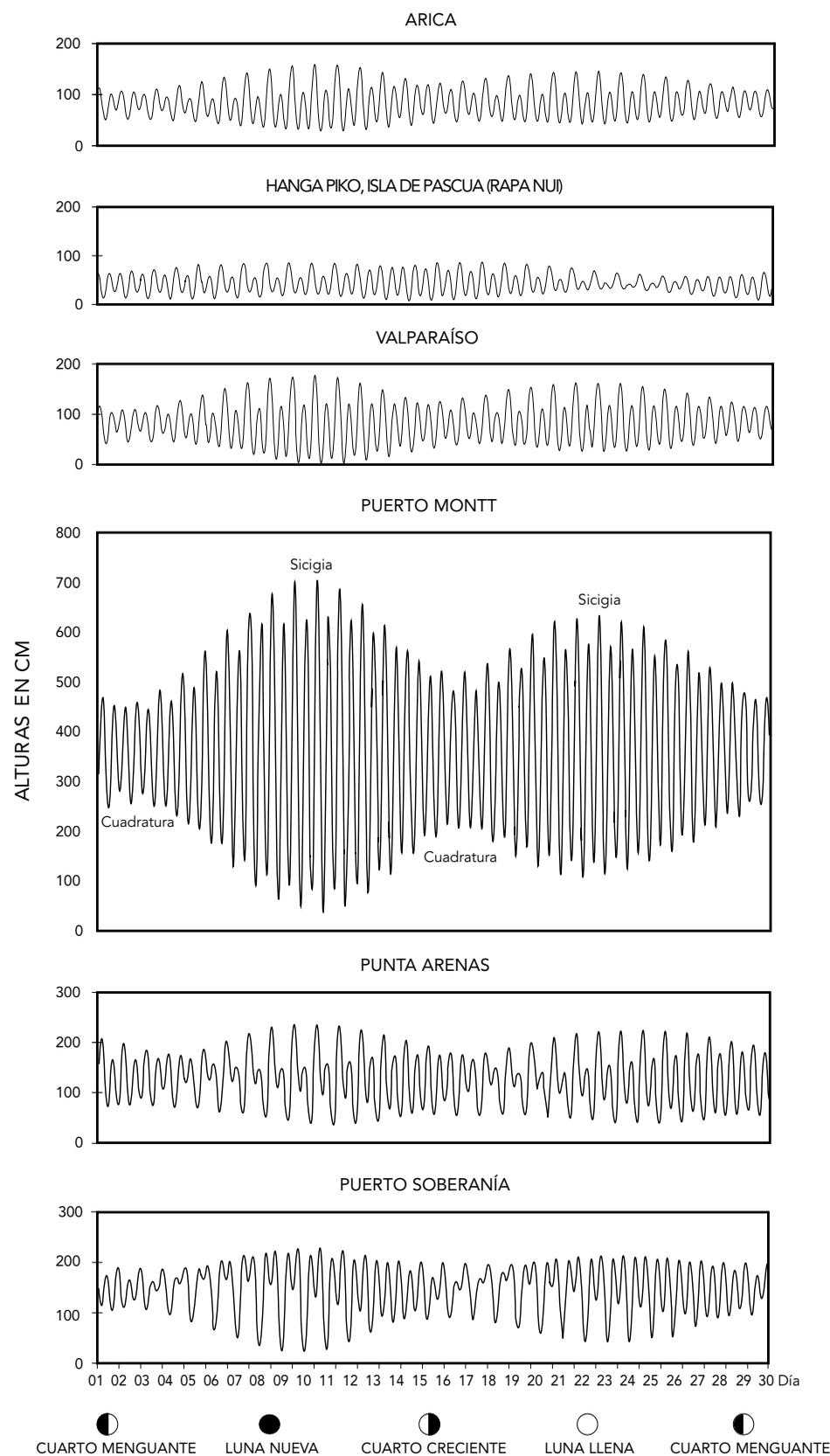


Figura 2.11:

Curvas de marea representativas del territorio chileno. El valor en el eje de la vertical corresponde al Nivel de Reducción de Sondas (NRS).

(Fuente: Pub. SHOA 3009 Tablas de Marea de la Costa de Chile).

Figura 2.11

2.4.2.2 CORRIENTES DE MAREA

El ascenso y descenso periódico de la superficie del mar genera movimientos horizontales de las masas de agua, los que se conocen como corrientes de marea. Estas corrientes usualmente exhiben gran variabilidad espacial, pues, son muy sensibles a los cambios en la batimetría del lugar y a la interacción con la zona costera.

Las corrientes de marea en una bahía abierta al océano, son inferiores a 1 m/s y su dirección va cambiando según las fases de esta (pleamar, vaciante, bajamar y llenante). Este comportamiento da origen a lo que se conoce como corrientes rotatorias. Por el contrario, en los canales, angosturas y estrechos de las zonas sur y austral, se producen corrientes reversibles que tiran en un sentido durante la fase de flujo y en sentido opuesto durante el reflujo, pasando por instantes en que es nula y cambia de dirección, lo que se conoce como la **estoa**. Estas corrientes pueden alcanzar gran intensidad producto de angosturas existentes, o bien como consecuencia de los diferentes niveles de la marea existentes en ambos extremos de un canal.

En lugares como el canal Chacao, las corrientes de marea son muy intensas, variando desde los 2 nudos en su boca occidental hasta 9 nudos en roca Remolinos durante la sicigia equinoccial (Figura 2.13). A pesar de que la relación entre la corriente y la marea varía de un lugar a otro, por lo general ocurren cuatro estoas y cuatro intensidades máximas de la corriente cada día, con un tiempo entre dos estoas consecutivas de 6.21 horas. En esta importante ruta de navegación, la corriente de reflujo se dirige al océano y la de flujo lo hace hacia el mar

interior de Chiloé. Intercaladas entre ellas, la estoa dura breves minutos y en la práctica es casi imperceptible, particularmente durante los días de sicigia. Por el contrario, su duración se incrementa durante las cuadraturas.

El estrecho de Magallanes es otro sector de alto tráfico marítimo donde se experimentan corrientes intensas. A lo largo de este accidente geográfico las corrientes son ocasionadas principalmente por la marea, e influenciadas por los vientos dominantes del oeste. En la región occidental del estre-

cho, las corrientes mareales son de media o baja intensidad, siguiendo la dirección del canal, excepto en la entrada de algunas bahías y canales transversales. En la región oriental del estrecho de Magallanes, las corrientes de marea presentan gran variabilidad en su dirección e intensidad, y son condicionadas por el ancho del estrecho, la orientación del canal o angostura de interés y la conformación de la costa. Aunado a lo anterior, es importante destacar los diferentes rangos de la marea y el progresivo retardo en la ocurrencia de las pleamares y bajamares, a medida que la onda de marea progresa desde punta Dungeness hacia Punta Arenas.

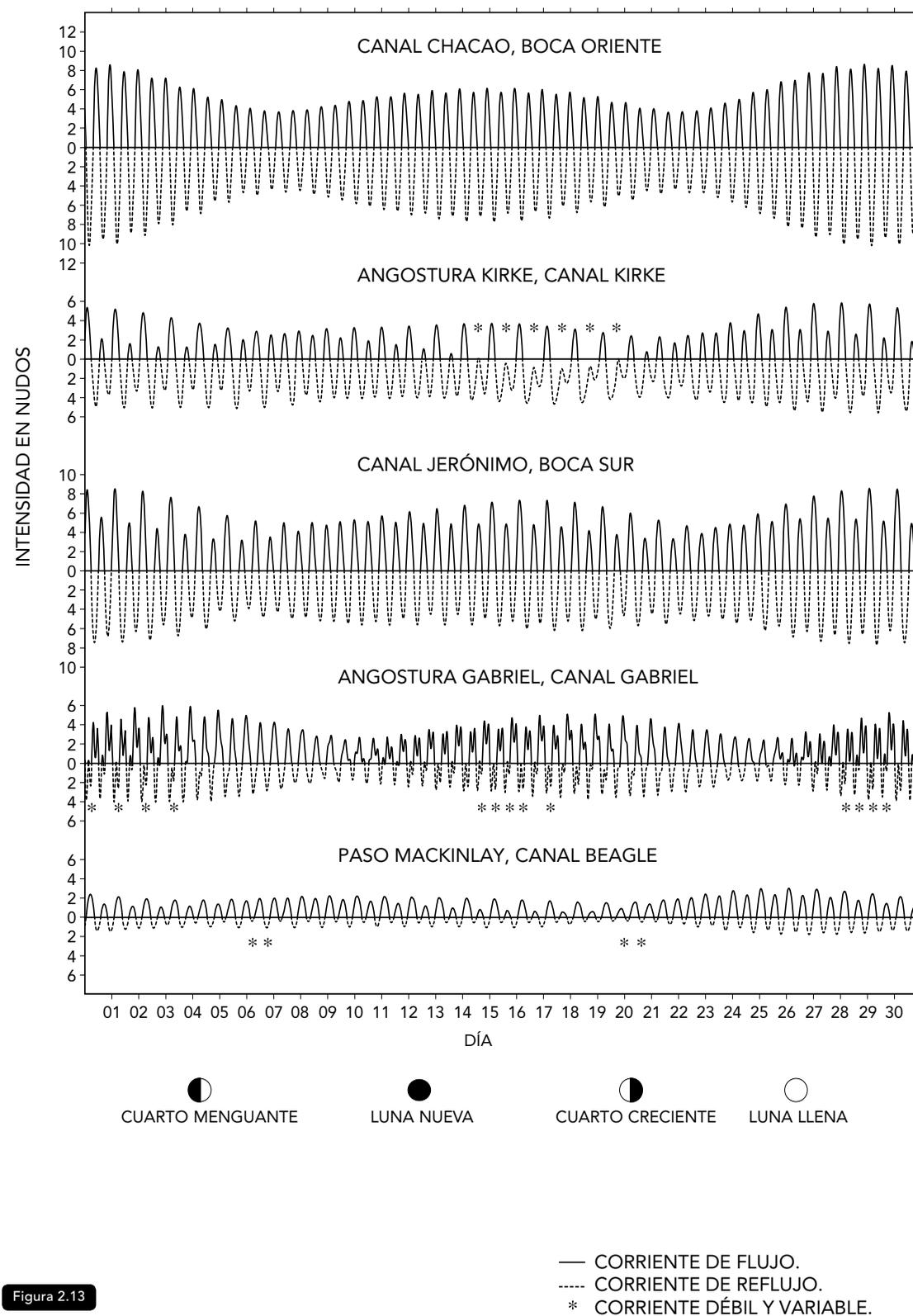
A su vez, mediciones de corrientes llevadas a cabo en la boca oeste de la Primera Angostura, permiten establecer que la corriente de flujo fluye hacia el SSW con una intensidad máxima de 7 nudos, en tanto que la corriente de reflujo tira en dirección NNE, alcanzando en sicigia una intensidad máxima de 8 nudos. Se destaca que las estoas no se producen simultáneamente con la ocurrencia de la pleamar y bajamar, en tanto que



Figura 2.12

Figura 2.12: Dalcahue durante la bajamar, Región de Los Lagos.

(Foto: Banco audiovisual de Sernatur).



las horas de máximo flujo y reflujó, se originan con un retardo de media a dos horas en relación a las fases de pleamar y bajamar de Punta Delgada. Este retardo se origina en el mayor rango de marea que se presenta en la boca oriental, respecto a la boca occidental de la Primera Angostura. En ambas angosturas del sector oriental, la corriente fluye en la dirección del eje del canal, en tanto que al salir de ellas, las líneas de flujo se expanden y se extienden por toda la zona de ensanche que se presenta, generándose incluso corrientes divergentes de dirección oblicua al eje del canal. Esto es de gran importancia para la navegación, por cuanto provoca que un buque que sale de una angostura pueda ser arrastrado hacia los bancos vecinos situados a cada lado.

2.4.3 Marea meteorológica y meteotsunamis

El fenómeno de la marea meteorológica (*storm surge*) ocurre durante los temporales, que traen asociados campos de baja presión atmosférica y vientos fuertes (Figura 2.14). En la literatura, se suele separar el aumento del nivel del mar por presión atmosférica (*barometric set-up*), de la sobre elevación por viento (*wind set-up*), generada por el esfuerzo de corte de este sobre la interfaz agua-aire.



Figura 2.14

Figura 2.14:

Marea meteorológica en Montemar, Viña del Mar.

(Fotos: Gentileza de Mauricio Molina Pereira).

El cambio del nivel del mar se produce por la variación de la presión atmosférica con respecto a su valor medio y puede cuantificarse mediante la expresión del barómetro invertido; que dice que si existe un incremento de 1 mbar en la presión atmosférica, el nivel del mar desciende 1 cm. En contraste, un descenso de la presión atmosférica genera un aumento del nivel en la misma proporción. En las costas

chilenas, este efecto puede alcanzar del orden de 30 cm en una escala de horas durante el paso de una depresión. La sobreelevación por viento se puede estimar mediante formulaciones empíricas o modelos numéricos de uso común en ingeniería marítima. En general, su efecto en Chile es del orden de pocas decenas de centímetros debido a que nuestra plataforma continental es relativamente profunda.

La marea meteorológica puede ocurrir de manera conjunta con un meteotsunami, que corresponde a un aumento del nivel del mar, producido por variaciones de presión y rachas de viento en una escala temporal de entre 5 a 120 minutos. Este fenómeno se produce con frecuencia y ocurre a nivel mundial; pero, su conocimiento y estudio es insuficiente. Un ejemplo del primer meteotsunami reportado en las costas de Chile se presenta en la Figura 2.15 (Carvajal et al., 2017). El evento ocurrido el 8 de agosto de 2015 alcanzó alrededor del metro de amplitud en la zona central de Chile y afectó incluso a puertos peruanos.



• Meteotsunamis reportados previamente
 ◻ Meteotsunamis reportados en este estudio

— Camino de tormenta
 Δ Isla Robinson Crusoe

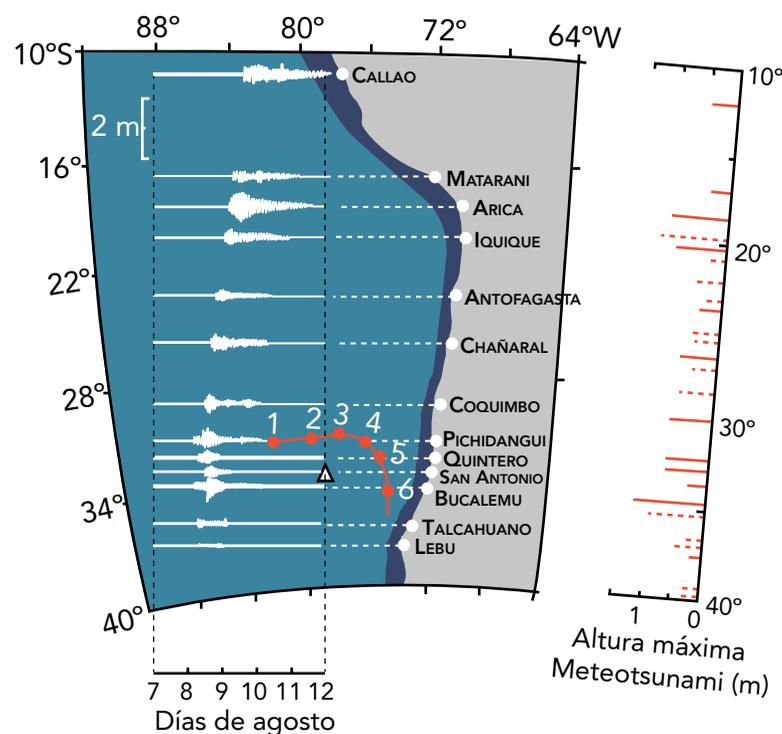


Figura 2.15

Figura 2.15:

Ejemplo del primer meteotsunami reportado en las costas de Chile, ocurrido el 8 de agosto de 2015 en la Zona Central.

(Adaptado de Carvajal et al., 2017).

2.4.4 Oleaje

El oleaje es el principal agente modelador de los procesos litorales en las costas abiertas entre Arica y la isla de Chiloé. En el mar interior de la zona de los fiordos, en contraste, estos procesos están dominados por las mareas, las corrientes, los vientos y las descargas de ríos de gran caudal. El comportamiento medio del oleaje permite conocer los aspectos de operatividad y seguridad en la navegación, estimar la erosión costera y evaluar los efectos de las ondas de largo período en instalaciones portuarias. Los eventos extremos, por su parte, definen el diseño estructural de obras marítimas. El oleaje se caracteriza mediante parámetros estadísticos, como la altura, la dirección y el período, cuyo estudio se orienta a caracterizar las condiciones medias y extremas, denominadas clima de oleaje operacional y extremo, respectivamente, en una localidad específica.

En general, el oleaje medio frente a las costas chilenas proviene desde el suroeste y noroeste, y en menor medida desde el oeste. La altura significativa promedio varía entre 1.8 m para el extremo norte y alrededor de 4.0 m en el sur (Figura 2.16). Los períodos medios anuales se ubican entre 8 s en el sur y 10 s en el norte, lo que se explica por la distancia a las zonas de generación (dado que el período aumenta a medida que el oleaje envejece). En contraste, los eventos extremos, deno-

minados también marejadas, bravezas de mar o temporales, se caracterizan por olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica, que se propagan a las costas de Chile. Por ejemplo, en Valparaíso, las máximas alturas significativas han excedido los 8 m, con longitudes de entre 100 a 300 m. Algunas marejadas, generadas en el hemisferio norte durante el verano, se caracterizan por alturas bajas y períodos inusualmente largos, que promueven el sobrepaso de las defensas costeras.

Atlas de Oleaje de Chile

<https://oleaje.uv.cl/>

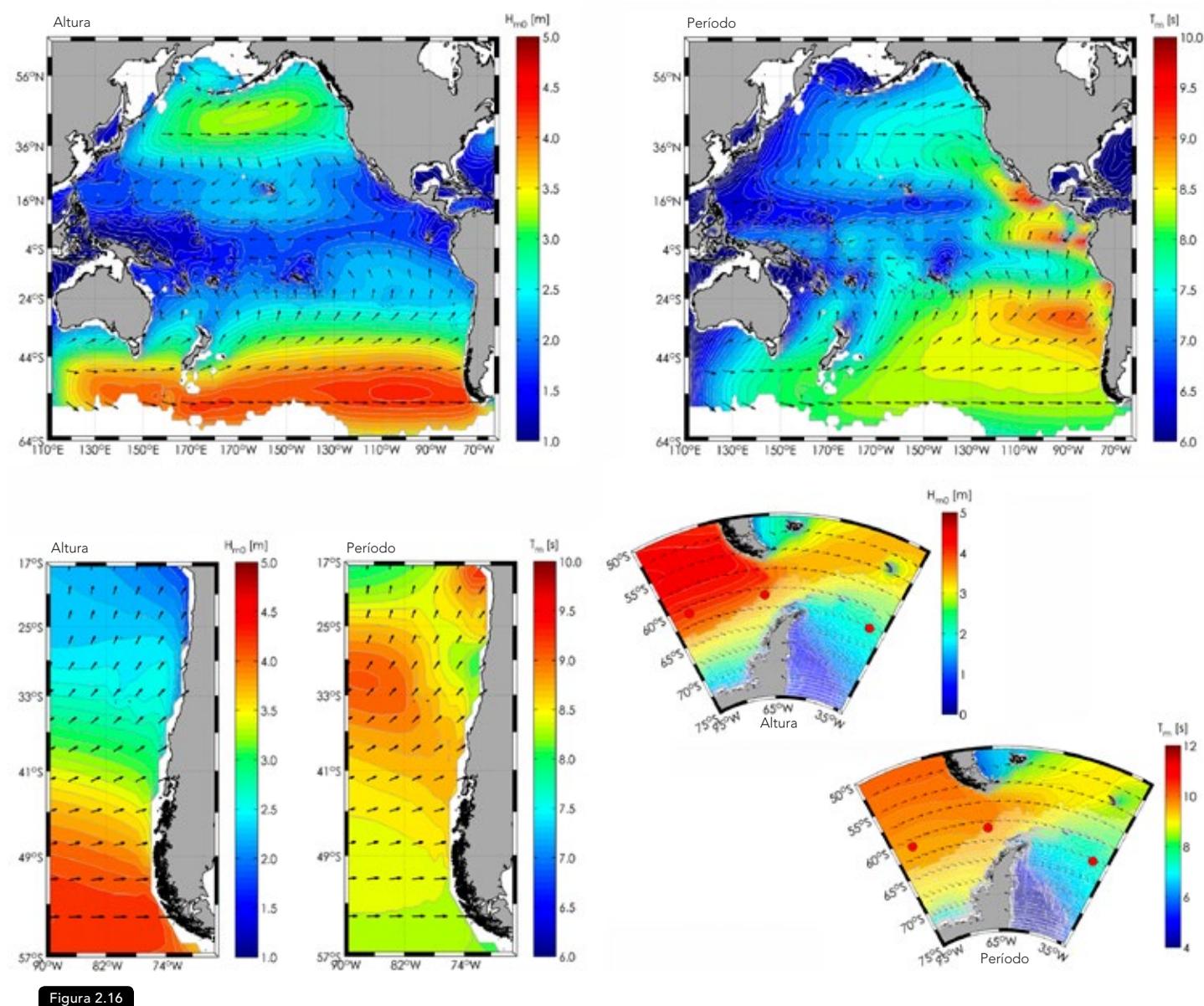


Figura 2.16:

Campos de altura (H_{m0}) y período (T_m) del oleaje en el Pacífico sur, frente a Chile y en el Territorio Chileno Antártico. Los valores corresponden a la media comprendida entre 1980 y 2015 y fueron obtenidos del Atlas de Oleaje de Chile, desarrollado por la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica (Beyá et al., 2016).

(Fuente: oleaje.uv.cl).

Figura 2.16

Los temporales de viento y lluvia (que generan marejadas) se presentan con mayor frecuencia que otras amenazas costeras como los terremotos y tsunamis. Según el registro de desastres naturales de EMDAT (2017), en Chile ocurrieron 103 eventos entre 1900 y 2016, de los cuales figuran 15 temporales que ocasionaron 273 víctimas fatales y afectaron a más de 500 000 personas. De esta forma, los temporales se posicionan como el tercer desastre natural más dañino, por sobre los incendios forestales, actividad volcánica, deslizamientos de tierra, sequías y sucesos de temperatura extrema. La tendencia muestra que las marejadas asociadas a dichos temporales aumentaron de un promedio de 5 eventos por año, a mediados del siglo pasado, a aproximadamente 20 eventos por año, en el siglo XXI frente a Valparaíso (Martínez *et al.*, 2018). Las marejadas tienen la capacidad de producir inundación de zonas costeras, erosión en playas, acantilados y efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas (Beyá *et al.*, 2013).

2.4.5 Tsunamis

Además de las olas formadas por el viento, existen otros tipos de oscilaciones, tales como los tsunamis. Este es un término japonés que designa ondas de largo período que tienen diversas causas. Su origen principal son los eventos sísmicos que, al liberar una gran energía, provocan una fuerte perturbación en la superficie oceánica. Sin embargo, cualquier fenómeno que introduzca gran cantidad de energía en el océano es capaz de generar un tsunami. Por ejemplo, pueden ser otras fuentes de generación,

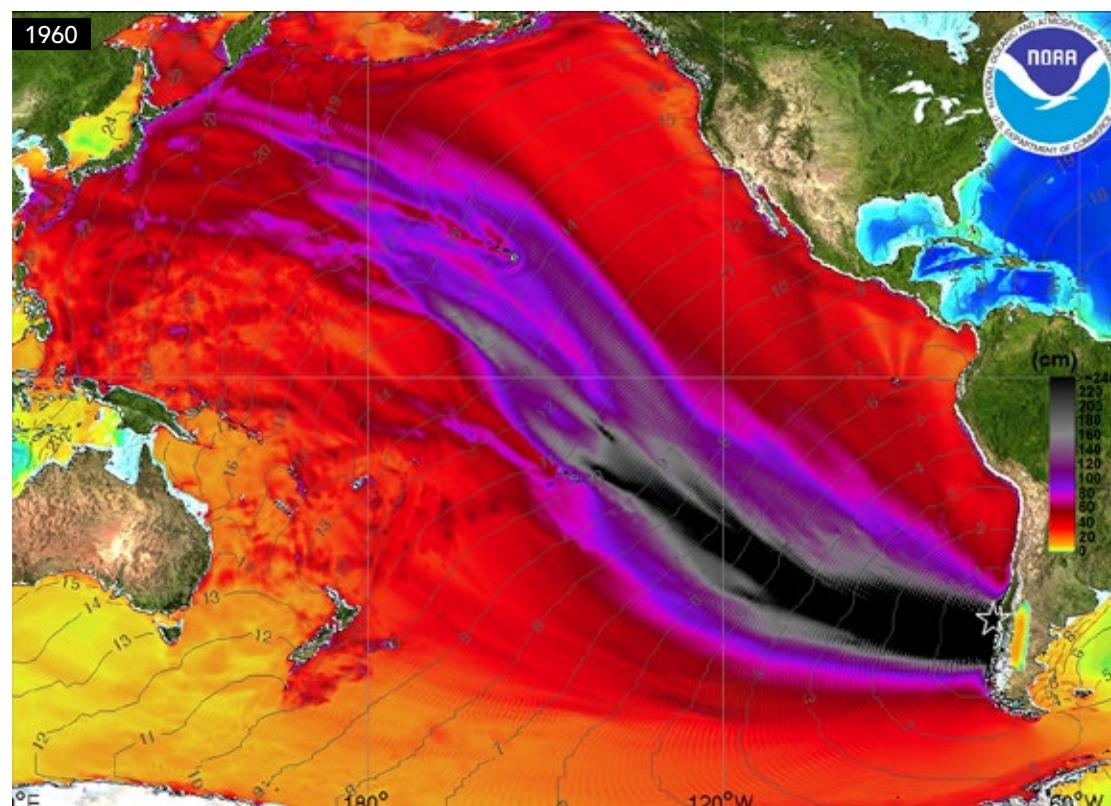


Figura 2.17 a

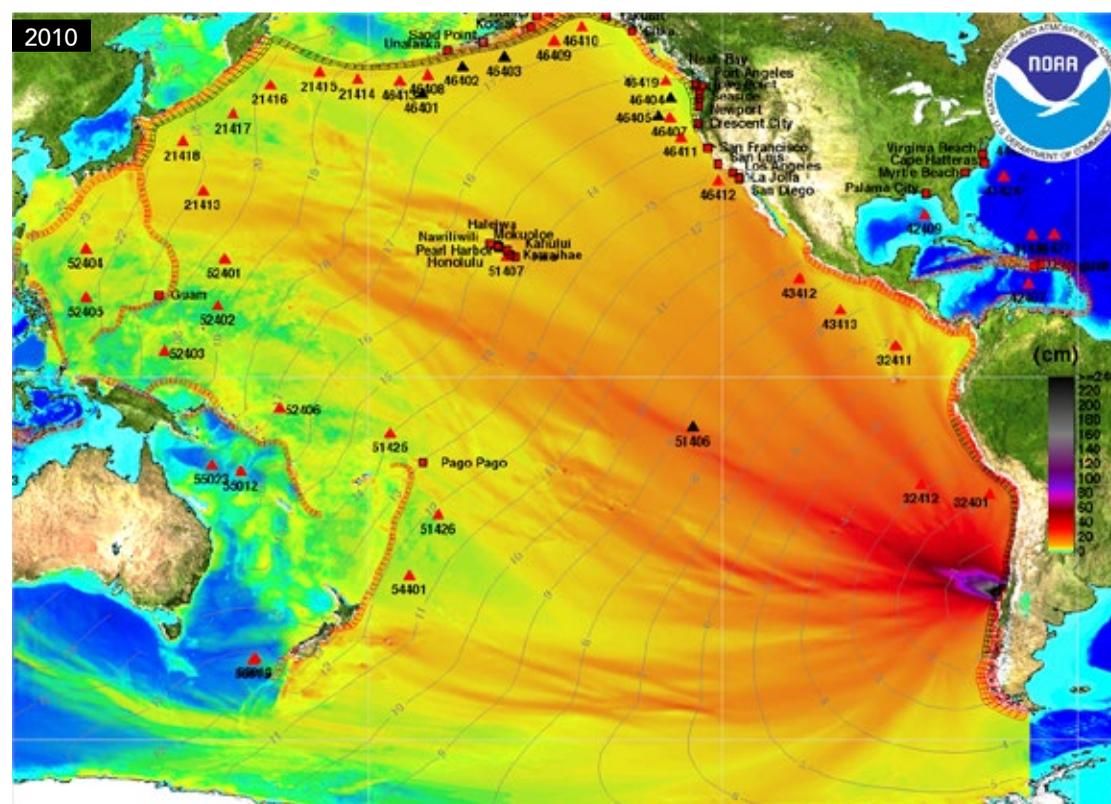


Figura 2.17 b

Figura 2.17:

Modelación numérica del tsunamis en el océano Pacífico.

a) Tsunami generado por el terremoto de magnitud 9.5 en Chile el 22 de mayo de 1960. Este terremoto es considerado el más grande registrado instrumentalmente.

b) Tsunami generado por el terremoto de magnitud 8.8 en Chile el 27 de febrero de 2010. En ambos casos, los colores representan las alturas máximas alcanzadas por el tsunami en el océano profundo. Las líneas isocronas muestran la posición del tsunami cada una hora desde la ocurrencia del terremoto.

(Fuente: National Weather Service, NOAA).

Figura 2.18:

Efectos del tsunami del 27 de febrero de 2010 en la ribera sur del río Maule, en Constitución. La fotografía fue tomada a 2 km aproximadamente de la costa oceánica.

(Foto: P. Winckler).



Figura 2.18

los desprendimientos de tierras (*landslide tsunamis*), una erupción volcánica submarina, las perturbaciones atmosféricas (*meteot-sunamis*) y la caída de un meteorito. Los tsunamis producidos por terremotos son capaces de viajar con baja altura y a velocidades cercanas a los 700 km/h en altamar. Al llegar a la zona litoral, la reducción en la profundidad desacelera al tsunami y aumenta su altura hasta varios metros, producto del asomeramiento.

Los tsunamis de origen tectónico son frecuentes en las costas de los océanos Pacífico e Índico debido a la alta sismicidad de sus márgenes activos de subducción. En cambio, las costas del océano Atlántico apenas han sufrido sus consecuencias, por predominar en ellas los márgenes pasivos. No obstante, fue notable el tsunami de 1755 que, junto a los estragos causados por el terremoto precedente, destruyó la ciudad de Lisboa en Portugal, y acabó con la vida de más de 50.000 personas.

En Chile existe una larga historia de tsunamis de origen tectónico (Figura 2.25), entre los que destacan eventos recientes como los generados por los terremotos del Maule en 2010, Illapel en 2014 e Iquique en 2015; también hay evidencia de grandes eventos, como los de 1868 y 1877, en la zona norte; 1922, en el Norte Chico; 1730, en el Chile central, y los de 1835 y 1960, en el Centro-Sur. Por otra parte, hay eventos mucho más locales como los generados por remociones en masa o desprendimiento de glaciares. Un ejemplo de los primeros ocurrió en abril de 2007, donde se produjo en el fiordo Aysén (Figura 1.10) un tsunami por remoción en masa (*landslide tsunami*), que causó la muerte de 10 personas (Sepúlveda & Serey, 2009). Estos eventos tienen la capacidad de propagarse por todo el océano (Figura 2.17) y generar grandes daños a las costas (Figura 2.18).

2.4.6 Nivel medio del mar

El nivel medio del mar (NMM) corresponde al plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea (SHOA, 2002). El NMM responde a una determinada situación en el tiempo y en el espacio, y evoluciona a corto y largo plazo dentro de un momento geológico dado. Se trata de un concepto relativo en el que se conjugan varios tipos de movimientos, tanto de los océanos como de la corteza terrestre, según se describen a continuación:

- **Variaciones de largo plazo**, originadas por las variaciones en el volumen total del océano por la expansión térmica (Church & White, 2011) y por el derretimiento de hielos (Rignot et al., 2011). Por otra parte, los efectos isostáticos y de subsidencia costera son los que provocan que los instrumentos que registran el nivel del mar asciendan o desciendan con respecto al NMM.
 - **Variaciones estacionales**, asociadas a los cambios en la densidad del cuerpo de agua y en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes marinas superficiales (USEPA, 2009).
 - **Variaciones cíclicas irregulares**, algunas de origen meteorológico y corto plazo como las mareas meteorológicas y las tormentas, que alteran el nivel del mar por la acción conjunta de la presión atmosférica y del viento (CEPAL, 2011). Hay variaciones irregulares de más largo plazo, como las perturbaciones generadas por ondas Kelvin, asociadas al fenómeno El Niño Oscilación Sur-ENOS que también alteran el nivel del mar.
 - **Fenómenos transientes** o cambios repentinos de las referencias del NMM, que ocurren con el sollevamiento o la subsidencia típicos de los terremotos de subducción que ocurren en nuestras costas. Destacan, por ejemplo, los cambios locales documentados en Chile para los terremotos de 1960 (Wyss, 1976) y 2010 (Vargas et al., 2011). A modo de ejemplo, para el terremoto del Maule en 2010 se registraron sollevamientos de hasta 3 m en el golfo de Arauco.
- Los asentamientos de terreno pueden ser causados también por la pérdida o compactación del material del suelo, el descenso del nivel freático y la descomposición de los suelos orgánicos como la turba. La relajación postglacial puede también generar variaciones del nivel del suelo.
- **Ruido** correspondiente a procesos de naturaleza aleatoria y errores de registro instrumental.

Estas fluctuaciones implican que el NMM no es estacionario en una escala de tiempo corta, lo que dificulta la confiabilidad de los pronósticos y detección de posibles tendencias.

Desde 1968, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) mantiene el hoy conocido como Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC). Este Servicio almacena los registros de las estaciones mareográficas instaladas en los principales puertos del país (Figura 2.19), donde presenta una mayor densidad en su litoral centro-norte.

Algunas estaciones funcionan desde el año 1941, pero varias presentan gaps que abarcan al 15 % del volumen total de datos (Contreras et al., 2012).

2.5 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La Geología es la ciencia que estudia el origen, formación y evolución de la Tierra, los materiales que la componen y su estructura.

La Geomorfología, por su parte, es la disciplina que tiene por objeto la descripción y explicación del relieve terrestre continental y submarino.

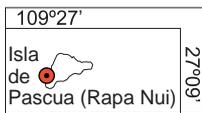
-  Estaciones de Nivel del Mar.
-  Estación de Monitoreo en Lagos.
-  Boya DART II.
-  Boya DART 4G.



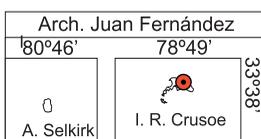
Isla San Félix



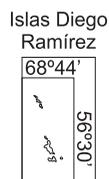
Isla Salas y Gómez



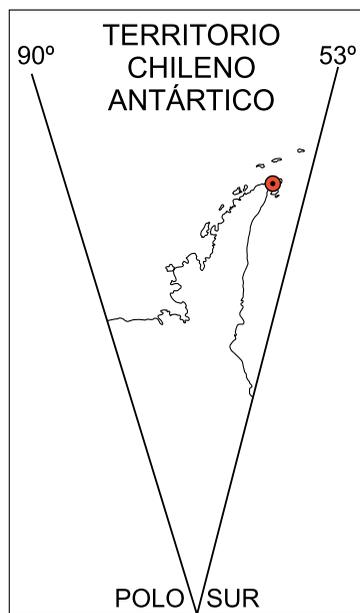
Isla de Pascua



Archipiélago de Juan Fernández



Islas Diego Ramírez



★ : Acuerdo de 1998

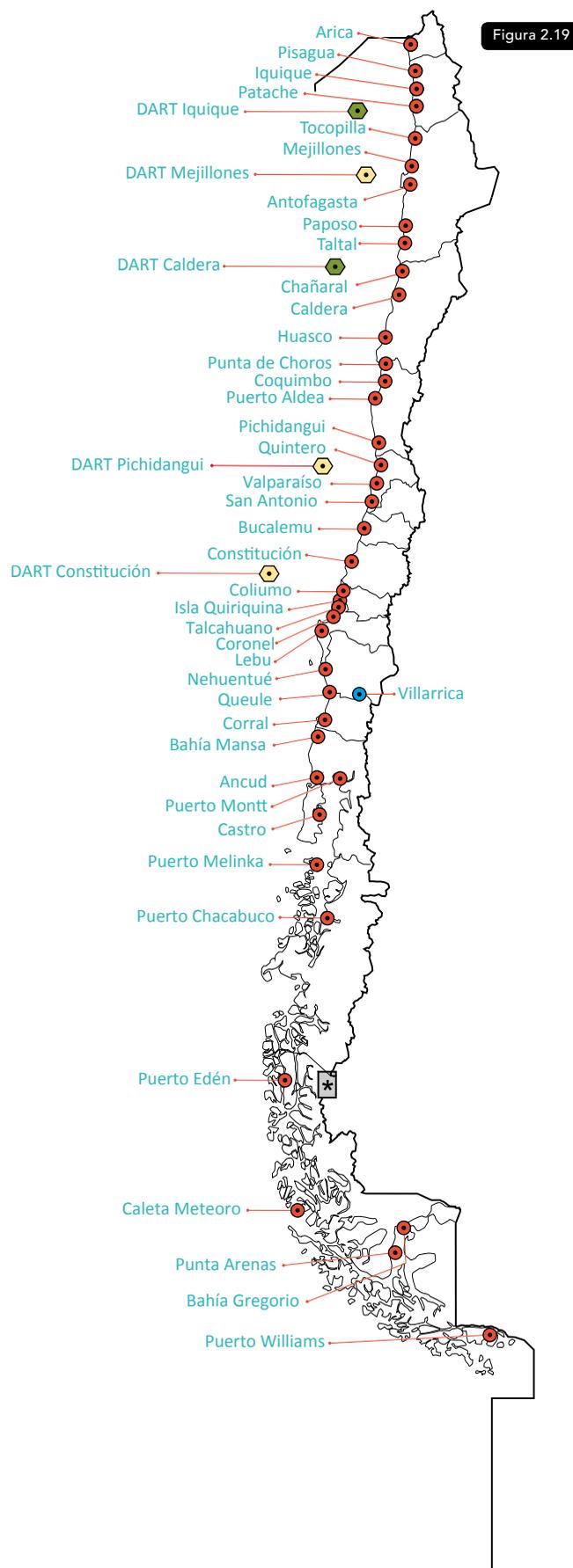


Figura 2.19

Figura 2.19:

La Red Nacional de Monitoreo de Nivel del Mar está compuesta por la Red Mareográfica Nacional (con 45 Estaciones de Nivel del Mar) y por el Sistema de Reporte y Evaluación de Tsunamis en el Fondo Oceánico (DART, del inglés *Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*), con cinco boyas detectoras de tsunamis. Todos estos componentes son fundamentales para los procesos de monitoreo de la amenaza de tsunami en las costas de Chile. Datos correspondientes al año 2019.

(Fuente: SHOA).

2.5.1 Formación del relieve

La estructura geológica de Chile es relativamente nueva y compleja, considerando los diferentes procesos que han intervenido en su formación. Las rocas más antiguas corresponden a formaciones prepaleozoicas y paleozoicas que datan de 600 a 300 millones de años, encontradas en la cordillera de la Costa entre Taltal y Chañaral, una pequeña franja en Tongoy y entre Navidad y Concepción. Las formaciones prepaleozoicas están compuestas por pizarras arcillosas, filitas, micacitas y **gneisses**, en tanto que las formaciones paleozoicas se constituyen de calizas, pizarras y cuarcitas (Figura 2.20).

El territorio chileno a fines de la era primaria (230 millones de años) estaba ocupado en gran parte por el mar. En las cumbres más elevadas sobresalían en forma de islas. El territorio era una gran depresión submarina, denominada geosinclinal andino,

donde se fueron acumulando los sedimentos que más tarde constituirían la cordillera de los Andes. En el extremo austral existía otra depresión, denominada geosinclinal de Magallanes. En los bordes de estas depresiones, se producían erupciones volcánicas frecuentes que arrojaban materiales piroclásticos, los cuales una vez consolidados, eran destruidos y acarreados hasta el mar por los cursos de agua. Al término de la era mesozoica (65 millones de años)(Figura 2.21), se inicia la orogénesis andina con el plegamiento de

los sedimentos acumulados en el geosinclinal que, unidos a los materiales volcánicos, dan origen a la cordillera andina.

Durante el período terciario de la era cenozoica (65 a 2 millones de años) se formó una gran planicie, producto del desgaste de los materiales plegados, la que posteriormente fue solevantada a más de 3000 m en el norte y centro del país; a 2000 m en las cercanías de Chiloé y a 500 m cerca de Punta Arenas. Junto con el plegamiento, se produjeron intrusiones de roca plutónica a gran escala, que conformaría el batolito andino. Estas rocas intrusivas se encuentran a lo largo del país, en forma de cerros, cumbres aisladas y cordones montañosos cordilleros. En esta era se produjeron movimientos de ascenso y descenso de bloques en el sector costero del territorio chileno, originando transgresiones y regresiones marinas.

En el norte del país se produjo una efusión de grandes cantidades de materiales volcánicos, conocida como formación riolítica y encontrada especialmente en la puna de Atacama y los cordones más occidentales de la cordillera andina. Allí se formaron cuencas endorreicas que luego se rellenaron, constituyendo lo que hoy son los salares. También se produjeron fuertes fallamientos del sector continental, iniciando la delimitación definitiva de las cordilleras de los Andes y de la Costa, que dieron origen a la depresión intermedia.

En el período cuaternario de la era cenozoica (últimos dos millones de años), la actividad tectónica se agudizó, dando forma a la actual fisonomía del país. La depresión intermedia quedó claramente definida, en tanto la cordillera de los Andes siguió su proceso de solevantamiento y la cordillera de la Costa adquirió



Figura 2.20

Figura 2.20:

Clasificación de Rocas.

Rocas ígneas o magmáticas son aquellas que se forman cuando el magma se enfría y se solidifica.

Rocas sedimentarias son aquellas que han sido formadas debido a la acumulación de sedimentos a lo largo del tiempo procedentes de otras rocas o restos orgánicos.

Rocas metamórficas resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas, como la temperatura, la presión y/o la actividad química de los fluidos agentes del metamorfismo.

(Ilustración: Ricardo Aliaga/SHOA).

su actual configuración, generándose terrazas marinas y planicies litorales. En este período, el volcanismo fue de menor intensidad que en el Terciario, y estuvo presente en casi todo el país, con excepción de los cordones transversales entre los ríos Copiapó y

Aconcagua. En el Cuaternario, además de los procesos volcánicos y tectónicos, se produjo un importante modelado del territorio por efecto de las glaciaciones. Este proceso se genera por el avance del hielo desde la alta cordillera andina hacia las partes bajas, cau-

sando un desgaste del relieve andino y la sedimentación en la depresión intermedia de los materiales erosionados. La acción de las glaciaciones se manifiesta más claramente en el sur del país, donde se represaron las aguas producto de los depósitos morrénicos acumulados en las partes más bajas, dando origen a los actuales lagos.

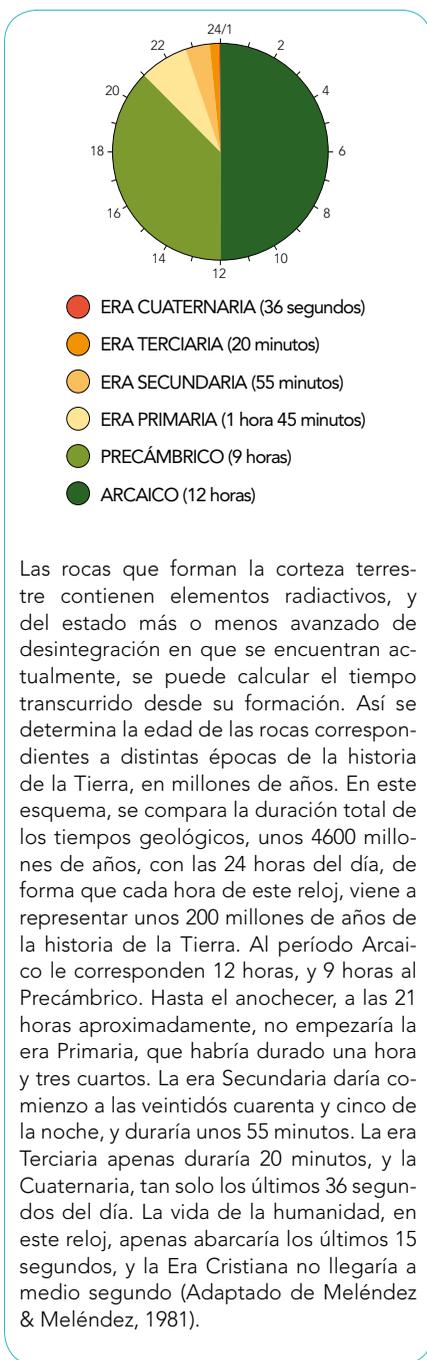


Figura 2.21a

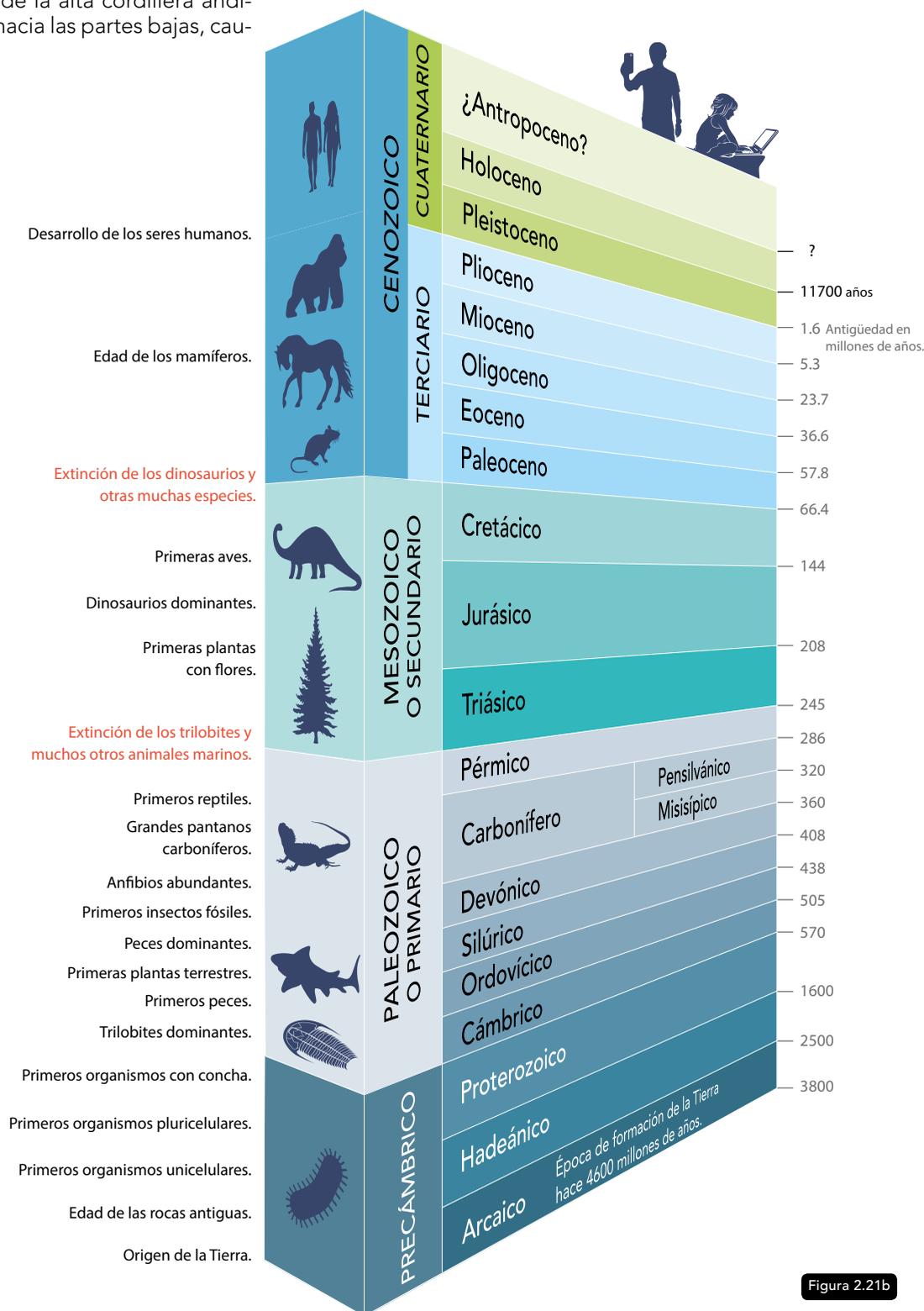


Figura 2.21b

Figura 2.21:

a) Reloj Geológico. Compara 24 horas de un día con la duración total de los tiempos geológicos (Los datos son aproximados).

b) Escala de Tiempo Geológico (Datos de la Sociedad Geológica Americana).

En la actualidad, parte de la comunidad científica utiliza el término «Antropoceno» para denominar la etapa geológica actual que continuaría al Holoceno y en la cual se refleja el impacto del hombre sobre el planeta.

Este concepto fue usado por primera vez por el Premio Nobel de Química del año 2000, Paul Crutzen.

(Ilustración: Ricardo Aliaga/SHOA).

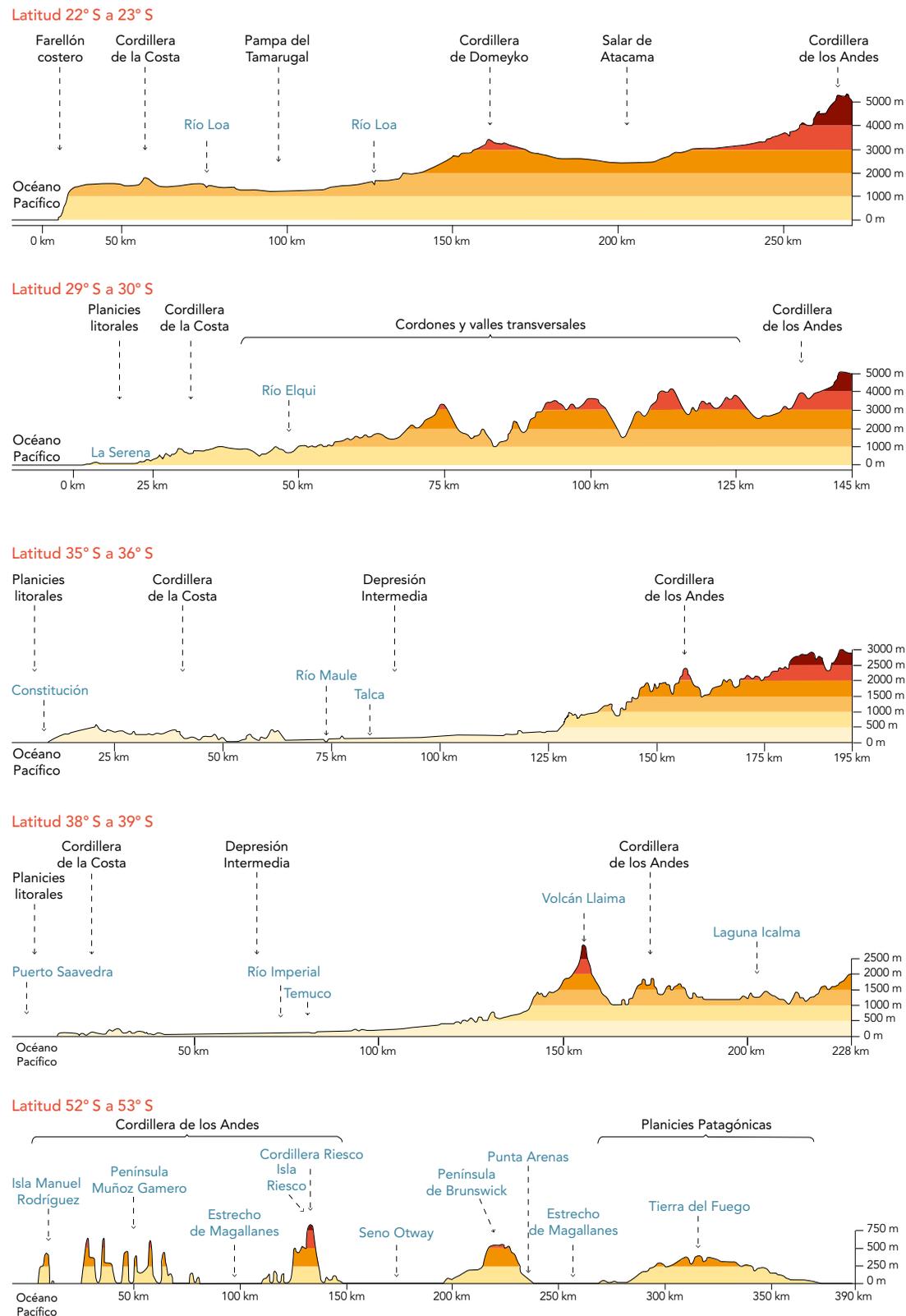


Figura 2.22: Mapas del perfil topográfico de diferentes latitudes en Chile. (Adaptado de IGM, 1988).

Figura 2.22

2.5.2 Unidades geomorfológicas principales

Los procesos volcánicos y tectónicos generados durante el Terciario, además del modelado posterior del relieve en el Cuaternario dieron origen a unidades geomorfológicas denominadas como planicie litoral, cordillera de la Costa, depresión intermedia y cordillera de los Andes, las cuales se encuentran orientadas de norte a sur. A continuación, se hace hincapié en las unidades con mayor presencia en el litoral del país.

Las planicies litorales se extienden entre el mar y la cordillera de la Costa, y desde el límite norte del país hasta el canal Chacao. En el sector norte, estas planicies son interrumpidas por el farellón costero, hasta aproximadamente la latitud de Taltal, desde donde continúan en forma ininterrumpida al límite sur, presentándose en forma de terrazas, con escalones cuyo ancho varía a lo largo de su extensión. Es así como el sector de Arica tiene una antigua plataforma de abrasión marina de unos 3 km de ancho, mientras en Mejillones se distinguen hasta nueve escalones con un ancho máximo de 5 km cada uno.

El desarrollo más amplio de las planicies litorales se da en la costa de Carrizalillo y en el sector de La Serena, donde llegan a alcanzar un ancho de 30 km y alturas de hasta 110 m. Al sur del río Aconcagua, las planicies de alturas cercanas a 200 m y anchos de hasta 20 km, han sido profundamente disectadas por las quebradas que desembocan en el mar. En la bahía de Corral se encuentra una gran terraza de unos 200 m de altura, que se proyecta valle arriba hacia Valdivia, y se compone principalmente de arenas fluviales. Estas características se mantienen hasta la provincia de Llanquihue, constituyendo el extremo sur de esta unidad. Es posible encontrar pequeñas planicies en el borde occidental de la isla grande de Chiloé.

La cordillera de la Costa y la depresión intermedia se encuentran desde el límite norte del país hasta Puerto Montt. Por su parte, esta última se extiende al sur de Puerto Montt, sumergida en el seno de Reloncaví, los golfos de Ancud y Corcovado, los canales Moraleda y Elefantes, la Laguna San Rafael y el golfo de Penas. La depresión intermedia comprendida entre

el lago de Todos los Santos y el extremo más austral del continente, se caracteriza por la composición compleja de sus materiales constitutivos, que abarcan sedimentos metamórficos, rocas del batolito y porciones aisladas de las formaciones porfiríticas del Secundario y riolíticas del Terciario. Presenta una gran acción glacial del pasado, a la que se suma la penetración del mar y los caudalosos ríos que nacen en el sector andino y/o trasandino que desembocan

en el océano Pacífico. Ello genera un paisaje muy accidentado que dificulta las comunicaciones y el asentamiento humano. La acción volcánica también ha contribuido al modelado del sector sur, aunque en menor escala.

2.5.3 Actividad sísmica y volcánica

La geología y geomorfología de Chile se ha originado en una de las zonas de subducción más importantes del planeta, producto de la combinación de la actividad sísmica, el volcanismo y las anomalías en la gravedad. El cinturón volcánico se extien-

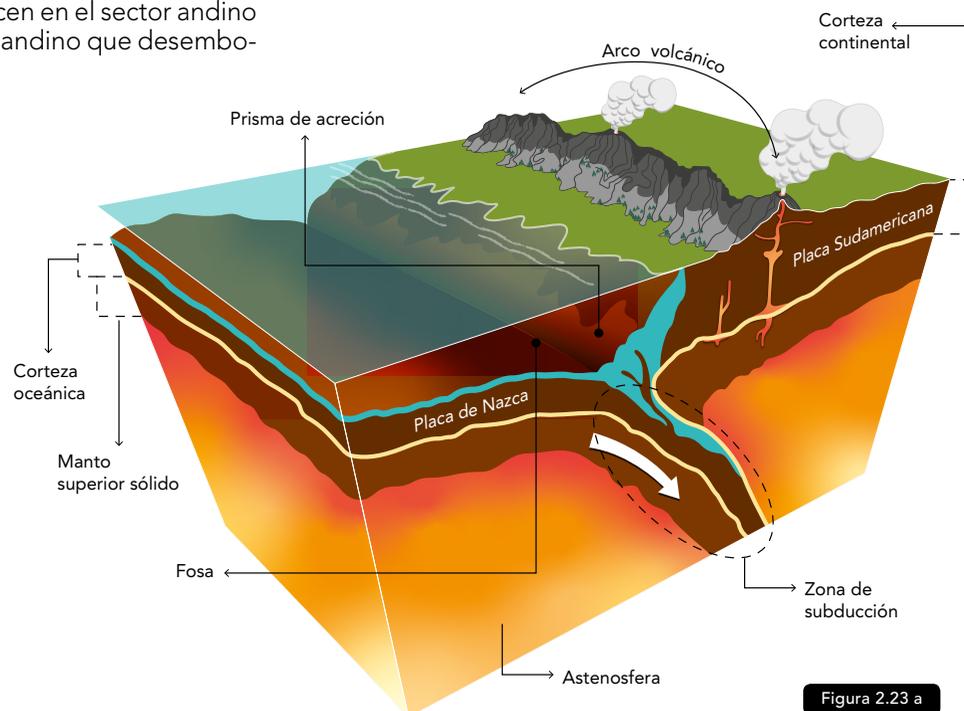


Figura 2.23 a

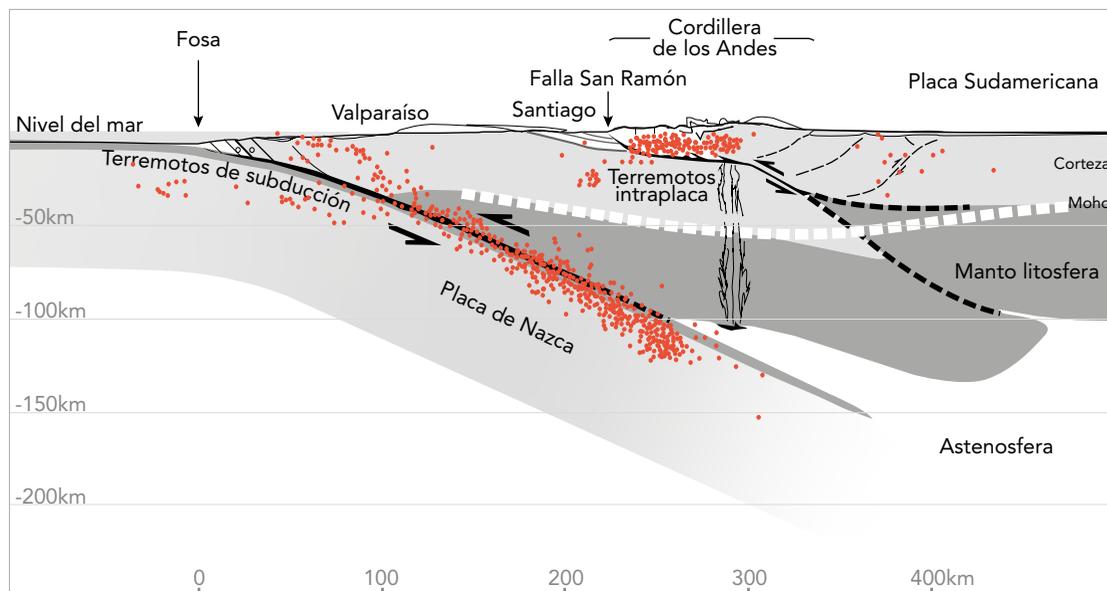


Figura 2.23 b

Figura 2.23:

a) Zona de subducción, donde la placa de Nazca se hunde bajo la placa Sudamericana, proceso que ha provocado gran parte de los terremotos en Chile.

(Elaboración propia).

b) Mapa de sismicidad en la zona central de Chile. Los círculos rojos representan el hipocentro de sismos menores.

(Adaptado de Armijo et al., 2010).

de a lo largo de todo el país, pero en forma discontinua. Es así como entre los 19° S y 28° S, los volcanes han estado activos desde el Cuaternario; mientras que se presenta un segmento sin actividad volcánica entre los 28° S y los 33° S. En el tramo comprendido entre los 33° S y los 46° S, reaparece la cadena volcánica y el volcanismo es casi inexistente entre los 46° S y los 49° S. Se especula que la discontinuidad en los alineamientos volcánicos estaría relacionada con su colisión y posterior consumo en la zona de subducción durante los últimos millones de años, donde causaría una disminución de la actividad volcánica.

Aparentemente, el alineamiento submarino de Juan Fernández está asociado a la disminución de la sismicidad profunda y, por consiguiente, a los cambios repentinos de la actividad volcánica en el margen continental. De hecho, en su costado septentrional, la línea volcánica es discontinua, con cumbres separadas por cientos de kilómetros.

La **subducción** en el margen continental de Chile genera una potente zona sísmica que se extiende por más de 2600 km, entre el límite norte con el Perú y los 45° S. Una revisión de las investigaciones en sismología confirma que los terremotos intermedios y profundos, situados por debajo de Chile, ocurren como resultado de tensiones acumuladas en la zona litosférica de penetración. La actividad sísmica, no obstante, es heterogénea, con zonas de silencio sísmico (lagunas o gaps) como la ubicada en el norte del país y zonas más activas. En la actualidad, existen mapas de sismicidad en los cuales se ilustra la posición del **epicentro** de terremotos históricos en función de la profundidad. Este tipo de información permite desarrollar modelos de

la losa litosférica descendente y estimaciones de la amenaza sísmica en el país.

La sismicidad de Chile se puede subdividir desde la superficie hasta una profundidad superior a los 500 km. Entre el nivel superficial y los 50 km, la actividad sísmica se concentra a lo largo de la fosa y en la litosfera continental, en forma de terremotos poco profundos con potencial de generar tsunamis. En ese nivel, existen lagunas sísmicas en latitudes cercanas a los 19° S, 28.5° S, 35° S, 36.5° S y 38° S. Un segundo nivel, situado entre 50 a 100 km, sigue la línea de la costa, centrando su actividad entre los 19° S y 27° S. A esta profundidad, la sismicidad se agrupa en áreas más pequeñas, separadas por zonas de silencio sísmico. Un tercer nivel, ubicado entre los 100 y 300 km, presenta un agrupamiento donde las más activas, ubicadas entre los 15° S

a 25° S y los 27° S a 37° S, se encuentran separadas por una zona de silencio. El cuarto nivel corresponde a una zona de escasa actividad entre los 300 y 500 km de profundidad. Finalmente, el quinto nivel muestra una actividad sísmica más profunda, entre 20° S a 29.5° S y hasta los 68° W; la cual es bastante distinta de la actividad superficial.

Estos antecedentes permiten suponer que la sismicidad no es continua, tanto en latitud como en profundidad. Esto puede ser claramente observado en cortes transversales (Figura 2.24), los cuales permiten ver que dicha distribución correspondería al hundimiento de la placa oceánica por debajo de la Sudamericana. Esta zona de interacción se denomina «Zona de Benioff».

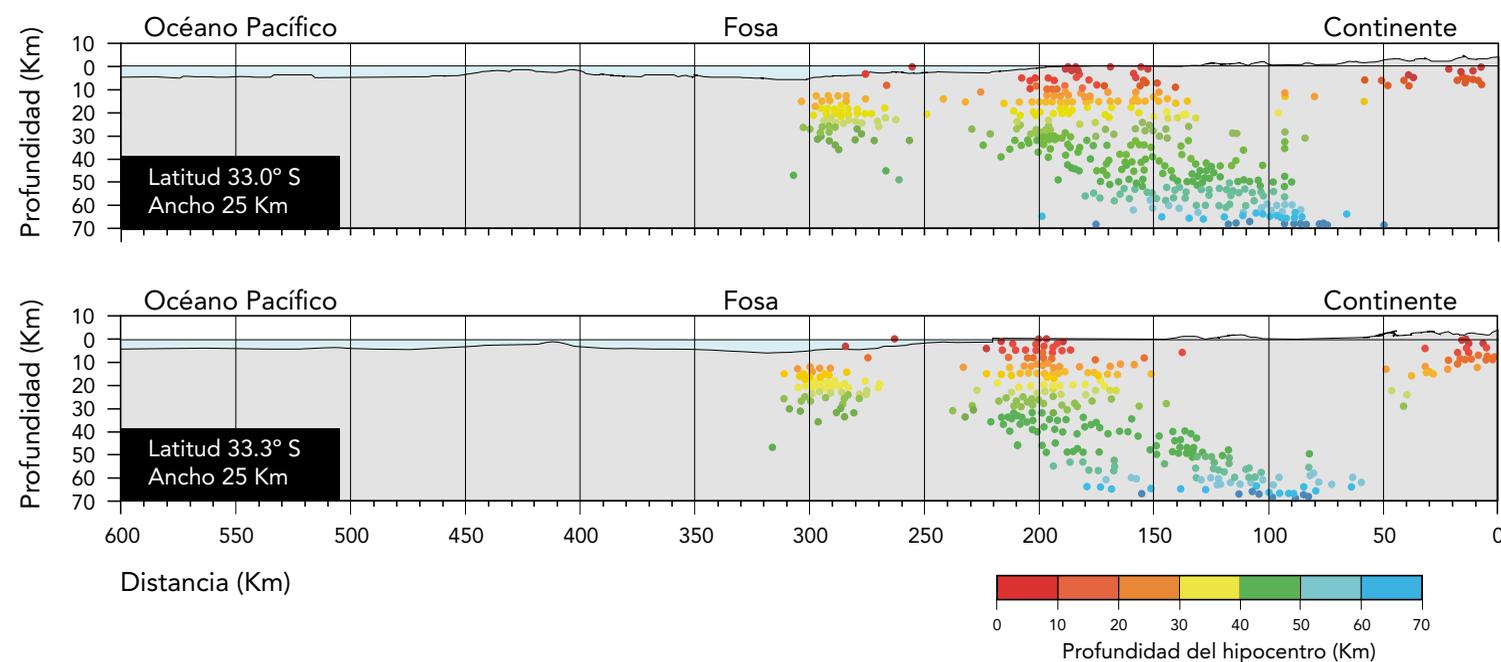


Figura 2.24:

Sismicidad en los 30° S y 33.3° S entre 1973 y 2004.

(Elaboración propia).

Figura 2.24

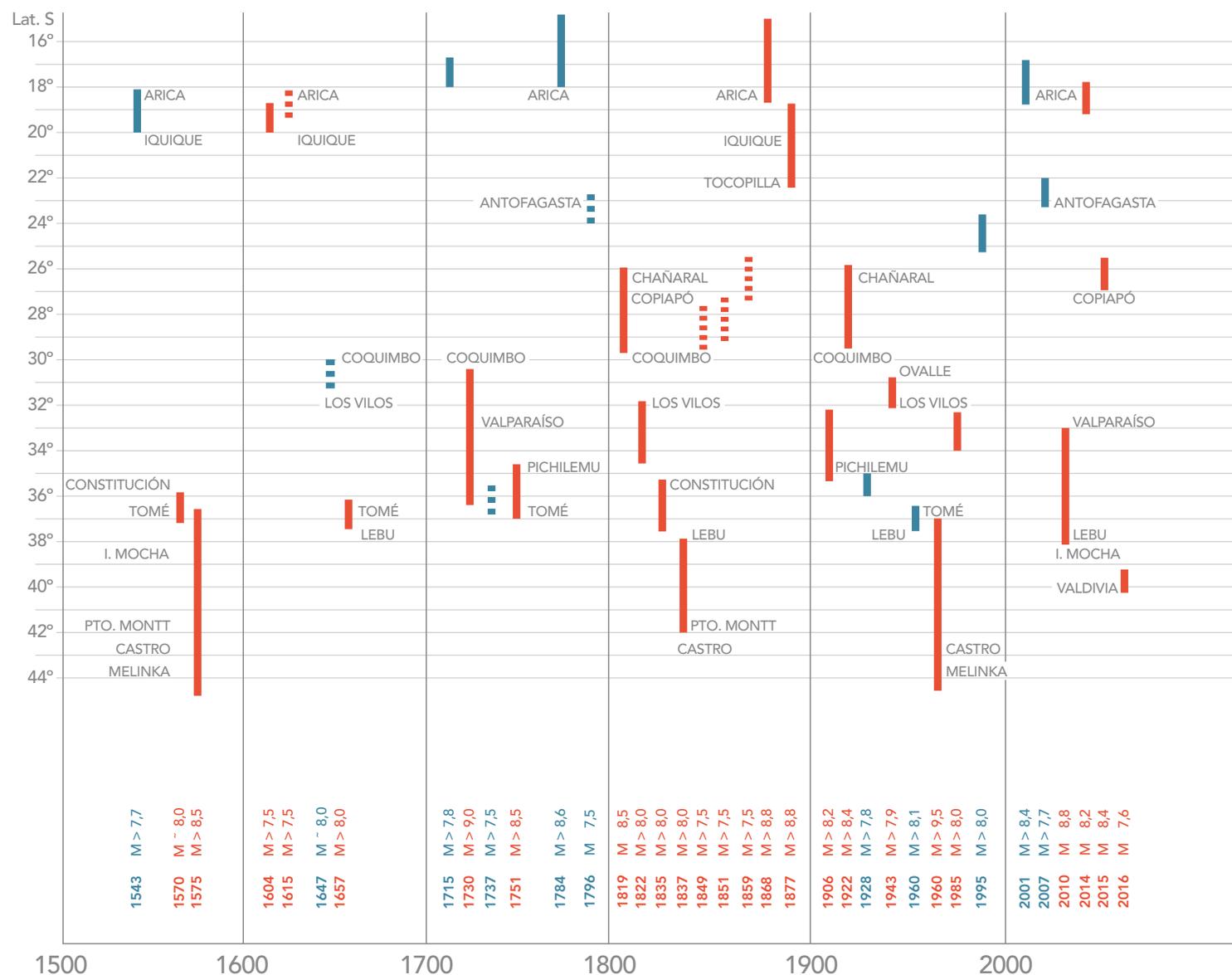


Figura 2.25

Figura 2.25:

Diagrama espacio-tiempo de longitudes de ruptura de terremotos importantes frente de Chile. Los eventos destacados en rojo tienen tsunamis asociados.

Terremotos y tsunamis según catálogo de Lomnitz (2004) y Carena (2011). Los datos fueron compilados e ilustrados por Patricio Catalán.

2.5.4 Geomorfología litoral

2.5.4.1 LAS COSTAS ABIERTAS

Entre la frontera con Perú y una sinuosa línea inmediatamente al norte del río Elqui, predomina el farellón costero, que cubre una extensión lineal estimada en 1600 km. Este farellón (*cliff*) se levanta

desde el nivel del mar hasta los 1000 m sobre la línea de costa, descendiendo paulatinamente hacia el sur. Taltal establece un límite entre una costa caracterizada por farellones altos y la otra, más deprimida. En toda su extensión, el acantilado costero está bien conservado y se interrumpe esporádicamente por quebradas secas que logran llegar hasta el mar (Borgel, 1982).

Pequeños episodios regresivos han formado estrechas terrazas al pie del farellón costero que presentan diferentes alturas. Esta desigualdad en los niveles de terrazas costeras estaría asociada a movimientos tectónicos locales, y no a cambios en el nivel del océano por causas glacioeustáticas.

Araya (1971) propone que la costa, entre el límite con Perú y la desembocadura del río Elqui, es de tipo abrasivo-tectónico. Así, por ejemplo, al norte de Iquique no existe la planicie litoral y el mar tiene contacto directo con el acantilado costero, el cual cae con una pendiente en torno a los 80°. Al sur de Iquique, hay un desarrollo creciente de playas y terrazas litorales, que obliga al acantilado a alejarse de la orilla del océano, a suavizar

su pendiente en torno a valores de 35° a 40° (Borgel, 1982) y a dejar de sentir la influencia directa del mar (Figura 2.26). Más al sur, este acantilado inactivo es reemplazado por extensas plataformas de abrasión marina.

El segundo accidente geomorfológico inscrito en el borde occidental de la cordillera de la Costa en la zona norte, es la denominada planicie litoral. Esta se presenta muy estrecha, producto del solevantamiento costero asociado a la actividad tectónica, y es interrumpida por estribaciones desprendidas de la pampa alta y de la cordillera de la Costa. Las estribaciones, en forma de cuchillas vertebradas, descienden hasta el borde de las playas, activando la erosión marina. Las playas que se intercalan entre estas estribaciones tienen forma de arco y, en general, presentan un estrán arenoso, recubriendo levemente uno rocoso que queda al descubierto en los períodos de baja marea.

Las plataformas de abrasión marina presentan entre 4 y 8 km de ancho. Solo en presencia de pocas desembocaduras en quebradas importantes, se amplían y ensanchan, dando lugar a extensiones de hasta 11 km, como ocurre en la desembocadura del río Loa (Borgel, 1982). Las planicies litorales están asociadas a procesos de abrasión o sedimentación marina. Sin embargo, en la mayor parte de este litoral nortino las acciones abrasivas del mar dominan sobre un estrán rocoso en continuo

ascenso. Aislados golfos con restos de conchas marinas han sido afectados por este tipo de erosión, formando acantilados costeros al pie de los cuales se desarrollan playas estrechas.

Una tercera zona geomorfológica se conforma por los llanos de sedimentación continental presentes en las desembocaduras de ríos y quebradas. Estas unidades se forman sobre las llanuras de acumulación detrítica, producidas por la coalescencia de material continental con depósitos marinos, como ocurre, por ejemplo, en las cercanías de Arica. Por su parte, en el curso del río Copiapó, entre Paipote por el este y Piedra Colgada en el oeste, se genera una zona de acumulación fluvial, que ha es-

tado sometida a una tectónica litoral muy enérgica. Terrazas escalonadas y amplias planicies de abrasión marina amenizan esta gran acumulación.

La quebrada del Salado, que desemboca en la ciudad de Chañaral, constituye el límite entre dos tipos de escurrimiento. Al norte de este límite, el sistema de drenaje se caracteriza por pendientes fuertes, que impiden la organización de aterrazamientos cíclicos. Al sur de esta quebrada, las aguas fluviales acusan un escurrimiento más regular, aunque el estiaje prolongado y muy enérgico determina un ritmo muy menor de las aguas durante los años secos (Borgel, 1982).



Figura 2.26:

Acantilados costeros al sur de Iquique.

(Foto: Norberto Seebach).

Figura 2.26

2.5.4.2 LA ZONA CENTRO-SUR

Desde La Serena al sur, la planicie costera alcanza un importante desarrollo. Entre Tangué y cerro Blanco, al sur de bahía Tongoy, esta se extiende 30 km al interior del continente. El avance al oeste de un cordón transversal desprendido al occidente de Combarbalá, determina una disminución momentánea de la planicie, la que, interrumpida por espacio de 40 km, vuelve a presentarse al sur de Angostura, aunque con menor vigor que en la zona de Tangué. En general, la planicie litoral alcanza mayor extensión en las desembocaduras de los ríos y quebradas importantes, lo que en parte acusa interacciones continentales y marinas.

De acuerdo con su origen, las terrazas comprendidas entre La Serena y el río Limarí corres-

ponden a la serie fluviomarina, con abundantes rípios y material calcáreo. Condiciones parecidas, aunque menos potentes y de estrecho desarrollo, se presentan entre la quebrada Matagorda y playa Hacienda Agua Amarilla, al norte de Los Vilos. El resto de la costa se inscribe como una planicie litoral marina, con ligeras excepciones en Huentelauquén, Quilimarí y La Ligua, donde los aportes continentales son importantes.

Entre los valles de Elqui y Aconcagua, los llanos de sedimentación fluvial ocupan los cursos medios de los ríos Elqui, Limarí, Choapa, Petorca, La Ligua y Aconcagua. Estos sistemas han sido capaces de generar playas de sedimentación fluvial, producto de la desagregación del granito costero y debido a que el ciclo anual de precipitaciones es de gran irregularidad.

Entre los ríos Aconcagua y Biobío, la planicie costera marina presenta variados aspectos en su desarrollo latitudinal. En algunos tramos se inscribe en el granito costero como terrazas de abrasión, construyendo sistemas escalonados de hasta 4 niveles. Tal sería el caso de la franja comprendida entre el río Aconcagua y el río Maipo por el sur. Entre el río Aconcagua y el estero Casablanca, domina la costa alta con algunas playas intercaladas. Entre el Maipo y el estero Yali, la sedimentación moderna domina el sector costero. Del estero Yali al sur, el sistema escalonado se reemplaza por una abrasión generalizada con bolsones de sedimentación en las desembocaduras de los grandes ríos. En general, la línea costera es mixta, alternando extensas playas de acumulación arenosa y acantilados. En punta Topocalma, a escasos kilómetros al norte de Pichilemu, las terrazas del Plioceno y Mioceno logran penetrar hasta 25 km al interior. Desde Tanumé hasta el norte del río Itata, las terrazas marinas se inscriben en las rocas metamórficas precambrianas.

Entre el estero Casablanca y el río Rapel, la costa es baja, con excepción del tramo comprendido entre Cartagena y San Antonio, que presenta acantilados menores y roqueríos bajos. Más al sur, desde Rapel a Vichuquén, existe una costa baja y arenosa.

Al sur del río Mataquito, la costa deja extensas playas al descubierto, con aterrazamientos altos que se empinan aproximadamente a 200 m en Chanquiúque. El área septentrional del río Maule, en Putú y Junquillar, corresponde a una costa baja del tipo construccional con un acantilado muerto 5 km al este de la línea de pleamar. Al sur del Maule se renueva la costa alta hasta la pequeña bahía de Las Cañas. Desde este punto a la desem-



Figura 2.27:

Dársena de la antigua minera El Tofo, al norte de La Serena, Región de Coquimbo.

(Foto: P. Winckler).

Figura 2.27

bocadura del río Tutuvén, la costa es baja y fuertemente invadida por arenas eólicas, repitiendo el aspecto dunario de Putú. Al sur de Tutuvén reaparece la costa alta con pequeñas playas arenosas que se intercalan en el relieve. Aquí logran distinguirse hasta tres terrazas marinas a 60, 140 y 220 m, respectivamente.

La costa acantilada continúa sin mayores cambios hacia Dichato, Tomé y Concepción, con playas y barras arenosas en las cercanías de algunas desembocaduras. Desde el río Biobío al canal Chacao, en un litoral de más de 600 km, las planicies cubren superficies variables de acuerdo con la presión que sobre ellas ejercen los relieves desprendidos de la cordillera de la Costa. Es así como el aplanamiento marino que enfrenta a la cordillera de Nahuelbuta, se estrecha a solo 35 km de ancho máximo. En el curso inferior del río Tirúa, la cordillera costera termina por ahogar la planicie marina, la que desaparece momentáneamente para reaparecer 20 km al sur, en la orilla meridional del río Moncul.

En general, la sedimentación fluvial corresponde a arenas negras, originadas en la actividad volcánica del sistema Antuco. Las acumulaciones eólicas que se encuentran entre el Maule y la planicie marina al sur del Biobío corresponden a arenas oscuras, transportadas al norte por la deriva litoral. Al sur del Biobío, la alteración del granito intrusivo y las cuarcitas de la formación metamórfica costera originan arenas blancas, las que también se encuentran en los cursos inferiores de los ríos Itata y Maule.

El litoral que se extiende desde el río Moncul hasta el río Queule presenta débiles afloramientos del batolito, ligeramente supe-

riores a 300 m, que conforman una planicie marina de unos 25 km de ancho. En este sector tampoco están ausentes las acciones fluvio-marinas, como ocurre en la desembocadura del río Imperial. En este tramo se encuentra el lago Budi (Figura 2.28), que se forma en las depresiones litorales vinculadas a la tectónica cuaternaria marina, y se nutre de aguas superficiales y subterráneas, provenientes de la cordillera costera. A 32 km al oeste de punta Tirúa, se encuentra la isla Mocha, producida también por la tectónica cuaternaria.

La cordillera de Mahuidanchi (Región de la Araucanía), que se extiende en el eje noroeste-sur con altitud de 534 m en el cerro Puralaco, estrangula el desarrollo del aplanamiento litoral frente a la localidad costera de Queule. A partir de esta cordillera al sur, la orografía impide el desarrollo de pla-

nicies marinas, y solo algunos niveles fluvio-marinos se organizan en las desembocaduras de ríos importantes como el Valdivia, Bueno y Tranallaguin.

Solo al sur del río Llico se reorganiza el aplanamiento litoral, cuyo origen (marino, fluvio-marino o glacial) es difícil de definir, pues la altimetría costera trasciende hacia el llano central sin barreras. Entre Los Muermos y Puerto Montt se extiende la planicie sedimentaria de Maullín. Desde el río Llico a Carelmapu, último punto del litoral no sumergido de Chile continental, la costa se define por el principal accidente geográfico en la desembocadura del río Maullín.

Figura 2.28:

Barra de arena de la desembocadura del lago Budi. Se observa un oleaje energético penetrando el lago, Región de la Araucanía.

(Foto: Mónica Musalem).



Figura 2.28



Figura 2.29

Figura 2.29:

Fuerte de Niebla, en la desembocadura del río Valdivia, Región de Los Ríos.

(Foto: P. Winckler).

2.5.4.3 LA ZONA DE FIORDOS Y CANALES

Entre el golfo de Ancud y las islas Diego Ramírez, se extiende un verdadero laberinto de montañas, ventisqueros, islas y canales en un eje norte-sur, cubriendo alrededor de 1600 km. El ancho este-oeste es variable, registrándose 300 km frente a Taitao, 100 km entre Palena y el Pacífico, y 480 km entre el extremo oriental del estrecho de Magallanes y la isla Diego

de Almagro en el Pacífico. Esta área representa un tercio del territorio nacional y es una de las regiones más inhóspitas del planeta, por su intrincada morfología y clima. Sometida a una tectónica de hundimiento a escala geológica, el mar ha penetrado por el llano central originando una morfología litoral salpicada de golfos, canales, estuarios y fiordos.

La planicie litoral de Chiloé y sus islas adyacentes comienzan por el norte en punta Corona, formación que cierra la bahía Ancud por el noroeste. La península que aloja el poblado de El Banco tiene la forma de un gancho que alberga el arco meridional del golfo Coronados. Al sur de El Banco, la playa de bahía Cocotué representa una costa baja que se prolonga en ambas orillas de la desembocadura del río Puntra. Al sur de punta Ahuenco se interrumpe definitivamente el desarrollo de la planicie litoral, con una moderada excepción en el lago Cucao.

Figura 2.30:

Uno de los servicios de Trasmarchilay en la rampa de Parga, para cruzar el canal Chacao hacia Chiloé. En la localidad se utilizan rampas para atender a las embarcaciones en diferentes niveles de la marea.

(Foto: P. Winckler).



Figura 2.30

La planicie litoral vuelve aflorar en la orilla norte del estrecho de Magallanes, donde se extiende un aplanamiento marino salpicado de cerros aislados con una extensión de 260 km entre Agua Fresca, 28 km al sur de Punta Arenas, y punta Dungeness, en la entrada oriental del estrecho. En este sector aparece una serie de lagunas que se desprenden desde bahía Whitesand al oeste y que amenazan con cortar la península de Brunswick, entre estancia Fenton y el canal Fitz Roy.

En la orilla meridional oriental del estrecho de Magallanes, entre Porvenir y punta Catalina, se desarrolla una planicie litoral interrumpida por la península Juan Mazía, con manifestaciones de hundimiento litoral señaladas por la presencia de lagunas entre Porvenir y estancia Gente Grande.

Entre la isla grande de Chiloé y la península Tres Montes, el relieve está conformado por islas, archipiélagos y penínsulas. Esta sección cordillerana, intensamente fragmentada por la tectónica de hundimiento, aparece enmarcada por el golfo Corcovado al norte, los canales Moraleda, Costa y estuario Elefantes al este, el océano Pacífico al oeste y el golfo de Penas. Esta zona geográfica se conoce como archipiélago de los Chonos. Las islas Guafo y Guablín representan elementos bastante excéntricos respecto del alineamiento norte-sur que conserva la cordillera de la Costa en esta región. Solo desde las islas Guaitecas al sur, el apretado ramillete de islas, penínsulas y canales dibuja

una antigua unidad orográfica costera, ahora hundida.

El archipiélago de los Chonos alberga formaciones mayores como las islas Benjamín, James, Melchor, Riveros y la península de Taitao, unida al continente por el istmo de Ofqui que, con su característica forma de gancho, da pie a numerosas penínsulas menores. En el centro de Taitao se aloja la depresión lacustre del lago Presidente Ríos, conformada en cinco largos golfos.

Desde el seno de Reloncaví hasta el istmo de Ofqui, aparece el llano central ocupado por el mar, como resultado del enérgico hundimiento que ha experimentado esta zona del territorio. Los principales accidentes que se ubican de norte a sur en este espacio geográfico son el seno de Reloncaví, el golfo de Ancud, el golfo del Corcovado, los canales Moraleda y Costa, el estuario Elefantes, la Laguna San Rafael, el istmo de Ofqui y el llano aluvial del río San Tadeo. Este sector, totalmente hundido en su margen oriental, se pone en contacto con las cordilleras patagónicas en un verdadero frente de falla que está bien conservado entre Puerto Montt y Puerto Palena. Hacia el sur, un fuerte desmembra-

miento genera un laberinto de islas, fiordos y canales que se prolonga hasta la salida occidental del fiordo Aysén.

Al sur del río Palena, la isla Refugio señala la aparición de un litoral fragmentado más intensamente, con canales, senos, ríos y fiordos que se adentran profundamente. Es así como el canal Jacaf penetra 55 km desde el Moraleda hacia el este, poniéndose en contacto con el seno Ventisquero que, a su vez, es la prolongación septentrional del canal Puyuguapi. Este sistema de vías de aguas determina la insularidad del vasto territorio que comprende la isla Magdalena. Una característica destacada es la presencia de numerosos ventisqueros, aislados unos y encadenados otros. La presencia de los fiordos Quitralko, Cupquelán o San Francisco impone la existencia de dos grandes penínsulas, en una de las cuales se encuentra el río de los Huemules. Los relieves allí presentes constituyen un sistema hidrográfico de pequeñas cuencas lacustres y numerosos glaciares que se derraman tanto al Pacífico como hacia las cuencas orientales.

Figura 2.31:

Volcán Hornopirén, Región de Los Lagos. En primer plano, la ciudad homónima, marcada por un rango amplio de la marea.

(Foto: P. Winckler).



Figura 2.31

**Figura 2.32:**

Caleta Tortel, en las cercanías de la desembocadura del Río Baker, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

(Foto: P. Winckler).

En el glaciar Jorge Montt y Tierra del Fuego, numerosos accidentes morfológicos caracterizan a un territorio bajo el dominio de un fuerte hundimiento, sin alcanzar aún la fragmentación insular. En esta región se presentan los glaciares patagónicos que se desarrollan entre la península de Taitao y el lago General Carrera.

Entre el golfo de Penas por el norte y las islas Hermite por el sur aparece un variado conjunto de estrechos, canales e islotes caracterizados por el hundimiento tectónico. Los relieves se inician en la isla Javier, en el extremo nororiental del golfo de Penas, y continúan al sur en el archipiélago Guayaneco. La verdadera digitación oriental de este

archipiélago se repite unos kilómetros al sur, en las islas Van Der Meulen, Caldcleugh, Farquhar y Ofhidro, conjunto que se desplaza al este del canal Messier. El archipiélago Guayaneco está limitado al este por el canal Messier, al oeste por el océano Pacífico, al norte por el golfo de Penas y al sur por el golfo y canal Trinidad. Separadas del archipiélago por el canal Trinidad se ubican las islas Madre de Dios y Duque de York, conjunto insular que dibuja una especie de prolongación meridional del primero. El canal Concepción separa a estas dos islas de otras, situadas más al oriente, bajo los efectos de una fragmentación más intensa.

Las mayores porciones insulares que siguen a la isla Duque de York son las islas Chatham, Farrel, Hannover, Esperanza, Jorge Montt y Diego de Almagro. Al sur de la última, el estrecho Nelson impone un límite importante que se prolonga al norte y este por los pasos Castro y Tarleton, respectivamente. En esta segunda unidad, las islas Vancouver, Evans y Owen se ubican tan al este, que la **orografía** se ensancha a 105 km en eje este-oeste. Del mismo modo, la penetración al oriente de los senos Andrew y Calvo implica una asfixia al territorio continental chileno, el cual se estrecha a 20 km sobre un puente de hielo desprendido del cerro Cervantes. Al sur del estrecho Nelson, las islas Contreras, Vidal Gormaz, Rennell, Piazzí y Manuel Rodríguez tienden a orientarse en el eje noroeste-sureste.

La isla Riesco, al sureste de la península Muñoz Gamero, representa un cambio en la topografía que se pone en contacto con la estepa fría magallánica, interrumpiendo en largo tre-

cho el desarrollo de las cordilleras continentales. Entre la boca occidental del estrecho de Magallanes y los canales Cockburn y Whiteside, se ubican las islas Desolación, Jacques, Santa Inés, Clarence, Capitán Aracena y Dawson.

Finalmente, se reconoce el conjunto de islas situadas al sur de los canales Ballenero y Beagle, incluyendo a Londonderry, Gordon, Hoste, Gilbert Wood, Navarino, Picton, Lennox, Nueva, Evout, Barnevelt, el conjunto de las

Wollaston, Hermite y las más distantes al sur, la isla Hornos e islas Diego Ramírez. De este denso sector insular, las mayores porciones corresponden a las islas Hoste y Navarino, que es la primera predominantemente baja, y la segunda dotada de un relieve vigoroso, con numerosas digitaciones peninsulares. La excepción a estas formaciones bajas es el aislado pico Dientes de Navarino, que se levanta a 1195 m.



Figura 2.33:

Glaciar Romanche, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

(Foto: SHOA).

Figura 2.33

2.5.5 Geomorfología submarina

El margen continental de Chile se caracteriza por ser uno de los más activos a nivel mundial, en términos tectónicos. Desde el punto de vista fisiográfico, la fosa Chile-Perú es única por su forma casi rectilínea a través de varios miles de kilómetros. Esta fosa es el elemento morfológico dominante, que persiste como unidad estructural desde la costa de Colombia hasta la Tierra del Fuego. La fosa fue reconocida como un elemento fisiográfico mayor hace más de 100 años, cuando en 1895, sir John Murray publicó una primera carta batimétrica basada en sondeos realizados para la colocación de las líneas del telégrafo submarino. Su profundidad máxima es de 8065 m cerca de los 23° 20' S, siendo la más profunda del Pacífico Suroriental.

El margen continental frente a Chile es típico de convergencia, originado en su tramo norte por la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, y en su tramo sur por la interacción entre las placas Antártica y Sudamericana. La Unión Triple de estas tres placas interrumpe la continuidad de la fosa frente a la península de Taitao (46° S). Una interrupción menor está también dada por la cadena de montes submarinos que forman la dorsal de Juan Fernández, la cual subduce bajo el continente aproximadamente a los 33° S. El tramo entre los 18° S y los 45° S es un ejemplo clásico de zona de subducción, que resulta al penetrar la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana con una convergencia de 10 cm/año (Minster *et al.*, 1974). Entre los 40° S y la Unión Triple se encuentra una corteza oceánica originada hace 20 millones de años en la dorsal de Chile. Esta dorsal, que es el límite entre las placas de Nazca y Antártica, termina a su vez en una segunda Unión Triple hacia el noroeste, justo en la intersección de la dorsal Antártica Pacífico y la dorsal del Pacífico Oriental.

En relación con la batimetría, es posible describir áreas con características distintivas. Entre los 19.5° S y los 28° S, el fondo oceánico se caracteriza por una **plataforma continental** de pocos kilómetros de ancho, que desaparece en algunos lugares, y por terrazas angostas o planas o de lados muy inclinados en la parte inferior del talud. Entre los 28° S y 34° S, el margen se caracteriza por un *plateau* intermedio, con taludes superior y medio de 2.8° y la inexistencia de cañones submarinos. La región entre los 34° S a 45° S se caracteriza por suaves taludes superior y medio de morfología muy variada, una plataforma continental considerablemente más ancha y la ausencia del *plateau* intermedio. Entre los 47° S y 48° S, el talud se torna más ancho, hasta alcanzar una extensión cercana al doble de la región situada al norte de la Unión Triple.

Aproximadamente a los 33° S, la fosa Chile-Perú presenta un cambio radical, tanto en la forma como en profundidad, debido al importante aumento en los sedimentos hacia el sur. De hecho, la forma del eje cambia de una **garganta** angosta, entre Arica y este límite, a una depresión ancha y plana en las proximidades de



Figura 2.34:

Relieve marino frente a Chile.

(Fuente: Morales, 2014).

Figura 2.34

Valparaíso. Entre los 33° S y 40° S, el eje de la fosa desaparece bajo una capa horizontal de sedimentos de más de 1 kilómetro. La menor profundidad del basamento acústico al norte de los 33° S es, probablemente, la causa de la notable diferencia de la profundidad axial. Un levantamiento gradual del piso en lugar de las fallas verticales vistas en las provincias anteriores pareciera ser el responsable de la menor profundidad del basamento.

Los cañones submarinos aparecen en el talud continental al sur de los 33° S, donde el más importante por sus dimensiones es el de San Antonio, frente al puerto homónimo. La aparición simultánea de estos cañones y el mayor espesor de los sedimentos axiales se relacionan con el cambio del clima, que se hace más lluvioso en estas latitudes. Los sedimentos axiales aumentan al sur, en forma irregular, aparentemente debido a las barreras estructurales que inhiben la migración hacia el norte de los sedimentos a lo largo del eje de la fosa.

Al sur de los 40° S aparece el relieve representado por la dorsal de Chile, que se extiende hacia el Pacífico en casi 1200 millas. La dorsal está constituida por un relieve bien definido de crestas y trincheras, con una zona axial profunda y amplia. Esta formación se prolonga desde los 46° S en una línea oblicua hasta la dorsal del este del Pacífico, donde intercepta a otra Unión Triple ubicada en los 35° S y 110° W, que corresponde a la intersección de la dorsal Antártica Pacífico y la dorsal del Pacífico Oriental. La batimetría en este sector está representada por un sistema de valles de *rift* y zonas de fracturas que son los elementos prominentes de la Unión Triple. Este sistema intercepta la fosa Chile-Perú, donde se evidencia un desplazamiento lateral del eje de la dorsal del orden de los 300 km hacia el costado del mar. Cerca de los 46° S existen dos zonas de fractura adicionales, las cuales provocan un nuevo desplazamiento de la dorsal en 60 y 70 km, respectivamente.

2.6 TERRITORIO CHILENO ANTÁRTICO

El continente antártico comprende una superficie de 13 500 000 km² (Figura 2.35). Tectónicamente, se considera formado por dos grandes unidades, la Antártica oriental y la Antártica occidental, las cuales se encuentran separadas por las montañas transantárticas. La primera es un escudo continental compuesto por rocas antiguas de origen ígneo y metamórfico, cubiertas por rocas sedimentarias más jóvenes y bien estratificadas. La Antártica occidental, por su parte, está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas jóvenes, fuertemente plegadas y afectadas por cierto grado de metamorfismo.

El continente antártico está cubierto casi en su totalidad por hielos, cuyo espesor sobrepasa los 2000 m en algunas regiones. El hielo llega en casi todas partes al mar y sus emisarios más importantes penetran varias decenas de kilómetros, creándose amplias plataformas que terminan en acantilados de hielo, de los que se desprenden témpanos (*icebergs*).

Los glaciares, las barreras continentales y otras formas de hielo transportan sobre el 90 % de la cantidad total de detritos

del continente. Por su parte, la erosión marina asociada al oleaje y la gelificación, afecta las rocas expuestas, proporcionando un abundante material abrasivo. En consecuencia, la actividad glacial, la abrasión y la deflación han modelado una geomorfología litoral y submarina compleja.

La morfología submarina del Pacífico frente a la Antártica occidental comprende la región ubicada entre los 60° W a 130° W y los 45° a 70° S.

La porción cercana al continente no es fácil de reconocer, debido a la presencia casi permanente de hielos flotantes. Sin embargo, se sabe que la Plataforma Continental es única al ser comparada con

las de otras latitudes, debido a la acción de los hielos que fluyen directamente al mar. Su profundidad es mayor que la mayoría de las existentes, alcanzando incluso 545 m al sur de la isla Alejandro I. El talud continental es extremadamente empinado, con pendientes del orden de 11° y un ancho que varía desde los 20 a 40 km. Las irregularidades de carácter menor presentes en los contornos del talud parecen ser el resultado de derrumbes submarinos que se habrían iniciado por la inestabilidad del voluminoso abastecimiento de materiales glaciales (Anderson, 1990).

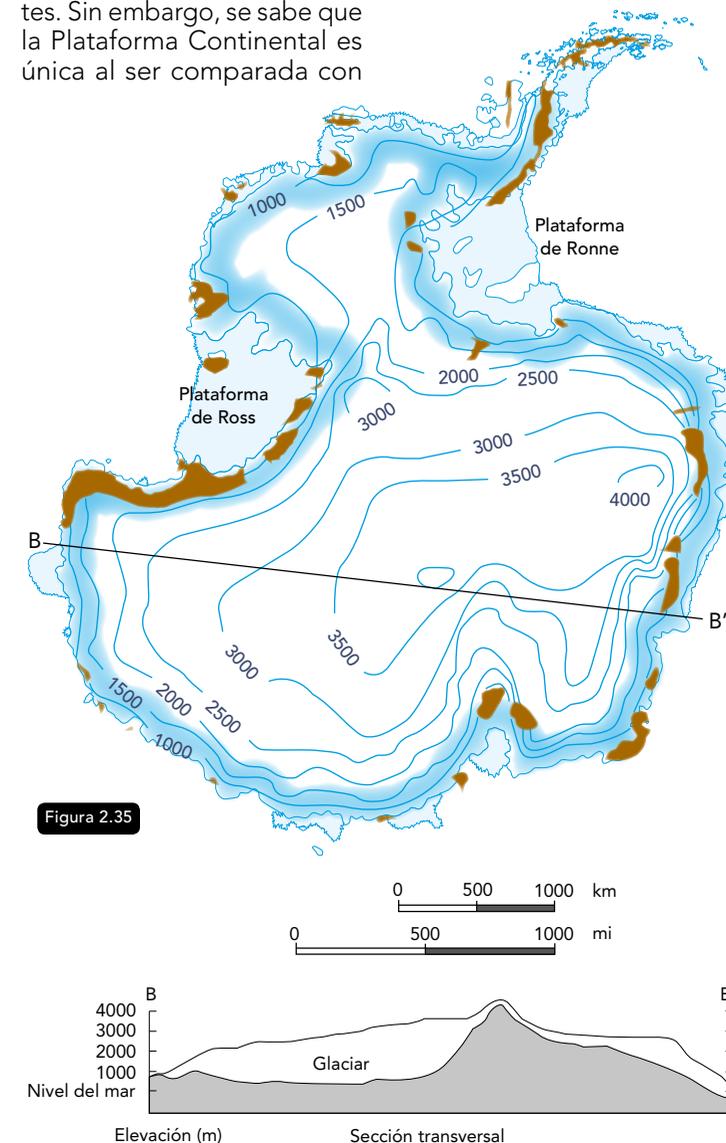


Figura 2.35:

Topografía de la Antártica.

(Adaptado de Pub. SHOA 3035).

La elevación continental presenta un extraordinario desarrollo a lo largo de casi la totalidad del margen antártico, excepto al norte de la zona de fractura Hero, donde se presenta un accidentado paisaje de montañas y colinas submarinas que terminan en el borde de la fosa de las Shetland del Sur. A su vez, entre la zona de fractura Hero y Tula, esta elevación se encuentra interrumpida por la elevación Palmer. Al sur de la zona de fractura Tula, la elevación se extiende hasta el contorno de las 2500 brazas y su gradiente disminuye suavemente hacia las zonas más profundas. En esta zona se destaca el Guyot De Gerlache, de considerables dimensiones al norte de la isla Pedro I, encontrándose su cúspide a 391 m de profundidad.

La elevación continental, a su vez, se puede dividir en tres regiones. La subdivisión más profunda es la más grande y regular, en la cual se destacan grandes fans con suaves declives, incisos en una cubierta abisal de sedimentos terrígenos depositados por corrientes de turbidez. La subdivisión central se caracteriza por un aumento del declive y por su irregularidad. Su ancho varía de 100 a 200 km, presentando numerosos canales submarinos. Finalmente, la subdivisión superior es un angosto cinturón caracterizado por una inclinación y un relieve más o menos suave, disectado y caótico de acuerdo con cada región que la constituye.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- ANDERSON, J. B. (1990). Geology and hydrocarbon potential of the Antarctic continental margin. *Mineral Resources Potential of Antarctica, Antarct. Res. Ser.*, 51, 175-201.
- ARAYA-VERGARA, J. (1971). «Bases geomorfológicas para una división de las costas de Chile». *Revista investigaciones Geográficas*. Número 18.
- ARMIJO, R., R. RAULD, R. THIELE, G. VARGAS, J. CAMPOS, R. LACASSIN, & E. KAUSEL (2010). The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics* 29, TC2007, doi: 10.1029/2008TC002427.
- BEYÁ, J., P. WINCKLER & M. MOLINA (2013). *Inundaciones costeras, más allá de los tsunamis*. An. Inst. Ing. Chile, 125(2), 63-81 (Incluido en Revista Chilena de Ingeniería N° 469).
- BEYÁ, J., M. ÁLVAREZ, A. GALLARDO, H. HIDALGO, C. AGUIRRE, J. VALDIVIA, C. PARRA, L. MÉNDEZ, C. CONTRERAS, P. WINCKLER & M. MOLINA (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- BORGEL, R. (1982). *Geomorfología*, volumen II, Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- CARENA, S. (2011). Subducting-plate Topography and Nucleation of Great and Giant Earthquakes along the South American Trench, *Seism.Res. Lett.*, September/October, v. 82.
- CARVAJAL, M., M. CONTRERAS-LÓPEZ, P. WINCKLER, & I. SEPÚLVEDA (2017). Meteotsunamis occurring along the southwest coast of South America during an intense storm. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3313-3323.
- CEPAL (2011). *Panorama social de América Latina*. Publicación de las Naciones Unidas. Santiago de Chile: 253 pp.
- CHURCH, J. A., & N. J. WHITE (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in geophysics*, 32(4-5), 585-602.
- CHURCH, J.A., P.U. CLARK, A. CAZENAVE, J.M. GREGORY, S. JEVREJEVA, A. LEVERMANN, M.A. MERRIFIELD, G.A. MILNE, R.S. NEREM, P. D. NUNN, A.J. PAYNE, W.T. PFEFFER, D. STAMMER, & A.S. UNNIKRIISHNAN (2013). *Sea level change. Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- CIESIN (2013). Center for International Earth Science Information Network, Columbia University, and Information Technology Outreach Services (ITOS)/University of Georgia; Global Roads Open Access Data Set, Version 1 (gROADSv1). Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Disponible en <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/groads-global-roads-open-access-v1>
- CONTRERAS, M., P. WINCKLER & M. MOLINA (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros; Instituto de Ingenieros de Chile: Santiago, Chile*, 124, 54-66.
- EMDAT (2017). *The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, School of Public Health, Université Catholique de Louvain*. Available at: www.emdat.be (Accessed 14 March 2017).
- FIERRO, J.; M. BRAVO & M. CASTILLO (2000). Caracterización del régimen de mareas y corrientes a lo largo del canal Moraleda (43 54'S-45 17'S). *Ciencia y Tecnología del Mar*, 23: 3-14.
- GUNTHER, E. R. (1936). A report on oceanographical investigations in the Peru coastal current. *Discovery Rep.*, 13, 107-276.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR (1988). Atlas geográfico de Chile: para la educación. IGM.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS -INE (2016). *Medio Ambiente, Informe anual 2016* (Período de información: 2011-2015): 204 pp.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS -INE (2018). *Síntesis de resultados. Censo 2017*: 27 pp.

- KONOW, D. (1976) *Variaciones estacionales del transporte de volumen y velocidad geostrófica entre Valparaíso (71° 40' W) y los 78° W*. Tesis Escuela de Pesquerías y Alimentos, Universidad Católica de Valparaíso: 130 pp.
- LOMNITZ, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seism. Res. Lett.* May/June V75, N3.
- MARTÍNEZ, C., M. CONTRERAS-LÓPEZ, P. WINCKLER, H. HIDALGO, E. GODOY, & R. AGREDANO (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard? *Ocean & Coastal Management*, 156, 141-155.
- MCGRANAHAN, G., D. BALK, & B. ANDERSON (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and urbanization*, 19(1), 17-37.
- MELÉNDEZ, A. & B. MELÉNDEZ (1981). *Geología*. Thomson-Paraninfo (Ed.), España.
- MINSTER, J. B., T. H. JORDAN, P. MOLNAR, & E. HAINES (1974). Numerical modelling of instantaneous plate tectonics. *Geophysical Journal International*, 36(3), 541-576.
- MORALES, E. (2014). Miradas al territorio submarino de Chile. Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile: 77 pp.
- PUGH, D. (2004). *Changing sea levels: effects of tides, weather and climate*. Cambridge University Press.
- RIGNOT, E., I. VELICOGNA, MR. VAN DEN BROEKE, A. MONAGHAN, & J. LENAERTS (2011) Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys Res Lett* 38:L05503. doi: 10.1029/2011GL046583.
- SEPÚLVEDA, S. & A. SEREY (2009). Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aysén earthquake, southern Chile (45.5°S). *Andean Geology* 36 (1): 131-136.
- SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA -SHOA (2002). *Glosario de mareas y corrientes*. Pub. SHOA 3013, 3a edición: 59 pp.
- SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA- SHOA (2010). *Derrotero de la Costa de Chile. Volumen IV. Estrecho de Magallanes y aguas adyacentes*. Pub. SHOA 3006. 10ª edición: 378 pp.
- SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA- SHOA (2012). *Derrotero de la Costa de Chile. Volumen II. Desde Canal Chacao hasta Golfo de Penas*. Pub. SHOA 3002, 8a. edición: 636 pp.
- SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA- SHOA (2015). *Instrucciones Generales de Pilotaje en Aguas del Territorio Chileno Antártico*. Pub. SHOA 3035, 2a. edición.
- SISTEMA DE EMPRESAS - SEP (2006). *Modernización portuaria en Chile*. Bitácora 1998-2005.
- STEWART, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography* (pp. 1-342). College Station: Texas A & M University.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2009). *Office of Water and Office of Research and Development, Washington, DC*, p. 90.
- USEPA, 2009 U.S. *Environmental Protection Agency National Lakes Assessment: A Collaborative Survey of the Nation's Lakes*. EPA 841-R-09-001
- VARGAS, G., M. FARÍAS, S. CARRETIER, A. TASSARA, S. BAIZE, & D. MELNICK (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 38(1).
- WOOSTER, W. S., & H. A. SIEVERS (1970). Seasonal Variations of Temperature, Drift, and Heat Exchange in Surface Waters Off the West Coast of South America 1. *Limnology and Oceanography*, 15(4), 595-605.
- WYSS, M. (1976). Local changes of sea level before large earthquakes in South America. *Bulletin of the seismological society of America*, 66(3), 903-914.

LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA Y COSTERA

Páginas 76 - 97

3.1 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS OBRAS MARÍTIMAS

De acuerdo con las «Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas», conocidas como ROM (P.P.EE., 2009), las obras marítimas, según su función, se clasifican en:

- obras de abrigo;
- obras de atraque;
- obras de amarre y fondeo;
- obras de gestión y protección del litoral;
- plataformas exteriores;
- conducciones submarinas;
- obras de dragado y relleno;
- obras de construcción y reparación de buques y flotadores.

En función de sus respuestas ante las acciones ambientales, las obras marítimas se clasifican también en obras fijas de gravedad, fijas estructurales y flotantes. Las obras fijas de gravedad son aquellas cuya estabilidad se basa en el peso de los elementos que las constituyen. Las obras fijas estructurales están construidas con elementos que se deforman para resistir y transmitir las cargas al terreno. Las obras marítimas flotantes son aquellas que cumplen su función estando a flote o fondeadas.

La Tabla 3-1 presenta una definición de algunos tipos de obras marítimas, de acuerdo con su función y su respuesta ante las acciones ambientales.

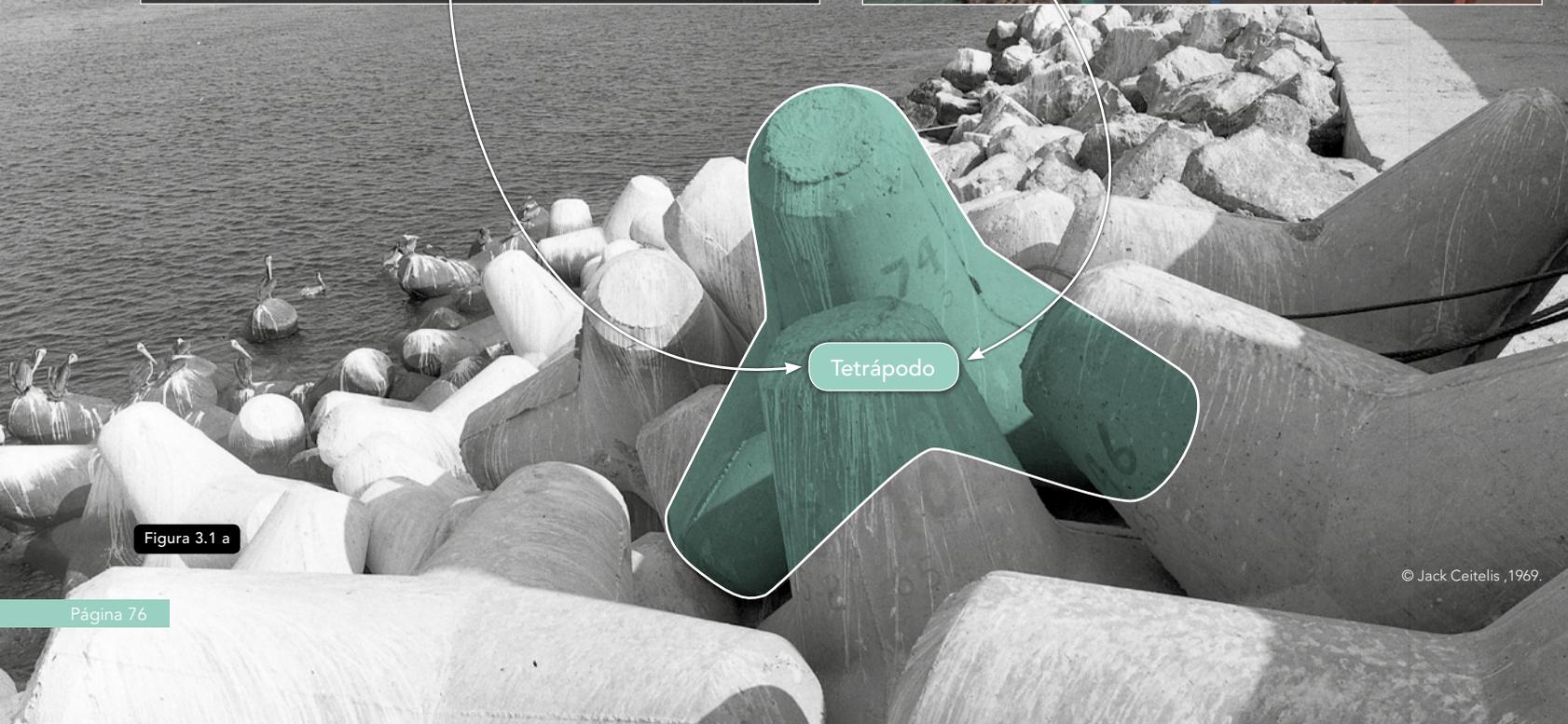
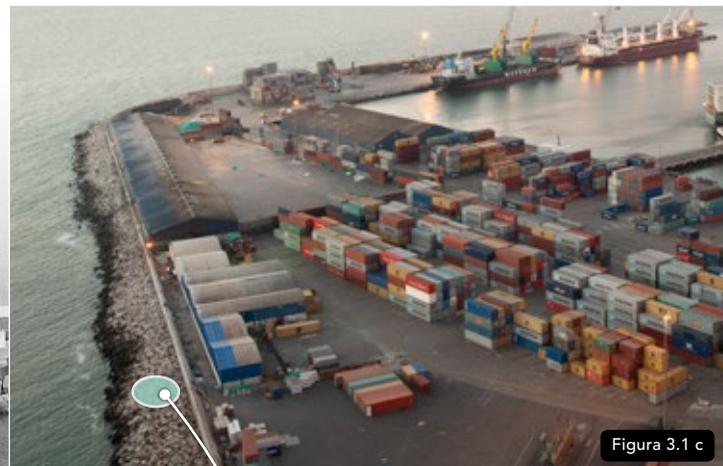


Figura 3.1:

Construcción del molo de abrigo del puerto de Arica constituido por una coraza de tetrápodos.

(Fotos a y b: J. Ceitelis / www.enterrreno.com; Foto c: L. Bustos / Directemar).

3.1.1 Obras de abrigo

Las obras de abrigo cumplen la función de reducir la acción del oleaje y, eventualmente, del viento. Estas protegen así las distintas partes que conforman una instalación portuaria, como las zonas de aproximación, acceso, maniobras y atraque de embarcaciones. En la Figura 3.1 se muestra el molo de abrigo del puerto de Arica, construido en 1960 por la empresa constructora Pei y Belfi Ltda. (Ossa, 1964).

3.1.2 Obras de atraque

De acuerdo con las ROM (PP. EE., 2012:33), el objetivo fundamental de las obras de atraque, amarre y fondeo:

[...] es proporcionar a los buques unas condiciones adecuadas y seguras para su permanencia en puerto y/o para que puedan desarrollarse las operaciones portuarias necesarias para las actividades de carga, estiba, desestiba, descarga y transbordo, así como embarque y desembarque de pasajeros, vehículos y mercancías que permitan su transferencia entre buques o entre estos y tierra u otros medios de transporte.

En este tipo de obras «las oscilaciones del mar no suelen ser las acciones predominantes, ya que, al estar generalmente situadas en zonas abrigadas, la carga predominante suele estar producida por las operaciones del buque, por las instalaciones de carga y descarga o por el terreno» (P.P.E.E., 2009: 76). En la Figura 3.2 se muestra un muelle mecanizado en puerto Coloso, al sur de Antofagasta, (Región de Antofagasta), cuyo objetivo es exportar concentrado de cobre de la minera La Escondida.

OBRAS DE ABRIGO	TIPO
Diques rompeolas de escollera o piezas prefabricadas	Fijas de gravedad
Diques verticales mediante cajones flotantes, bloques y hormigón en masa	Fijas de gravedad
Diques mixtos de escollera y cajones flotantes	Fijas de gravedad
Diques mixtos especiales	Fijas de gravedad
Pantallas delgadas, permeables o impermeables, verticales o inclinadas	Fijas estructurales
Pantallas múltiples	Fijas estructurales
Diques de recintos de tablestacas	Fijas estructurales
Grupos de neumáticos	Flotantes
Pontonas	Flotantes
Campos de boyas	Flotantes
Pantallas flotantes	Flotantes
OBRAS DE ATRAQUE	
Muelles de cajones flotantes, bloques de hormigón o de hormigón en masa	Fijas de gravedad
Muelles de pantallas ancladas o muros en «L»	Fijas estructurales
Muelles o pantalanos sobre pilotes	Fijas estructurales
Muelles de tablestacas, recintos tablestacados u otros elementos prefabricados	Fijas estructurales
Pontonas-pantalanes flotantes	Flotantes
OBRAS DE GESTIÓN Y PROTECCIÓN DEL LITORAL	
Muros, revestimientos y taludes de elementos granulares o prefabricados	Fijas de gravedad
Espigones perpendiculares a la costa y exentos de elementos granulares	Fijas de gravedad
Paseos marítimos con corazas de roca u hormigón.	Fijas de gravedad
Protecciones de tubería submarina mediante elementos granulares	Fijas de gravedad
Muros en «L», pantallas ancladas	Fijas estructurales
Espigones de madera o metal	Fijas estructurales
Paseos marítimos como muro estructural	Fijas estructurales
Pontonas	Flotantes
Campos de boyas	Flotantes
OBRAS DE AMARRE Y FONDEO	
Diques de Alba en cajones flotante	Fijas de gravedad
Diques de Alba con pilotes aislados o grupos de pilotes	Fijas estructurales
Monoboyas	Flotantes
Sistemas de cadenas	Flotantes
PLATAFORMAS EXTERIORES	
Plataformas tipo «Ekofisk»	Fijas de gravedad
Plataformas izadas	Fijas estructurales
Plataformas pilotadas	Fijas estructurales
Plataformas lastradas	Flotantes
Plataformas atirantadas	Flotantes
Plataformas ancladas	Flotantes
Plataformas mixtas	Flotantes

Tabla 3-I:

Tipos de obras marítimas de acuerdo con su función y su respuesta ante las acciones ambientales.

(Adaptado de ROM 2.0-11 (P.P.E.E., 2009)).

Tabla 3-I



Figura 3.2

Figura 3.2:

Muelle mecanizado de atraque para buques graneleros en el terminal Coloso, al sur de Antofagasta. La estructura es completamente metálica. (Foto: P. Winckler).

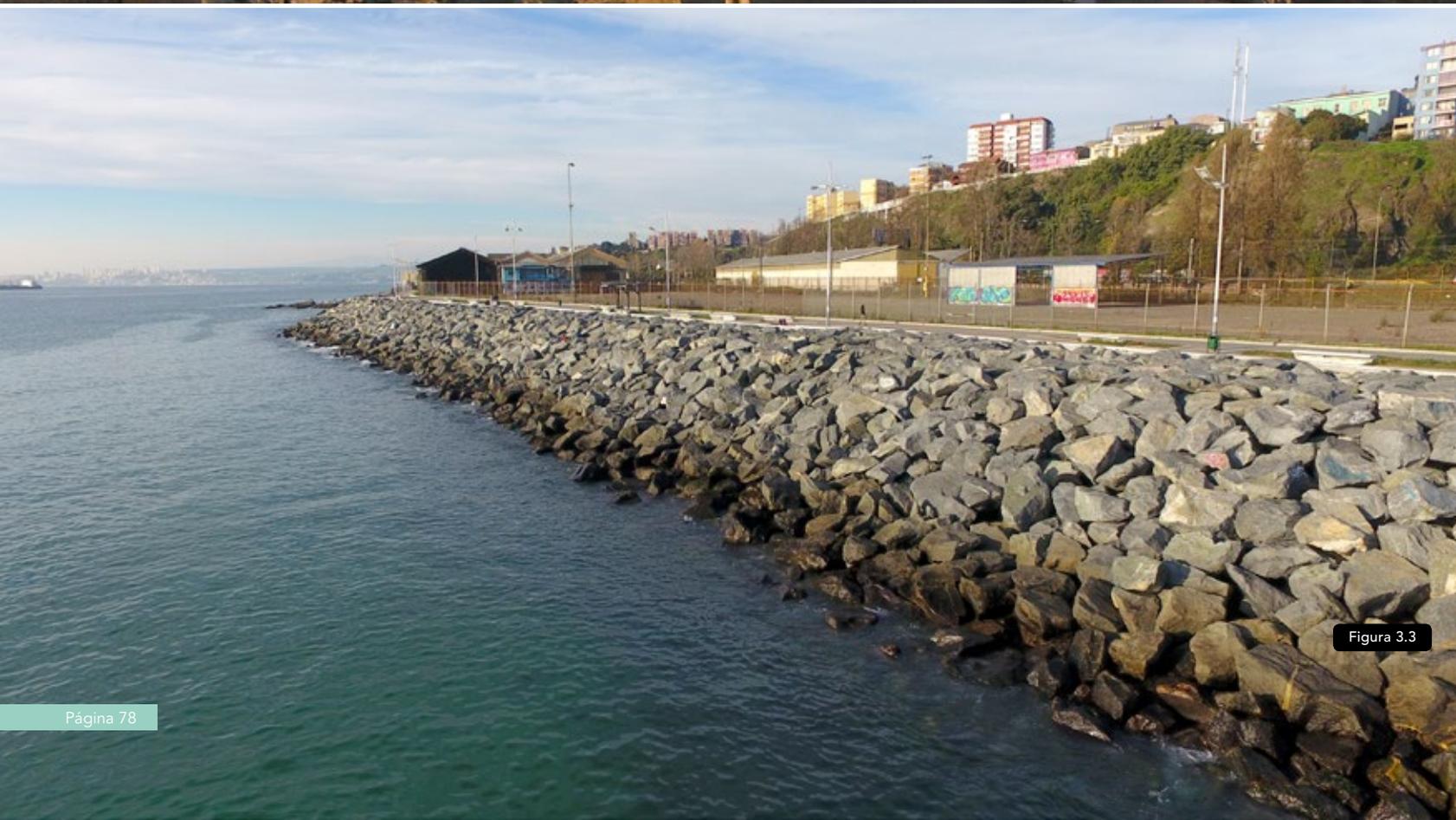


Figura 3.3

Figura 3.3:

Defensa costera del paseo Wheelwright, en Valparaíso. La escollera está constituida por un talud de rocas y filtros interiores que en su conjunto dan soporte a la explanada. (Foto: P. Winckler).

Figura 3.4:

Muelle flotante de hormigón armado en Puerto Cisnes, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para conectividad marítima de barcasas.

(Foto: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias).



Figura 3.4

Figura 3.5:

Sifón de captación de agua de refrigeración para la central termoeléctrica de AES GENER, en la bahía de Quintero, Región de Valparaíso. La persona frente al sifón permite dimensionar el tamaño de la obra.

(Foto: P. Winckler).



Figura 3.5

3.1.3 Obras de gestión y protección del litoral

Las obras de gestión y protección del litoral tienen el objetivo de proteger asentamientos establecidos en/o cerca de la costa, o para proteger la costa misma, contra el embate de los agentes oceánicos (Salles & Silva, 2004). Estas obras pueden ser diseñadas en forma perpendicular a la costa, con el objetivo de detener intensas erosiones, en forma paralela a la misma, para proteger instalaciones; o bien de formas intermedias. La elección de la solución adecuada se realiza sobre la base de la evaluación del costo-beneficio y del criterio de los encargados de adoptar las decisiones. La Figura 3.3 muestra la defensa costera del paseo Wheelwright, en Valparaíso, cuyo objetivo es dar soporte al paseo y a terrenos portuarios ganados al mar.

3.1.4 Conducciones submarinas

Las conducciones submarinas regulan sistemas de captación de agua de mar para usos industriales y descargas de diferentes tipos de vertidos. Entre las descargas se encuentran los vertidos de aguas servidas mediante emisarios submarinos; de agua caliente proveniente de sistemas de refrigeración de termoeléctricas; de agua fría proveniente de sistemas de regasificación, salmuera generada por plantas desaladoras y de residuos industriales líquidos (RILes). En la Figura 3.5 se muestra un sifón de captación de agua de refrigeración para la central termoeléctrica de AES GENER, en la bahía de Quintero.

3.2 DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS

El ciclo de vida de una obra marítima contempla el diseño, la construcción, la operación, la conservación y la remoción final de esta, una vez que ha cumplido con su función. Como es común en la ingeniería civil, en la etapa de diseño, se recurre a diversas recomendaciones de obras marítimas a nivel mundial, las cuales han sido utilizadas indistintamente en el ámbito de la ingeniería chilena, dependiendo del contexto histórico en cuestión.

La Figura 3.6 propone una lista de algunas de las variables que se deben tener en cuenta cuando se desarrolla un proyecto de obras marítimas. Esta clasificación considera variables de explotación, atmosféricas, oceanográficas, morfológicas que, junto a otras, como las hidrológicas, jurídicas, ambientales y sociales, condicionan cada proyecto en particular. Naturalmente, la importancia relativa de cada una de estas variables depende del proyecto en particular. Por ejemplo, una obra ubicada en las costas abiertas del norte de Chile probablemente esté sometida a cargas predominantes de oleaje, tsunamis y sismo, en tanto que una obra ubicada en la zona de los canales puede estar condicionada por el régimen de mareas, las corrientes y los vientos lo-

cales. Lo interesante es que las obras marítimas no son replicables, pues dependen mucho de las condiciones locales (site-specific) y, por lo tanto, requerirán de estudios de campo, cuyo objetivo será caracterizar las variables dominantes utilizadas en su diseño.

Las recomendaciones de diseño de obras marítimas cubren los aspectos hidráulicos, estructurales, geotécnicos, constructivos, de operación y ambientales. Actualmente, los estándares y recomendaciones que se utilizan en Chile son:

- Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras¹ (Chile).
- Instrucciones Hidrográficas y Oceanográficas del SHOA² (Chile).
- Recomendaciones de obras marítimas, ROM³ (España).
- Technical standards and commentaries for port and harbor facilities, OCDF⁴ (Japón).
- Coastal engineering manual, CEM⁵ (EE. UU.).
- Estándares del American Petroleum Institute, API⁶ (EE. UU.).
- Estándares del British Standards Institution⁷ (Reino Unido).
- Estándares del PIANC⁸, World Association for Waterborne Transport Infrastructure (Bélgica).
- Estándares de Det Norske Veritas⁹ (Noruega).
- The Rock Manual, CIRIA-CUR¹⁰ (Francia, Países Bajos y Reino Unido).

Figura 3.6

EXPLOTACIÓN	ATMOSFÉRICAS	OCEANOGRÁFICAS	MORFOLÓGICAS
MERCANCÍA	TEMPERATURA	NIVEL DEL MAR	TOPOGRAFÍA
EMBARCACIÓN	PRESIÓN ATMOSFÉRICA	OLEAJE	BATIMETRÍA
MAQUINARIA	NUBOSIDAD	ONDAS LARGAS	SUELO
TRANSPORTE	VIENTO	TSUNAMI	SEDIMENTO
ACCESO		MAREA ASTRONÓMICA	MORFODINÁMICA
		MAREA METEOROLÓGICA	SISMO
		CORRIENTE	

Figura 3.6:

Variables fundamentales utilizadas en el diseño de obras marítimas.

(Elaboración propia).

¹ Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras (Chile).



² Instrucciones Hidrográficas y Oceanográficas del SHOA (Chile).



³ Recomendaciones de obras marítimas, ROM (España).



¹ <http://www.dop.cl/seminarios/Paginas/Inicio2.aspx>

² <http://www.shoa.cl/php/descargas.php?tipo=gratuita>

³ <http://www.puertos.es/es-es/ROM>

⁴ <http://ocdi.or.jp/en/technical-st-en>

⁵ <http://www.a-jacks.com/Coastal/GeneralInfo/CEM/CEM.aspx>

⁶ <https://www.api.org/Standards/>

⁷ <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Series?UPI=BS%206349>

⁸ <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/>

⁹ <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf>

¹⁰ <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/>

Estas recomendaciones no tienen carácter normativo y por lo tanto su uso queda a criterio del equipo que diseñe el proyecto o a la contraparte que en proyectos públicos usualmente es el Ministerio de Obras Públicas (MOP). Naturalmente, esta lista es solo una muestra de la diversidad de filosofías de diseño y de la necesidad de conocimiento específico requerido para diseñar obras marítimas.

Existen además publicaciones científicas que sirven de apoyo al diseño, como:

- Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE).
- Journal of Ocean Engineering and Science (Elsevier).
- Ocean Engineering (Elsevier).
- Coastal Engineering (Elsevier).
- Ocean & Coastal Management (Elsevier).
- Applied Ocean Research (Elsevier).
- Coastal Management (Taylor & Francis).
- Coastal Engineering Journal (World Scientific).
- Water and Maritime Engineering (ICE).
- Journal of Coastal Research (CERF).

Figura 3.7:

Modos de fallo geotécnicos en muelles gravitacionales.

(Adaptado de ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005)).

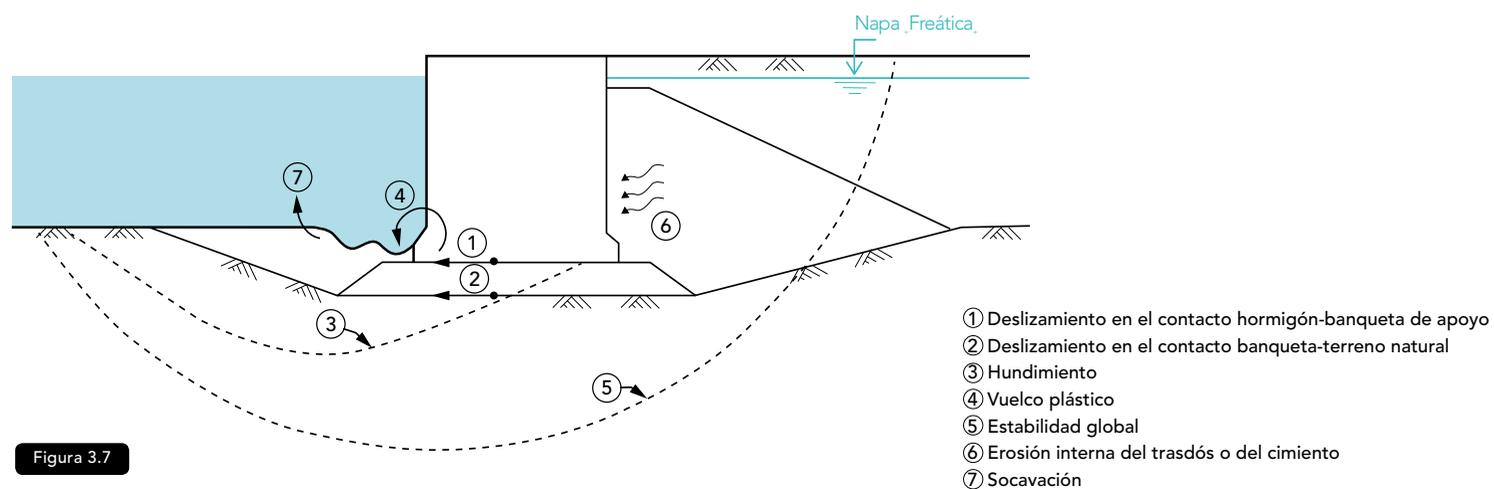
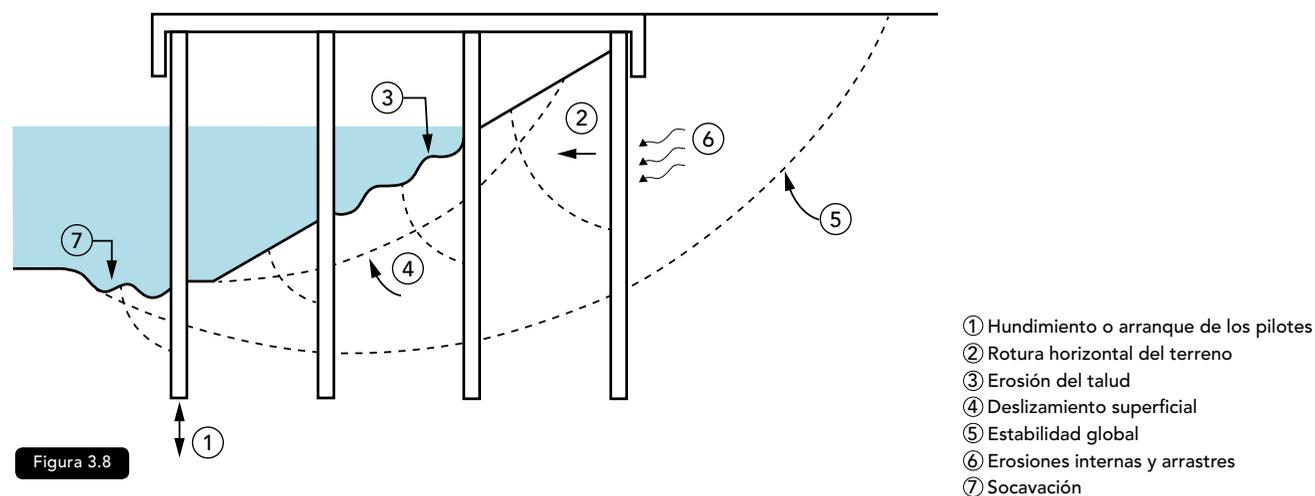


Figura 3.8:

Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes.

(Adaptado de ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005)).



Se cuenta además con otros documentos generados en universidades, como los Documentos de referencia del GIOC, de la Universidad de Cantabria, o la serie «Advanced Series on Ocean Engineering»¹¹.

El diseño de las obras marítimas se basa en la evaluación de los modos de fallo de cada tipología, los que difieren según sean fijas de gravedad, fijas estructurales o flotantes. Las «Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias», ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005), presentan una lista extensiva de los modos de fallo de origen geotécnico e hidráulico (o una combinación de ambos), a los que hay que adicionar aquellos de tipo estructural, generados por eventuales excedencias en las cargas de diseño, fatigas de material y pérdida de las características mecánicas de los materiales por obsolescencia. Los modos de fallo se ilustran para muelles gravitacionales (Figura 3.7), muelles de pilotes (Figura 3.8), muelles de tablestacas (Figura 3.9), muelles de recintos de tablestacas (Figura 3.10), rompeolas en talud (Figura 3.11) y rompeolas verticales (Figura 3.12). En estas figuras, solamente se incluyen modos de rotura de tipo geotécnico, esto es, controlados principalmente por las características del terreno.

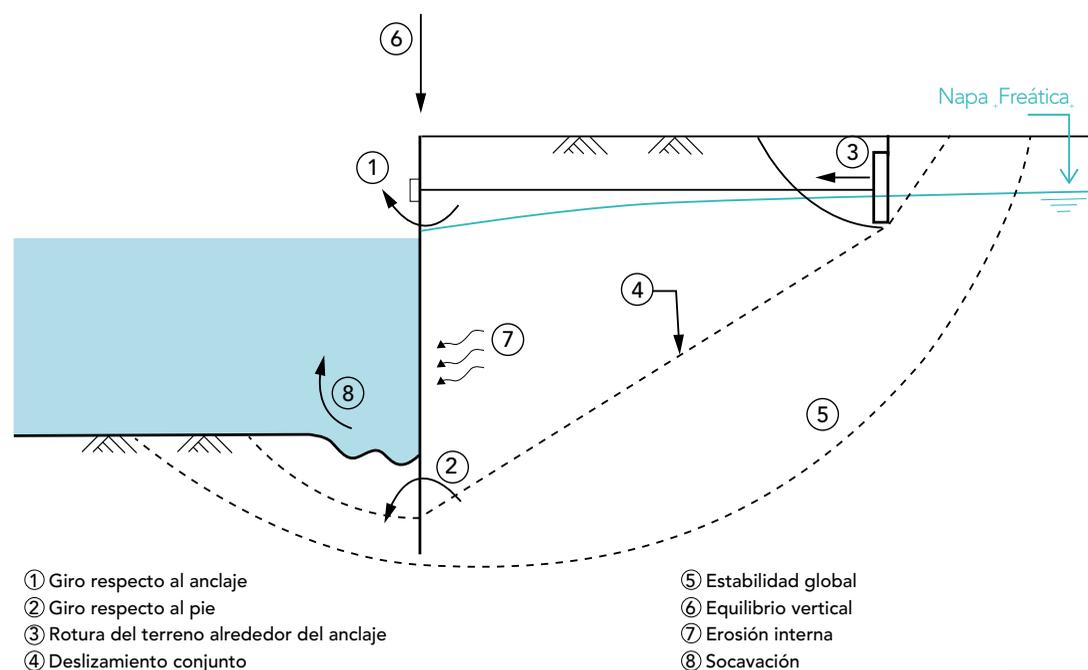


Figura 3.9

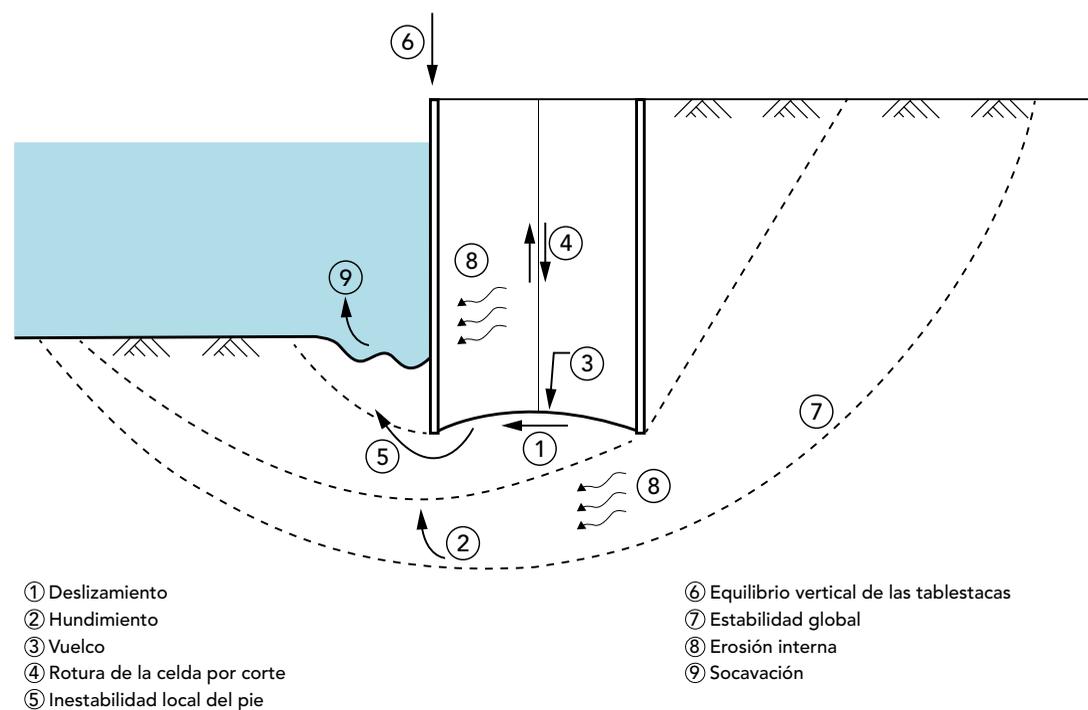


Figura 3.10

Figura 3.9:

Modos de fallo geotécnicos en muelles de tablestacas.

Existen otros modos de rotura que implican el agotamiento estructural de la pantalla, de sus anclajes, de sus uniones, etc., que no se consideran aquí ya que son de tipo estructural.

(Adaptado de ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005)).

Figura 3.10:

Modos de fallo geotécnicos en muelles de recintos de tablestacas.

(Adaptado de ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005)).

¹¹ <https://www.worldscientific.com/series/asoe>

Figura 3.11:

Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos en rompeolas en talud.

(Adaptado de ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005)).

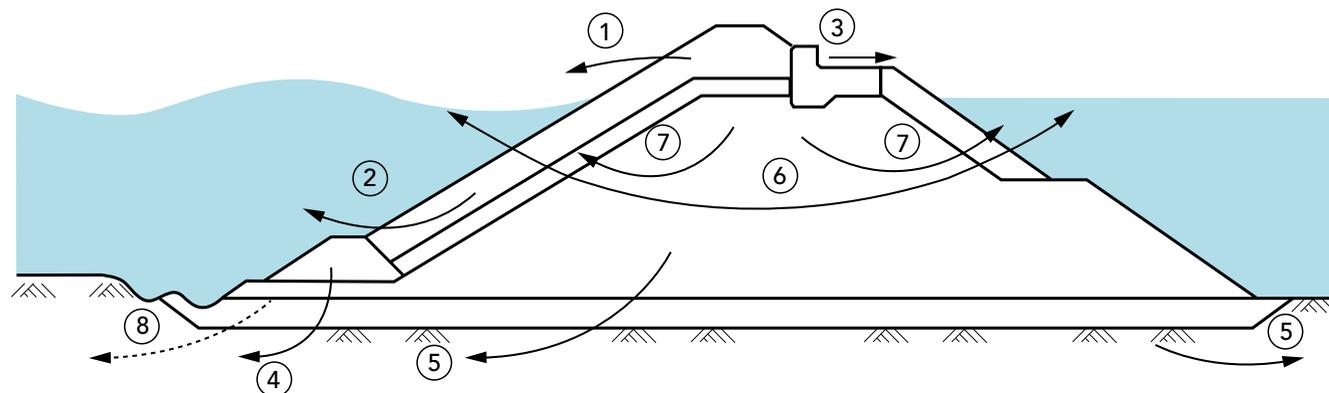


Figura 3.11

- | | |
|--|------------------------------------|
| ① Rotura de la coraza y pérdida de bloques de protección | ⑤ Estabilidad global |
| ② Deslizamiento superficial de la coraza | ⑥ Erosión interna |
| ③ Estabilidad del parapeto | ⑦ Estabilidad del núcleo del dique |
| ④ Estabilidad de la berma | ⑧ Socavación del fondo natural |

Figura 3.12:

Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos en rompeolas verticales.

(Adaptado de ROM 0.5-05 (PP.EE., 2005)).

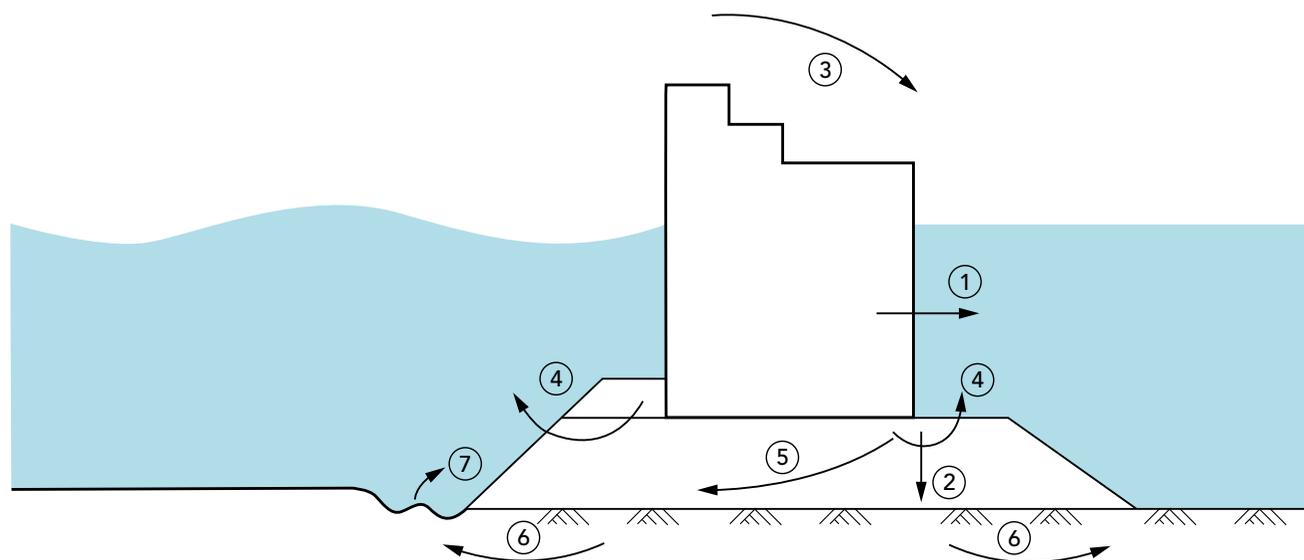


Figura 3.12

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| ① Deslizamiento horizontal | ⑤ Rotura de la banqueta |
| ② Hundimiento y plastificación local | ⑥ Estabilidad global |
| ③ Vuelco plástico | ⑦ Socavación del fondo |
| ④ Socavación del pie | |

3.3 CONSTRUCCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS

Las obras marítimas son caras y de compleja construcción, pues se insertan en un ambiente físico y biogeoquímico agresivo que tiende a limitar su vida útil. En la mayoría de los casos, los trabajos se realizan sobre y bajo el agua, lo que requiere de maquinaria especializada, materiales resistentes a la salinidad y buzos es-

pecialmente entrenados para efectuar trabajos complejos, como la soldadura submarina. Las variaciones cíclicas de la marea modifican las condiciones constructivas, limitando, en ocasiones, los trabajos durante pleamares relativamente altas.

Eventualmente, las marejadas pueden generar complejidad en las condiciones de trabajo o suspensión de las faenas, lo que se minimiza con sistemas de pronóstico local como el desarrollado por la escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la



Figura 3.13

Figura 3.13:

Elementos de hormigón en fase de construcción para un rompeolas en el puerto de Misaki, Japón.

(Foto: P. Winckler).

Universidad de Valparaíso. El acceso desde tierra o mar suele ser dificultoso y usualmente existe escaso espacio para acopio de materiales e instalaciones de faenas. También es difícil controlar el acceso a sitios de trabajo. La construcción de obras marítimas es una disciplina que requiere de aprendizaje en terreno, experiencia y conocimiento específico de los métodos constructivos (Figura 3.13). Una excelente referencia introductoria es la «Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas» (PP.EE., 2008). La cual puede descargarse mediante el código QR de esta página.

3.4 OBRAS DE GESTIÓN Y PROTECCIÓN DEL LITORAL

Para la gestión y protección del litoral se han utilizado una variedad de métodos que se clasifican en «no estructurales», aquellos orientados a la estabilización de la costa, y «métodos estructurales», que requieren obras de ingeniería.

3.4.1 Métodos no estructurales

3.4.1.1 GESTIÓN DEL RETROCESO DE COSTA

La necesidad de protección costera puede reducirse mediante usos de terrenos que no estén sujetos a erosión, inundación y daño por las marejadas. Este tipo de medidas se denominan «métodos pasivos». Cuando el retroceso de la costa es evidente, toda nueva construcción debiera situarse a una distancia prudente de la línea costera. Esto se calcula, como primera estimación, multiplicando la tasa anual de erosión a largo plazo por el número de años de seguridad contra la erosión que se considere apropiado o aceptable. Este método se denomina gestión del retroceso de costa (*shoreline retreat management*), y resulta eficaz en terrenos sin desarrollo urbano. Además, puede complementarse con técnicas de modelación física y numérica bastante más sofisticadas. También puede utilizarse en instrumentos de ordenamiento territorial, exigiendo que

los edificios se emplacen a prudente distancia de la línea costera. En las zonas densamente urbanizadas, este método tiene poca aplicación, salvo en aquellos casos en que se tenga el propósito de modificar las modalidades de uso del suelo.

Otra forma, denominada «métodos activos», considera el traslado de las estructuras a una distancia prudente de la línea costera. Este procedimiento se evalúa en función de las características y costos relacionados con cada estructura. Por su parte, el uso de vegetación es uno de los pocos métodos no estructurales capaces de controlar o retardar la erosión. Estos métodos comprenden la estabilización de dunas y pendientes mediante plantaciones, o la creación de marismas salobres para absorber la energía del oleaje. En muchos casos se aplican en conjunto con los métodos estructurales; como, por ejemplo, cuando un muro de contención, usado para estabilizar la base de un acantilado, se complementa con plantaciones para controlar la erosión debido al escurrimiento de la superficie y el efecto de las olas. La creación artificial de ciénagas a lo largo de costas con oleaje de poca energía, como las de las bahías y los estuarios, es también una manera eficaz de controlar la erosión.

3.4.1.2 ALIMENTACIÓN ARTIFICIAL DE PLAYAS

Una solución económica a los problemas de la erosión costera consiste en la alimentación artificial de arena desde terrenos de empréstito, idealmente ubicados en las cercanías del sitio para reducir el costo y el impacto ambiental del proyecto. La transferencia de arena puede hacerse hidráulicamente mediante dragas móviles o fijas, barcazas o camiones que transporten la arena al lugar deseado. A diferencia de las soluciones estructurales, la alimentación artificial beneficia a las zonas costeras deriva abajo del emplazamiento. En algunos casos una sola operación de alimentación no basta para solucionar el problema de erosión, lo que hace preciso efectuar alimentaciones periódicas. La rentabilidad social del proyecto, en dicho caso, es en

Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas.



función del costo de construcción inicial, del mantenimiento de una estructura fija y del costo de la alimentación periódica.

La alimentación artificial se combina con espigones para generar playas artificiales, solución que se ha implementado en ciudades costeras, como Arica, Tocopilla, Antofagasta, y en asentamientos lacustres, como Villarrica. La Figura 3.14 muestra la fase final de construcción de la playa El Salitre, en Tocopilla, que concluyó en el 2018.

Antes de utilizar arenas de algún sitio de empréstito para combatir la erosión de una playa o para la generación de una nueva, se deben estudiar las características de dicha arena. La arena de empréstito debe tener una granulometría similar a la playa erosionada para que permanezca estable. Si es de grano muy fino, la arena será arrastrada fuera de la playa durante las marejadas. Si es de grano demasiado grueso, puede aumentar la pendiente de la playa y, eventualmente, modificar las condiciones de rotura.

La arena de empréstito también debe responder a los requisitos funcionales como el tamaño, la forma, el color y el olor. Las arenas extraídas de un lecho fluvial, por ejemplo, suelen contener una fracción de material orgánico y, por lo tanto, tener un olor

desagradable. Las playas de arena fina y redondeada, de color blanco o dorado, suelen ser más apreciadas. Con todo, la definición del tipo de alimentación artificial obedece a un riguroso estudio de ingeniería que se detalla en el texto «Regeneración de Playas», del GIOC (2002).

Las fuentes de arena pueden ser arenales costeros, bahías, lagunas, campos de dunas, el mismo lecho marino o zonas de acumulación en ensenadas. En caso de que un sitio de empréstito sea idóneo para la extracción, debe evitarse que la remoción cause daños ecológicos, no altere el patrón de propagación del oleaje, ni la dinámica del banco de arenas.

El volumen de arena necesario para un proyecto de alimentación depende del perfil de la playa a intervenir; de la cantidad necesaria para compensar la erosión durante la vida útil del relleno; del porcentaje de relleno, cuya granulometría sea de menor tamaño que la arena estable y de la frecuencia de la realimentación. Es común que la arena de relleno se descargue directamente en la playa y se distribuya con retroexcavadoras. Una vez dispuesta la arena, las partículas forman una pendiente dinámicamente estable que se adapta a la combinación del oleaje y al régimen mareal.



Figura 3.14:

Construcción de la playa El Salitre, en Tocopilla. La playa contempla espigones de retención de arena y arena blanca para la alimentación artificial. Antes de su construcción, la playa representaba niveles altos de contaminación.

(Foto: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias).

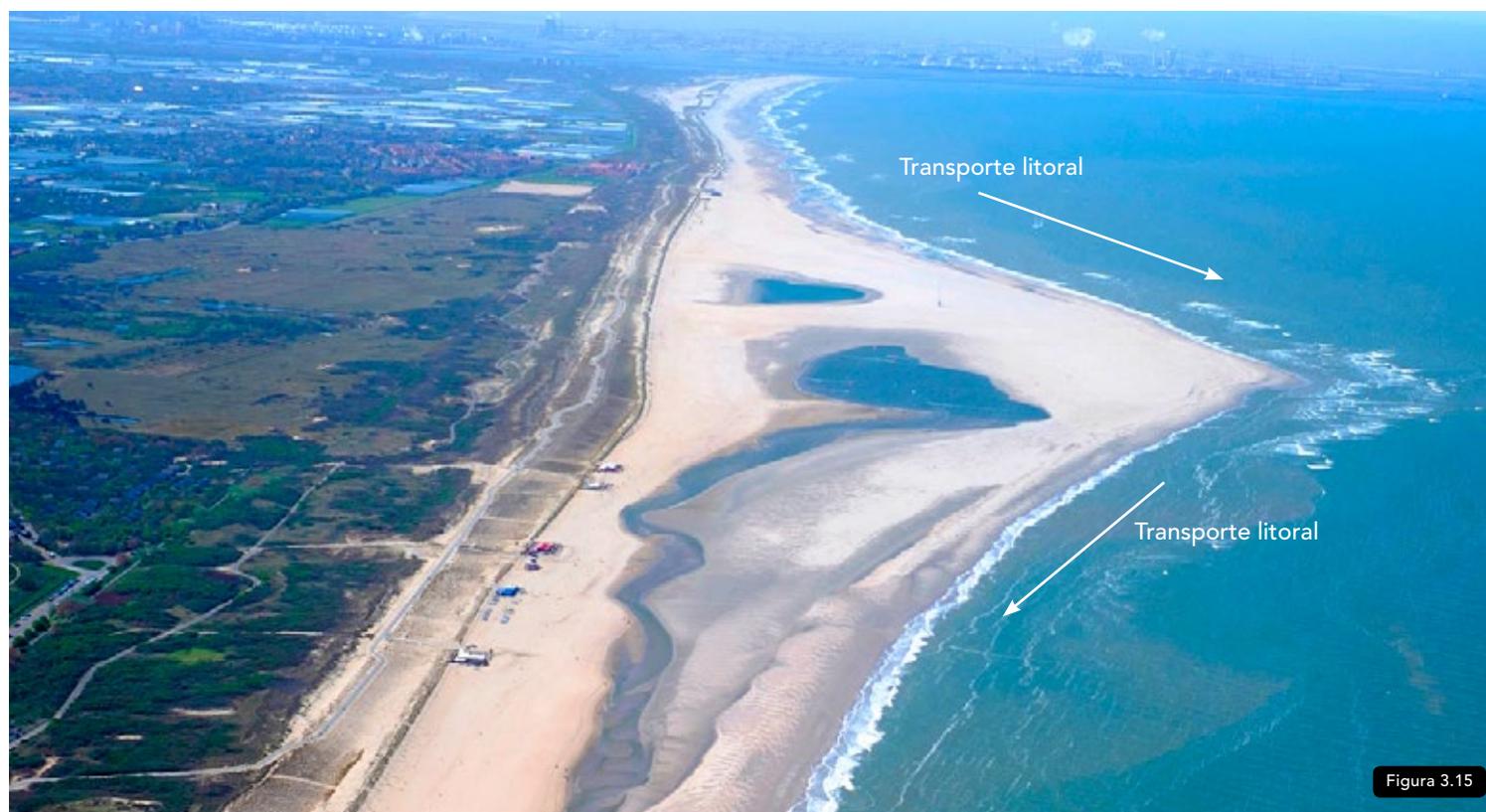


Figura 3.15

Otra técnica de colocación de arena consiste en acumular el material en la zona de rompiente y dejar que el transporte litoral lo distribuya. Si bien esta forma no se ha realizado en Chile, es comúnmente utilizada en otros países. Un ejemplo a gran escala en los Países Bajos es el «Sand Motor» (Figura 3.15), ejecutado en 2011, y cuya superficie es aproximadamente de 1 km². Se espera que esta arena se mueva a lo largo de los años por la acción del oleaje, el viento y las corrientes para proteger la costa y generar otros beneficios durante los próximos 20 años. Asimismo, se busca que este método sea más rentable que las alimentaciones efectuadas con mayor frecuencia y también ayude a la naturaleza, al reducir el impacto causado por el reabastecimiento.

Durante una alimentación artificial, se debe evitar que el transporte genere la colmatación de ensenadas o puer-

tos contiguos, pues esto obligaría a realizarles faenas de dragado para garantizar su profundidad. Como alternativa, se puede alimentar una playa erosionada mediante maquinaria terrestre. En otra técnica basada en el bombeo hidráulico, las arenas de las áreas de acumulación de una estructura costera son llevadas a las playas erosionadas deriva abajo, lo que se denomina *bypass* de arena. Uno de los pocos ejemplos a nivel mundial es el *bypass* de arena del Tweed River (Figura 3.16), en Gold Coast (Australia), cuya función es mantener el canal de acceso con suficiente calado para la navegación de embarcaciones menores y evitar la erosión aguas abajo de la desembocadura.

3.4.1.3 RESTAURACIÓN DE DUNAS

Las playas y las dunas forman parte de un sistema muy eficiente para amortiguar el efec-



Figura 3.16

to de los agentes oceánicos. Cuando el transporte litoral es suficiente, el viento proveniente del mar transporta arenas y forma dunas, en el lado terrestre de la berma de invierno. De las diferentes variedades de dunas, las antedunas revisten interés primordial para el control de la erosión. Estas son montículos continuos e irregulares de arena de pocos metros de altura situados paralelamente junto a la playa.

Las antedunas se crean por procesos desencadenados por el viento. Este transporta partículas en una serie de saltos cortos, las que se levantan de la superficie en ángulo casi recto, se desplazan hacia delante en forma de arco y aterrizan a un ángulo rasante en un punto cuya distancia es de 6 a 10 veces la altura del arco, en dirección del viento. Al aterrizar pueden saltar otra

Figura 3.15:

Alimentación artificial, denominada «Sand motor», ejecutada en 2011 en las cercanías de La Haya, en los Países Bajos. Está diseñado para proporcionar protección costera a largo plazo.

Las flechas señalan la orientación del transporte de arenas.

(Fuente: Universiteit Leiden).

Figura 3.16:

Sistema de *bypass* de arena en Tweed River, Gold Coast (Australia). El sistema consiste en un muelle de 450 metros de largo donde el sedimento arrastrado por la corriente litoral es capturado por bombas sumergidas y bombeado mediante una tubería de 4 kilómetros que descarga en una playa ubicada aguas abajo de los espigones. Con ello se garantiza que el acceso al canal de navegación delimitado por los espigones tenga un calado suficiente para garantizar la navegación segura de las naves.

(Foto: Seandigger/Wikimedia.org).

vez o desprender otras partículas del lecho. La saltación (Figura 1.31a) suele ser la forma predominante de transporte eólico de arenas, y comprende hasta el 80% del transporte total.

La formación de una duna comienza cuando una obstrucción generada por hierbas provoca la acumulación de granos de arena. Movida por el viento, la arena alcanza elevaciones por encima del perfil natural de la playa, donde, si el transporte es suficiente, se acumula formando una duna. Las mayores velocidades del viento impulsan partículas que se depositan del lado de tierra, de manera que la duna se agranda y emigra en la dirección del viento. Las bajas velocidades inducen el depósito del lado opuesto, ocasionando acumulación y migración en dirección contraria al viento. Las antedunas pueden ser destruidas por las marejadas, sequías o el exceso de pastoreo que reduce su cubierta vegetativa. Por esta razón, la creación de dunas tiene un valor limitado en la lucha contra la erosión.

La restauración de los sistemas dunares constituye una alternativa de solución al problema de la erosión y se logra mediante técnicas de reconstrucción topográfica y repoblación con vegetación autóctona. Citando a Ley & Vidal (2007: 137-138) la restauración se basa en técnicas de ingeniería convencional y técnicas ecológicas:

Técnicas de ingeniería convencional: son actuaciones en las que la reconstrucción de la topografía dunar se realiza mediante el aporte de arena con maquinaria. La fuente de arena puede estar o no en el sistema dunar objeto de la actuación. Suele emplearse este tipo de técnicas, cuando el objetivo de la reconstrucción dunar es la protección de algún elemento de gran valor económico, social, cultural (como, por ejemplo, los yacimientos arqueológicos), e incluso natural, situados en primera línea de costa. Generalmente, son actuaciones realizadas en plazos de tiempo breves (días-semanas), limitadas en el espacio y que requieren una elevada inversión económica. El impacto ambiental es elevado en aquellas zonas que actúan como fuente de arena

y en los emplazamientos de las nuevas dunas.

Técnicas ecológicas: son actuaciones en las que, una vez eliminado o reducido a rangos compatibles el factor o factores que han conducido a la degradación dunar, se procede a la instalación de sistemas de 'ayuda' que permitan su reconstrucción mediante procesos naturales. Es una acción relativamente lenta, cuyos resultados se obtienen a mediano plazo. Son actuaciones muy poco costosas, en las que la inversión realizada es muy pequeña en relación con los resultados que se obtienen, que, en general, son buenos. No obstante, puesto que se trata de obras en las que es la propia naturaleza la que realiza la mayor parte del esfuerzo (el viento transporta la arena, la vegetación se establece y extiende su cobertura, etc.), los resultados no se aprecian al terminar la actuación sino al cabo de cierto tiempo, dependiendo de varios factores, entre ellos, la climatología, la dinámica sedimentaria, la efectividad de la protección, etc.

La Figura 4.29 muestra un ejemplo de restauración de dunas mediante técnicas ecológicas.

3.4.2 Métodos estructurales

Las estructuras de fortalecimiento de la línea costera tienen la finalidad de mitigar la erosión y proteger las instalaciones contra la acción perjudicial del mar. Estas obras tienen efectividad local y no extienden sus beneficios a las costas adyacentes. Por el contrario, pueden afectar las playas colindantes, pues dan lugar a cierto grado de socavación local producto de la reflexión en la estructura. Cabe notar que la diferencia entre erosión y socavación es que en la primera interactúan el agua y los sedimentos, en tanto que, en la segunda, se requiere también de la presencia de una estructura (Figura 3.17).

La intensidad de la socavación depende de factores como el diseño estructural, las condiciones oceanográficas, las características del sedimento y la morfología de la costa. Si el suministro de sedimento que llega a la playa no es suficiente para compensar la pérdida debido a la socavación, la erosión de la playa se acelera y la playa puede desaparecer. Asimismo, el excesivo forta-



Figura 3.17:

Socavación del paseo costero en Playa El Sol, Viña del Mar, producto de la marejada del 8 de agosto de 2015.

(Fuente: Winckler et al., 2017).

Figura 3.17

lecimiento de la línea costera que proporciona sedimento a costas adyacentes, se traduce en la pérdida definitiva o temporal de sedimento en las zonas expuestas de la playa.

Las estructuras bien diseñadas constituyen, sin embargo, una forma segura de proteger las tierras altas e instalaciones construidas inmediatamente tras ellas. Cuando la protección es imperativa y los riesgos deben minimizarse –como es el caso de instalaciones portuarias, plantas de generación eléctrica o canchas de acopio en instalaciones industriales–, las estructuras de fortalecimiento suelen ser la única solución. La Tabla 3-II ilustra una clasificación de obras de protección costera con arreglo a su objetivo y mecanismo de protección. Dada la gran variedad de obras costeras, se recomienda consultar el «Coastal Engineering Manual» (USACE, 2002), para conocer algo más de estas estructuras.

Uno de los elementos de diseño más importantes de estas estructuras es la profundidad de penetración de su base en el fondo marino. Este parámetro debe considerar factores como la pérdida de sedimento debido a marejadas extremas, la erosión producida por espigones deriva arriba y las características del suelo detrás y bajo la estructura. Por su parte, la geometría y cota sobre el nivel del mar se determina en función de las condiciones del oleaje, las mareas astronómica y meteorológica, el lecho marino y la porosidad de la estructura. Las estructuras porosas absorben una mayor cantidad de la energía de las olas, reduciendo la socavación y el sobrepaso. Estas se construyen con rocas o elementos premoldeados de hormigón (Figura 3.24), los que ocasionalmente son utilizados como soporte para

TIPO	TRADUCCIÓN	OBJETIVO	MECANISMO
Dique	Sea dike	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas bajas.	Protección de la costa con una estructura impermeable.
Muro vertical	Seawall	Proteger tierra y estructuras contra inundación y sobrepaso.	Refuerzo del perfil de la playa.
Revestimiento	Revetment	Proteger contra la erosión de la línea de costa.	Refuerzo del perfil de la playa.
Espigón	Groin	Prevenir erosión de playas.	Reducción del transporte longitudinal de sedimentos.
Dique exento	Detached breakwater	Prevenir erosión de playas.	Reducción del transporte longitudinal de sedimentos.
Dique arrecife	Reef breakwater	Prevenir erosión de playas.	Disipación o reflexión de energía del oleaje.
Dren de playa	Beach drain	Prevenir erosión de playas.	Acumulación de arenas en la zona drenada de la playa.
Alimentación artificial	Nourishment	Prevenir erosión de playas y evitar inundación.	Reemplazo de transporte deficitario de sedimentos.
Rompeolas	Breakwater	Proteger zonas de abrigo.	Disipación o reflexión de energía del oleaje.

Nota: En Chile, dique y rompeolas son sinónimos.

Tabla 3-II



Figura 3.18

Tabla 3-II. Definición de tipos de obras de protección costera.

(Fuente: USACE, 2002).

Figura 3.18: Dolos de defensa costera en isla Alacrán, Región de Arica y Parinacota.

(Fotos: P. Winckler).

Figura 3.19:

Dique de protección en la ciudad de Opheusden, Países Bajos. Se observa como el nivel del agua se ubica sobre el terreno.

(Fuente: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Henri Cormont)

**Figura 3.20:**

Construcción de un muro de contención mediante elementos prefabricados de hormigón armado en Punta Arenas.

(Foto: P. Winckler).

Figura 3.21:

Malecón que alberga un paseo costero y una rampa para el lanzamiento de embarcaciones menores en Dalcahue, Chiloé.

(Foto: P. Winckler).

el arte callejero (Figura 3.18). Finalmente, la geometría de la obra determina el costo, pues define el tamaño, cantidad de materiales, equipos y la mano de obra especializada para la construcción.

3.4.2.1 DIQUES

Un dique es una barrera masiva que busca evitar la inundación de sectores costeros, en países caracterizados por costas en terrenos muy bajos. Es una estructura que se sostiene por gravedad; donde su propio peso constituye el mecanismo que le da resistencia. Los diques pueden ser permeables o impermeables, de superficie lisa o rugosa, y ser construidos con una mayor variedad de materiales que otras estructuras. Se utilizan hormigón, rocas, encofrados de madera, gaviones rellenos de bolones, tablestacas de madera o de acero celular, según sea el nivel de esfuerzos al que estarán sometidos durante su vida útil.

Los holandeses han conseguido recuperar tierras, con la construcción de este tipo de estructuras, en las cuales luego de dos a tres años crece la vegetación. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 3.19, donde el nivel del mar se

encuentra sobre el nivel de la ciudad.

3.4.2.2 MUROS DE CONTENCIÓN

Los muros de contención son estructuras gravitacionales, usualmente construidas con hormigón armado, cuyo objetivo es proteger el terreno de la acción del oleaje y las corrientes. Suelen ser obras más ligeras que los diques y requieren de sistemas de protección contra la socavación para evitar su deslizamiento o vuelco (Figura 3.7). Dado que estas estructuras son menos voluminosas que los diques, requieren menos material y son usualmente menos costosas. La Figura 3.20 muestra un ejemplo de construcción de un muro de contención con elementos prefabricados de hormigón armado en las cercanías de la ciudad de Punta Arenas, en el estrecho de Magallanes.

3.4.2.3 MALECONES

Los malecones son estructuras destinadas a retener el terreno e impedir los deslizamientos de tierra sobre el agua. Se construyen en zonas relativamente abrigadas con elementos de poco espesor,

como pantallas de tablestacas de acero, muros cantiléver o muros en «L». Son estructuras usualmente verticales, lo cual las hace adecuadas para albergar sitios de atraque para embarcaciones medianas, rampas de lanzamiento o chazas de atención para botes.

3.4.2.4 ESPIGONES

Los espigones son obras que penetran perpendicular u oblicuamente en el mar y se construyen para acumular sedimentos. Estas estructuras

pueden ser impermeables, lo que se logra mediante muros verticales o pantallas de tablestacas, o permeables, en cuyo caso son usualmente de roca de cantera. Los espigones son adecuados en lugares donde la erosión deriva abajo es aceptable y se compensa con alimentación artificial o estructuras adicionales de control de la erosión. Los efectos adversos se mitigan reduciendo el largo y altura de los espigones, a fin de reducir el tiempo requerido para que se colmate el lado deriva arriba de la estructura. Esta solución da por resultado una

playa más reducida, deriva arriba, y que mantiene las pérdidas a un nivel aceptable, deriva abajo.

Tras la construcción de un espigón, el suministro de arena que deriva abajo del espigón queda reducido, resultando en el retroceso de la línea de costa. Con una deriva litoral constante y unidireccional, este proceso continúa hasta que se alcanza la máxima acumulación de arena, después de lo cual la arena sobrepasa de nuevo el espigón. Los espigones son ventajosos para impedir la excesiva sedimentación en los canales navegables (Figura 3.16) o para estabilizar playas artificiales (Figura 3.22).

Los espigones suelen disponerse en grupos caracterizándose por su longitud, el espacio que los separa y la inclinación respecto a la línea de la costa (Figura 3.23). Los procesos básicos de acreción y erosión propios de un solo espigón caracterizan también a un sistema de espigones. El lado deriva abajo de cada espigón se beneficia con la acreción del lado deriva arriba del espigón, con lo cual la playa suele ensancharse. La separación y



Figura 3.22

Figura 3.22:

Espigones de retención de arena en Playa Paraíso, Antofagasta.

(Foto: P. Winckler).



Figura 3.23a



Figura 3.23b

Figura 3.23:

Sistemas de espigones utilizados para proteger costas erosivas.

(a) Espigón construido en forma perpendicular a una playa en Barcelona, en el Mediterráneo.

(Foto: P. Winckler).

(b) Malecones de Hondsbossche Zeewering, Países Bajos.

(Fuente: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat).



Figura 3.24

Figura 3.24:

Ejemplos de elementos artificiales de hormigón en masa utilizados en obras de protección costera.

(Adaptado USACE, 2002).

distancia entre espigones depende del ángulo de ataque del oleaje, de la pendiente y granulometría de la playa, además de factores económicos como el costo de la obra y el uso de la tierra.

3.4.2.5 ROMPEOLAS

Los rompeolas tienen por objeto producir la rotura de la ola, disipando su energía sobre su coraza, o reducir el oleaje por difracción en la zona de abrigo. Son estructuras voluminosas que pueden construirse como elementos verticales (Figura 3.12) o en talud (Figura 3.11), en cuyo caso se conforman de varias capas de material pétreo. Estas estructuras se conocen como diques o escolleras, (que proviene de la palabra «escollo»).

En los rompeolas en talud se utilizan elementos artificiales de hormigón en masa (Figura 3.24) o rocas graníticas, cuya dureza, densidad y forma angulosa favorece una mejor trabazón.

Los elementos de hormigón alcanzan pesos de entre 10 a 150 toneladas, dependiendo de la intensidad del oleaje extremo, y llevan ranuras u orificios para aumentar la trabazón (Figura 3.13). En las grandes obras ejecutadas en Chile durante el siglo XX, se utilizaron tetrápodos con pesos inferiores a 20 toneladas, pero en la actualidad es común el uso de dolos, acrópodos y corelocs.

Los rompeolas utilizados para obras de abrigo generan una zona de oleaje de baja energía, donde las embarcaciones operan. Al igual que los espigones, estas obras constituyen una barrera casi total contra la deriva litoral, privando de sedimento a playas ubicadas deriva abajo. A pesar de las externalidades que derivan de un mal emplazamiento en el diseño de un rompeolas, siempre hay suficiente margen para encontrar una solución que satisfaga los objetivos de controlar la erosión y de mitigar a la vez los efectos adversos de estas obras. Dado que los rompeolas se emplazan en aguas más



Figura 3.25

Figura 3.25:

Efectos en la dinámica litoral en el Puerto de Salaverry, en Trujillo (Perú). El transporte de sedimentos va de sur (izquierda) a norte (derecha), generando acreción aguas abajo del puerto.

(Fuente: Google Earth / Elaboración propia).

profundas que las escolleras unidas a la costa, estos controlan una mayor proporción de la zona litoral y pueden inducir acumulación en un área más amplia, como ocurre en el puerto de Salaverry (Perú) (Figura 3.25).

3.5 ASPECTOS ECONÓMICOS

La búsqueda de la mejor protección del litoral requiere de una evaluación técnica, socioeconómica y ambiental de la región afectada. Entre otros estudios que dependerán de cada proyecto, la evaluación técnica debe considerar la caracterización del medio natural, la cuantificación histórica y la estimación futura de la erosión (considerando tendencias a largo plazo, variaciones cíclicas y estacionales), la definición de las tipologías constructivas y la cuantificación de volúmenes de material requerido para materializar la

obra. Por su parte, la evaluación socioeconómica incluye el estudio de las condiciones económicas del pasado y actuales en la zona de influencia del proyecto, además de la propuesta de planes socioeconómicos para el futuro.

Como en cualquier planificación de una obra de infraestructura, el análisis de costo-beneficio social es un instrumento muy útil en la evaluación de un proyecto y, en consecuencia, en la elección de la solución óptima. Habrá que cuantificar, entonces, los beneficios y costos sociales relacionados con las distintas soluciones, con arreglo a las prioridades y los criterios de los encargados de adoptar las decisiones.

Un análisis detallado del costo-beneficio no es una operación sencilla. Incluso hay factores implícitos que pueden no ser cuantificables y otros que cambian con el tiempo y

cuya predicción es difícil, si no imposible. Sea como fuere, un análisis de este tipo permite determinar sistemáticamente las cuestiones implícitas en la elección de una solución óptima.

3.5.1 Beneficios de la protección del litoral

En la literatura especializada, los beneficios sociales de las medidas de control de la erosión se clasifican en financieros, sociales y ambientales.

Los beneficios financieros se calculan como los ingresos de las actividades económicas generadas por el control de la erosión, menos las pérdidas que se ocasionan. Esos ingresos se asocian a funciones específicas como la protección de diferentes zonas de la playa, la protección de infraestructura o el control de las inundaciones. Hay otros beneficios como el aumento del empleo durante la construcción, la generación de actividades económicas en la zona protegida, el aumento de la plusvalía del terreno, la transferencia de tecnología o el abastecimiento de bienes esenciales, que también pueden considerarse en esta categoría. Naturalmente, las medidas de control cumplen algunos objetivos con diferentes niveles de eficacia. Así, el uso de espigones protege a las actividades económicas de la post-playa; pero, la protección de la playa, las tierras costeras altas y la línea costera adyacente son mínimas. En algunas circunstancias, ese potencial será escaso o nulo y, entonces, la mejor solución consiste en no intervenir.

Los beneficios sociales se derivan de la protección de las comunidades costeras, incluidos el resguardo contra peligros para



Figura 3.26:

Club de Yates de Recreo, Viña del Mar, Región de Valparaíso. La infraestructura marítima se compone de una dársena para yates en explanadas ganadas al mar, un molo de abrigo y un canal de acceso a la dársena.

(Foto: P. Winckler).

Figura 3.26

Figura 3.27:

Dársenas del puerto de San Antonio (Región de Valparaíso) vistas desde el mar.

(Foto: P. Winckler).



Figura 3.27

la vida y la salud, la participación comunitaria o la preservación de las zonas de interés cultural o estético. Las distintas medidas de control de la erosión varían muchísimo en los beneficios que proporcionan. Por ejemplo, métodos estructurales, como la construcción de un espigón de retención de arenas, proporcionan una protección considerable a la comunidad costera próxima a un segmento de la costa; pero, afectan adversamente a otras comunidades ubicadas aguas abajo de la obra. Las estructuras de fortalecimiento costero protegen a las comunidades de las tierras altas; no obstante, debido a sus efectos adversos sobre las playas, pueden ocasionar inconvenientes a las comunidades que dependen de ellas.

3.5.2 Costos de la protección del litoral

Los costos de las obras marítimas se clasifican en la inversión inicial y en costos de operación o mantenimiento durante la vida útil de la estructura. En caso de reportar beneficios, debe también incluirse el valor actual neto (VAN), parámetro comúnmente utilizado en evaluación de proyectos y que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros. Para obras que protegen extensiones de costa iguales a varias veces su propio largo, es común expresar los costos por unidad de longitud protegida, para diferentes alternativas de estructuración, y decidir la mejor opción en función de este criterio junto a otros, como la factibilidad técnica, la disponibi-

lidad de material, el impacto ambiental y la experiencia en el procedimiento constructivo.

La estrategia para planificar los flujos monetarios puede, en un extremo, considerar una alta inversión inicial y mantenimiento menor, o en el otro, una baja inversión inicial con costos significativos de mantenimiento o inversiones menores durante la vida útil de la obra. Por ejemplo, un malecón de madera demandará una menor inversión inicial que un muro de contención de hormigón armado; pero, el deterioro temprano de la madera requerirá de mantenimientos periódicos, reparaciones intensivas o de su reemplazo por otra solución. Por otro lado, una baja inversión inicial basada en materiales reciclados –como son el escombros de hormigón o material de dragado para el relleno de nuevas explanadas–, puede ser, eventualmente, más

conveniente a largo plazo. En este contexto, no se puede establecer cuál estrategia es la mejor sin hacer los estudios de precios unitarios, evaluar el VAN y otros instrumentos comúnmente utilizados para calcular la rentabilidad social o privada del proyecto, según corresponda.

Es evidente que la inversión inicial de un proyecto depende de muchos factores. El precio y la disponibilidad de materiales determinan la mejor estructura para una función definida, en tanto que condiciones del emplazamiento, como el acceso y las características del terreno, pueden ocasionar que ciertos tipos de estructuras resulten técnicamente imposibles o prohibitivas en función del costo. Los materiales constituyen un importante componente de la inversión inicial y su precio en obra es trascendente para

la evaluación de los flujos financieros. En su estimación deben considerarse las maniobras de extracción, carga, traslado y descarga necesarios para transportarlos desde el sitio de empréstito al lugar de la obra. El manejo de materiales pesados y voluminosos, como las rocas de cantera, suele ser muy costoso. En algunos casos está la posibilidad de transportar el material por vía acuática, medio que bajo ciertas condiciones es más barato que el transporte en camiones.

La disponibilidad de equipamiento durante la construcción es otro importante componente del costo y viabilidad. Por ejemplo, la carencia de grúas de alta capacidad limita el uso de materiales o piezas pesadas. Análogamente, la carencia o el elevado costo de una planta de hormigón en gran escala es el factor decisivo en la selección de bloques de hormigón prefabricado, bloques de hormigón

construidos in situ o roca de cantera.

En las obras marítimas se utilizan áridos para rellenos, material de cantera como las escolleras, áridos, cementos y aguas para hormigones, aceros, geotextiles y, para obras menores, maderas y gaviones. La vida útil de una obra depende, entre otros aspectos, de la resistencia de los materiales, de la periodicidad de los trabajos de conservación y de las fuerzas no previstas a que puede estar sujeta. Algunos materiales duran más que otros. Por ejemplo, la roca granítica, el hormigón de alta resistencia y el acero protegido contra la corrosión son usualmente duraderos. Por el contrario, la madera no tratada, la roca caliza, los gaviones y los sacos de arena (*geobags*) tienen una vida útil relativamente corta. Entre ambos extremos, hay materiales que, debidamente elaborados y aplicados, llegan a durar varias décadas. El hormigón en masa suele considerarse

como uno de los materiales más duraderos para el ambiente marino, si se dosifica en forma adecuada y se repara en caso de presentar fisuras. El hormigón armado, por su parte, puede durar bastante si se consideran revestimientos de más de 7 cm para que la armadura no se vea expuesta al agua salada (el revestimiento de la armadura en obras terrestres es bastante menor). La madera bien seleccionada y tratada, dura hasta 40 o 50 años. El acero, por su parte, tiene una vida útil de décadas si se reviste con pinturas epóxicas o si se protege con ánodos de sacrificio o corrientes impresas. Con todo, es difícil prever cuánto va a durar una estructura; pues, salvo pocas excepciones (Figura 3.28), no se cuenta con ensayos de duración de los materiales. La comparación con estructuras similares construidas en sitios de condiciones análogas puede dar una idea de la vida útil de una obra en sus fases iniciales. La «Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras» (MOP, 2013) y la «Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas» (P.P.E.E., 2008) contienen muy buena información constructiva de los diferentes tipos de materiales utilizados en obras marítimas.

Las condiciones del terreno también determinan la clase de materiales, el tipo de estructura y los costos de construcción. Salvo excepciones, los suelos arenosos son adecuados para hincar pilotes o disponer escollera; mientras que en los estratos rocosos se utilizan pilotes anclados que demandan mayor complejidad constructiva. Eventualmente, se deben excavar zanjas para acomodar el pie de las escolleras, las que sin dicho apoyo pueden ser desplazadas de su posición. Los terrenos fangosos que se encuentran en ambientes lacustres, meandros o desembocaduras bien protegidas tienen baja capacidad de soporte y son, por lo tanto, poco idóneos para estructuras gravitacionales. En dicho caso habrá que incurrir en gastos adicionales para



Figura 3.28:

Testigos de hormigón sometidos durante décadas a un ambiente salino en el Port and Airport Research Institute, PARI (Japón). El objetivo de preservar estos testigos es evaluar la durabilidad y la composición química del hormigón utilizado en obras marítimas. Algunos de estos testigos tienen más de cincuenta años de antigüedad.

(Foto: P. Winckler).



Figura 3.29

Figura 3.29:

Defensa costera del emisario submarino de Loma Larga, en Región de Valparaíso, el cual fue construido utilizando ascensores para bajar los materiales.

(Foto: SHOA).

modificar el diseño de la estructura, mejorar las condiciones del suelo u optar por otra estructura más apropiada.

El rango de la marea, la distancia del agua, la altura del nivel freático y el régimen del oleaje afectan también la elección de la estructura y los costos de la construcción. La construcción en lugares con condiciones agresivas puede restringirse a épocas de calmas, lo que retrasa el avance de la obra. El procedimiento constructivo contempla, por lo general, el avance en etapas, o por secciones pequeñas más o menos autónomas, de manera de evitar el riesgo de pérdida masiva de material.

Por último, la facilidad de acceso del material y el equipo a un lugar puede determinar el tipo de estructura. Algunos materia-

les y equipos son más fáciles de manejar y transportar que otros. Si el lugar de una obra es la base de un acantilado sin acceso, ciertos materiales tendrán que ser transportados vía marítima o mediante obras especialmente acondicionadas para ello. Un ejemplo extremo fue la construcción de la defensa costera del emisario submarino de Loma Larga, en Valparaíso, que descarga al mar las aguas servidas del

Gran Valparaíso (Figura 3.29). Este tipo de soluciones aumenta apreciablemente el costo. El hormigón puede ser el material adecuado para construir un dique, pero si no se cuenta con acceso para los camiones que portan la mezcla de hormigón, denominados betoneras, se deberá optar por otro material.

3.6 EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO

El sistema portuario chileno cumple un rol estratégico para la integración comercial de Chile con el mundo, pues transfiere aproximadamente el 90% del comercio internacional. Dicho sistema regula nueve empresas portuarias autónomas cuyo rol consiste en crear condiciones favorables para el desarrollo del sector portuario al amparo de un sistema de concesiones establecido en la Ley 19542 de «Modernización del Sector Portuario Estatal», del 19 de diciembre de 1997. Las empresas portuarias se emplazan en Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, San Antonio, Talcahuano-San Vicente, Puerto Montt, Chacabuco y Punta Arenas. Existen además decenas de empresas concesionarias, puertos privados, instalaciones industriales y puertos pesqueros que conforman el sistema. «La importancia de los puertos estatales radica en que a través de ellos se transfiere la mayor cantidad de carga general y de contenedores, y en que su ubicación es relativamente mejor que la de los puertos privados» (SEP, 2006: 54).

Debido a su geomorfología marcada por la actividad tectónica, los puertos en Chile tienen características únicas y adversas, pues en su mayoría —salvo aquellos ubicados en la zona de los fiordos y canales—, se encuentran abiertos al océano Pacífico. La distribución demográfica asimismo y la lejanía a las grandes rutas de navegación transoceánicas, hace que existan puertos relativamente menores a lo largo de toda la costa, comparados con los puertos del hemisferio norte.

Muchos de los puertos chilenos han requerido de la construcción de grandes obras de abrigo para permitir la operación de los buques, como han sido los casos de Arica, Iquique, Antofagasta (Figura 3.31), Valparaíso (Figura 3.32) y San



Figura 3.30: Sistema portuario de Chile, año 2017. (Elaboración propia).

Figura 3.30

Figura 3.31:

Puerto de Antofagasta.

(Foto: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias).

Figura 3.32:

Puerto de Valparaíso.

(Foto: SHOA).

Figura 3.33:

Puerto de San Antonio.

(Foto: SHOA).

Figura 3.34:

Puerto de la Central Termoeléctrica Electroandina, en Huasco.

(Foto: P. Winckler).

Antonio (Figura 3.33). Otros puertos se emplazan en las escasas bahías donde dicho abrigo se da en forma natural, como en Mejillones, Caldera, Huasco (Figura 3.34), Coquimbo, Guayacán, bahía de Concepción y el golfo de Arauco. En general, los puertos estatales se ubican en emplazamientos geográficos ventajosos y cuentan con muelles marginales, mientras que los privados suelen tener solo muelles de penetración (SEP, 2006).

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

GIOC (2002). *Documentos Temáticos. Regeneración de playas*. Universidad de Cantabria.

LEY, C. & C. VIDAL (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio del Medio Ambiente, España.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - MOP (2013). *Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras*. Vol. 3: Construcción.

OSSA, M. (1964). El nuevo puerto de Arica y el empleo de tetrápodos como recubrimiento en sus obras de protección. *Revista del IDIEM*. Vol. 3, N° 2.

PUERTOS DEL ESTADO – P.P.EE. (2005). ROM 0.5-05. *Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias*. España.

PUERTOS DEL ESTADO – P.P.EE. (2008). *Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*. España.

PUERTOS DEL ESTADO – P.P.EE. (2009). ROM 2.0-11. *Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo*. España.

PUERTOS DEL ESTADO – P.P.EE. (2012). ROM 2.0-11. *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre* (Tomo I). España.

SALLES, P. & R. SILVA (2004). Cap. 13. Infraestructura de protección costera en Manejo costero en México. E. Rivera, G. Villalobos, I. Azuz & F. Rosado (eds). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.

SISTEMA DE EMPRESAS - SEP (2006). Modernización portuaria en Chile. *Bitácora* 1998-2005.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE (2002). Types and functions of coastal structures. Part VI, Ch.2. Coastal Engineering Manual. *Coastal Engineering Research Center*.

WINCKLER, P., M. CONTRERAS-LÓPEZ, R. CAMPOS-CABA, J. BEYÁ & M. MOLINA (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 45(4): 622-648.



Figura 3.31



Figura 3.32



Figura 3.33



Figura 3.34

EL CAMBIO CLIMÁTICO

Páginas 98 - 131

El estudio del clima ha demostrado que la atmósfera cambia drásticamente en cuestión de décadas, situación que parece intensificarse con la influencia del ser humano en los inicios de la Revolución Industrial. El calentamiento de la atmósfera durante el siglo XX no tiene precedentes en los últimos 1200 años y constituye una amenaza para las especies. En este capítulo, se revisan las tendencias históricas y proyecciones de variables oceanográficas que son alteradas por el cambio climático, esbozando los posibles impactos en diversos sistemas costeros y algunas medidas de adaptación para el futuro.

Como se señaló en capítulos anteriores, el clima es la descripción estadística del tiempo (*weather*) en términos de valores medios y variabilidad de cantidades, como la temperatura, la precipitación, el viento y la presión atmosférica. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), treinta años constituyen un período normal para la estimación del clima en una localidad; aun cuando se discute si en ese lapso es el adecuado. Por su parte, el cambio climático corresponde al cambio que se manifiesta como alteraciones en los valores medios o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por décadas o más.

A diferencia de la climatología, la meteorología estudia el tiempo a corto plazo (horas o pocos días). No obstante, ambas son ciencias que se nutren de las mismas variables atmosféricas. En la próxima sección, se hace una breve descripción de la composición de la atmósfera, que es donde el cambio climático se origina.

4.1 LA ATMÓSFERA

La capa más externa del planeta Tierra es la atmósfera, que es la cubierta gaseosa que rodea al cuerpo sólido. Su grosor es de casi 10 000 km, aunque la mitad de su masa se concentra en los 10 km más cercanos a la superficie. Según sus características físico-químicas, la atmósfera se divide en varias subcapas (Figura 4.1a). La capa inferior, conocida como la troposfera¹, se extiende hasta unos 12 km de altitud y contiene el 80 % de todos los gases de la atmósfera; no obstante, solo su tercio inferior es la parte más respirable. Su porción más caliente está en la superficie terrestre, enfriándose aproximadamente a razón de 6.5 °C por cada kilómetro en la vertical. Por sobre ella se ubica la estratosfera, que presenta menos movimientos verticales y una temperatura relativamente constante en su parte inferior para luego

augmentar sostenidamente. Más arriba se encuentra la mesosfera, donde la temperatura decrece hasta unos -85 °C, seguida de la termosfera, cuya temperatura aumenta con la altitud. Finalmente, se encuentra la exosfera que se extiende hacia el exterior hasta los 10 000 km de altitud.

El límite superior de cada una de estas capas lleva un nombre que deriva de ellas, donde el sufijo «esfera» fue reemplazado por «pausa»². Estas zonas de transición entre el término de una capa y el inicio de la otra se denominan: tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa.

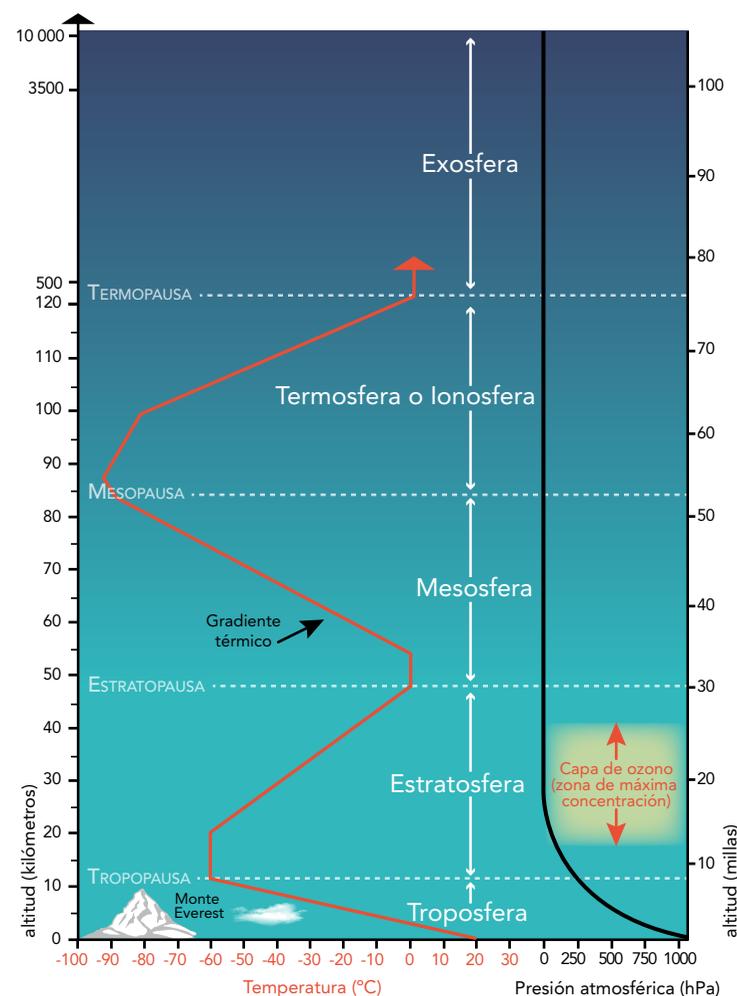


Figura 4.1 a

Figura 4.1a:

La atmósfera de la Tierra se compone de cinco capas, cuya densidad va disminuyendo con la altura; es por ello que el 75% de la masa total de la atmósfera se encuentra entre la superficie terrestre y los 11 primeros kilómetros en altitud. Si bien no existe una delimitación que vaya indicando las diferentes capas de la atmósfera, a unos 100 km de altura, es considerada el final de la atmósfera terrestre y el inicio del espacio exterior.

(Elaboración propia).

¹ De la raíz griega «trop» (girar) y que significa la región donde el aire se mueve.

² De la palabra latina «pausa», que proviene del griego «paüsis», que significa «detención, cesación».

ATMÓSFERA



Figura 4.1b:

La atmósfera que protege la vida en la Tierra se hace menos densa y más fina hasta desvanecerse gradualmente en el espacio.

En la imagen se muestra la delgada capa gaseosa que constituye la atmósfera y Chile centro-sur, en primer plano, las desembocaduras de los ríos y la cordillera de los Andes nevada.

(Foto: Stuart Rankin / Flickr).

Figura 4.1 b

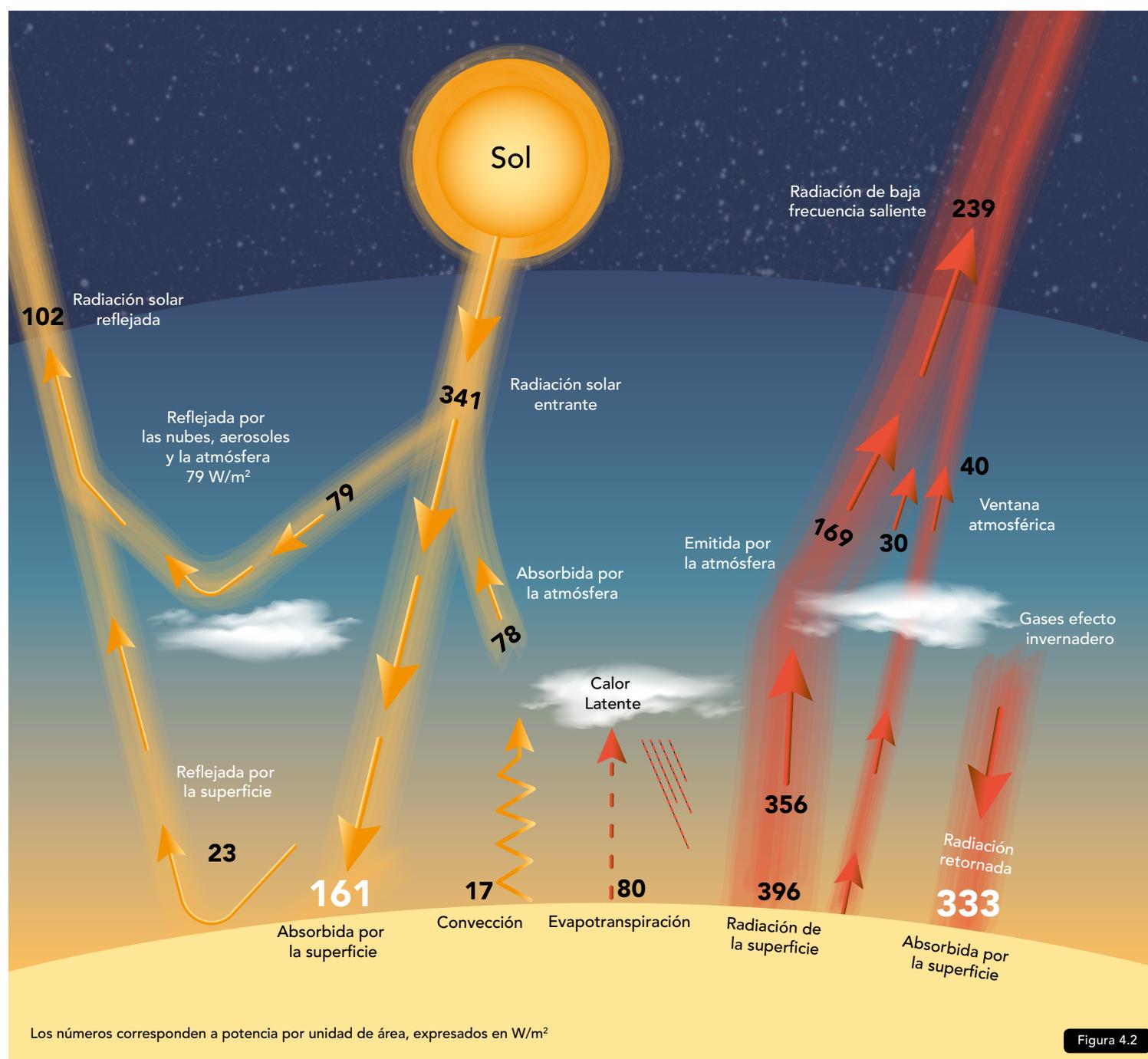
La composición actual de la atmósfera es muy diferente de las nubes de gas y de los polvos primitivos a partir de los cuales se formó. Su actual conformación refleja una larga y compleja historia, que se inicia con las reacciones de elementos volátiles y el polvo existente en la primitiva nebulosa solar. Desencadenaron su evolución, los gases que acompañan al magma que sale al exterior desde el manto terrestre, las rocas presentes en la corteza terrestre y la interacción con el océano y con la biosfera. La composición de la atmósfera y la distancia al Sol condicionan el balance de energía de la Tierra, que a su vez determina la temperatura sobre su superficie y la circulación atmosférica, cuya función es redistribuir la energía solar sobre la superficie terrestre.

En la actualidad, los componentes más importantes del aire seco son el nitrógeno (79 %), el oxígeno (20 %) y el argón (1 %), compuestos que están constantemente en el globo terrestre. Los restantes componentes están presentes en cantidades muy pequeñas. Destaca entre ellos el dióxido de carbono (CO_2), que en el 2016 alcanzó 400 partes por millón (ppm), el neón con 18 ppm, el helio con 5 ppm y el ozono, que varía de 10 ppm en el suelo a un máximo de 12 ppm entre los 20 km y

25 km. La concentración del ozono está determinada por el balance entre las reacciones que lo producen y las que lo destruyen. Este es el único gas atmosférico que absorbe radiación ultravioleta del Sol, próxima a longitudes de onda de 0.2 a 0.3 micrómetro. Esta característica hace que el ozono cumpla un rol de extraordinaria importancia al proteger la superficie terrestre de los rayos ultravioletas; los cuales, si llegaran al suelo, destruirían la vida. El transporte aéreo que se desplaza a gran altitud y ciertas actividades industriales arrojan compuestos que descomponen este ozono (Figura 4.1a).

4.2 EFECTO INVERNADERO

La atmósfera es un fluido donde ocurren fenómenos que resultan de complejas interacciones de diversa naturaleza, tanto en el tiempo como en el espacio. Estos fenómenos son influenciados por la inclinación del eje terrestre, el efecto de la topografía de una localidad y la continua radiación solar que alcanza el planeta. Cuando la Tierra se encuentra a la distancia media del Sol en su órbita, la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera terrestre es de 1367 W/m^2 , aun cuando este valor varíe



en distintas escalas de tiempo³. Sin embargo, no toda la radiación que llega a la Tierra es absorbida. Un 30 % es reflejada hacia el espacio por las nubes, el polvo atmosférico, la nieve y finos materiales piroclásticos. La radiación reflejada por el denominado efecto **albedo terrestre** podría modificarse si se pro-

ducen erupciones volcánicas que inyecten polvo en la atmósfera, se incrementan las deforestaciones o se derriten los casquetes polares. Un aumento o una disminución en el albedo terrestre conducen a un enfriamiento o a un calentamiento neto de la Tierra.

En parte, la Tierra se desprende de la radiación solar que absorbe, emitiendo radiación infrarroja o térmica (Figura 4.2). La mayor parte de esta radiación es absorbida por el vapor de agua, las nubes, el CO_2 , el polvo y el ozono. Un porcentaje es absorbido por la superficie, otra parte es reabsorbida por la atmósfera y el resto escapa al espacio. El incremento del CO_2 es transparente a la luz visible; pero, extraordinariamente eficiente para absorber la radiación infrarroja de onda larga emitida por la Tierra, lo cual explica el aumento de la temperatura media mundial. Este fenómeno se denomina efecto invernadero.

³ Así, por ejemplo, cuando en la superficie del Sol aparecen grandes manchas solares se produce un descenso de 0.1 % en la radiación. Se ha determinado también que un aumento de 1 % en la radiación respecto del valor medio durante 10 años, elevaría la temperatura en la superficie terrestre en 2 °C.

Figura 4.2: Balance energético de la Tierra

La superficie de la Tierra recibe $161 W/m^2$ de radiación solar y $333 W/m^2$ de radiación infrarroja (emitida por los gases de efecto invernadero de la atmósfera), lo cual suma un total de $494 W/m^2$. Por otra parte, la superficie de la Tierra emite un total de $493 W/m^2$ entre radiación térmica, calor latente y calor sensible ($396+80+17$), lo cual supone una absorción neta de energía.

Diferentes mediciones de las últimas dos décadas indican que la Tierra está absorbiendo entre 0.5 y $1 W/m^2$ más de lo que emite al espacio, lo que explica el calentamiento global.

(Fuente: Adaptado de Trenberth et al., 2008, que se basa en datos del período de marzo de 2000 a mayo de 2004. Disponible en: www.wikiwand.com/es/Efecto_invernadero).

Figura 4.3:

Glaciar O'Higgins. La fotografía fue tomada durante una expedición de los autores cuyo objetivo fue evaluar el riesgo de derretimiento ante una erupción del volcán Lautaro, ubicado en el campo de hielo patagónico sur. Este tipo de glaciares está experimentando un retroceso rápido producto del cambio climático.

(Foto: P. Winckler).



Figura 4.3

El clima actual (y desde siempre) es en definitiva la respuesta que genera el complejo sistema tierra-océano-atmósfera al ser estimulado por la radiación solar incidente. En otras palabras, es el resultado del balance energético entre la radiación solar absorbida por el sistema y la manera mediante la cual dicha energía se reparte entre los continentes, los océanos y la atmósfera. Para definir el clima de un determinado lugar es necesario tener presente, además de los promedios de las variables durante un período relativamente largo, sus valores extremos, sus desviaciones típicas y otras consideraciones estadísticas.

Se sabe que la cantidad de CO₂ inyectada a la atmósfera y al océano ha aumentado desde la Revolución Industrial como resultado de la combustión de carbón, del uso del petróleo y de la deforestación. Investigaciones especializadas han estimado que la cantidad de CO₂ en el período preindustrial habría sido del orden de 250 y 300 ppm (partes por millón) y que en la actualidad oscila estacionalmente en torno a 400 ppm.

Hoy en día, la temperatura media global de la Tierra es del orden de 15 °C, oscilando entre 50 °C en las zonas tropicales y -60 °C en los polos. La temperatura depende de la latitud, la altitud, el relieve, las masas de agua, la distancia al mar y la di-

rección de los vientos planetarios y estacionales, entre otros factores. Eventuales desequilibrios locales entre la energía absorbida y liberada por la superficie terrestre, o las posibles variaciones regionales de la temperatura, precipitación y humedad del suelo, determinarán el eventual impacto del cambio climático sobre los ecosistemas, la agricultura y los recursos hídricos.

Existen numerosas evidencias que demuestran que el clima terrestre ha evolucionado, tanto a lo largo de milenios como por las denominadas variaciones naturales del clima. Una de las más emblemáticas fue generada durante los períodos glaciares del Cuaternario, don-

de gigantescos volúmenes de agua formaron **casquetes polares**, haciendo retroceder el nivel del mar. Estos períodos glaciares fueron intercalados por los períodos interglaciares, que hicieron aumentar dicho nivel. En conjunto, estos ciclos temporales de aproximadamente 100 000 años generaron cambios de más de 100 m en el nivel medio del mar. Existen también variaciones en escalas de tiempo bastante menores como las sequías o las inundaciones, que son bastante frecuentes a escala mundial, y cuya incidencia varía considerablemente de un año a otro.

Figura 4.4:

Glaciar Garibaldi, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

(Foto: SHOA).



Figura 4.4



Figura 4.5

Figura 4.5:

Fuertes rompientes en la zona costera con potenciales daños a la infraestructura e inundaciones de las costas.

(Foto: Directemar).

Otra variación puntual del clima se debe a las erupciones volcánicas. Es conocido el hecho de que las nubes volcánicas de la estratosfera afectan el clima mundial y provocan un descenso de la temperatura media global o hemisférica. En un principio se pensaba que el volumen de cenizas expulsadas en una erupción explosiva era una buena medida de la densidad de la nube producida y, por lo tanto, de su efecto sobre el clima. Sin embargo, en los últimos años ha quedado claro que la mayor parte del polvo se deposita en pocos meses, y que las nubes volcánicas de larga vida están constituidas por un aerosol de ácido sulfúrico. Por consiguiente, la cantidad de gases ricos en azufre es un buen indicador de los efectos atmosféricos de una erupción volcánica.

Finalmente, una de las variaciones climáticas más estudiada en estos últimos años es el fenómeno de El Niño, que consiste en un calenta-

miento anómalo del agua superficial en el océano Pacífico ecuatorial que se produce a intervalos irregulares. Se debe enfatizar que el fenómeno de El Niño corresponde a la variabilidad climática, cuya relación con el cambio climático no ha sido establecida en forma empírica a nivel científico. No obstante, indicios recientes indican que durante los años El Niño, el nivel medio del mar mensual en Chile central puede elevarse hasta en 40 cm y la frecuencia e intensidad de los temporales tiende también a incrementarse (Martínez et al., 2015). En la siguiente sección, se analizarán la tendencia histórica y la proyección para el futuro de estas y otras variables, en el contexto del cambio climático.

4.3 TENDENCIAS Y PROYECCIONES

El continuo intercambio entre los sistemas atmosféricos y oceánicos es determinante en

el comportamiento del clima y su variabilidad. Algunas de las interacciones entre estos sistemas son simples y algunas más complejas y/o sinérgicas. En un escenario de aumento sostenido de la temperatura en la atmósfera a escala global, en los océanos debieran esperarse los siguientes efectos:

- Aumento en la temperatura de las aguas más superficiales.
- Mayor estratificación de las masas de agua.
- Disminución del O_2 disuelto en el agua (su solubilidad aumenta con la temperatura).
- Reducción del traspaso de O_2 de aguas superficiales a aguas profundas y viceversa.
- Aumento del nivel medio del mar.
- Cambio en la frecuencia e intensidad de los temporales y marejadas.

Así, el cambio climático tendrá consecuencias para los océanos, la atmósfera, el clima y, por ende, la vida en el planeta. Estos efectos a nivel mundial, sin embargo, no contemplan las condiciones tan particulares de nuestro territorio. Por ejemplo, en Chile no hay una clara tendencia al aumento del nivel medio del mar, y la temperatura superficial del mar ha marcado un descenso debido al incremento de la surgencia costera durante las últimas décadas. Ello obliga a analizar con detalle los efectos del cambio climático en nuestro país.

Figura 4.6:

Ejemplo gráfico de una visualización de la temperatura superficial del mar (TSM), a lo largo de la costa de Chile (eje y), entre los años 2003 y 2019. Los colores cálidos representan altas temperaturas ($> 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) asociadas a los períodos estivales principalmente en la zona centro y norte del país. Los colores fríos representan temperaturas menores ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) relacionadas a los períodos invernales principalmente en las zonas sur y austral del país. Las líneas de igual temperatura se presentan mediante líneas grises de 10, 15, 20 y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. La Figura hace evidente la estacionalidad de la TSM y su variación latitudinal en Chile.

(Fuente: TSM diaria satelital PODAAC. Gentileza de Pablo Córdova/SHOA).

4.3.1 Temperatura superficial del mar

Las masas de aguas oceánicas permiten el almacenamiento de enormes cantidades de energía en forma de calor, superando en más de 1000 veces la capacidad de almacenamiento de la atmósfera para un nivel equivalente de temperatura. En los últimos 150 años, numerosos trabajos científicos han evidenciado un aumento drástico en la temperatura del mar en todas sus capas, producto en parte del calentamiento global de origen antropogénico. De hecho, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés IPCC, indica con un 66 % a 100 % de certeza, que ha habido un aumento de la temperatura de los 700 m superiores del océano entre 1870

y 1971, certeza que aumenta de 99 % a 100 % entre 1971 y 2010. El mayor calentamiento del orden de $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década ocurrió en los primeros 75 m desde la superficie. Existe asimismo de un 66 % a 100 % de certeza de que las aguas oceánicas aumentaron su temperatura bajo los 3000 m de profundidad entre 1992 y 2010. Existe finalmente de un 66 % a 100 % de certeza de que la estratificación térmica

de los primeros 200 m se incrementó en un 4 % y que ha disminuido la concentración de oxígeno, debido a la disminución de aportes de O_2 desde aguas superficiales. Esta evidencia indica que, a escala mundial, las aguas oceánicas se están calentando, la estratificación fortaleciéndose y los procesos de mezcla vertical haciéndose menos eficientes.

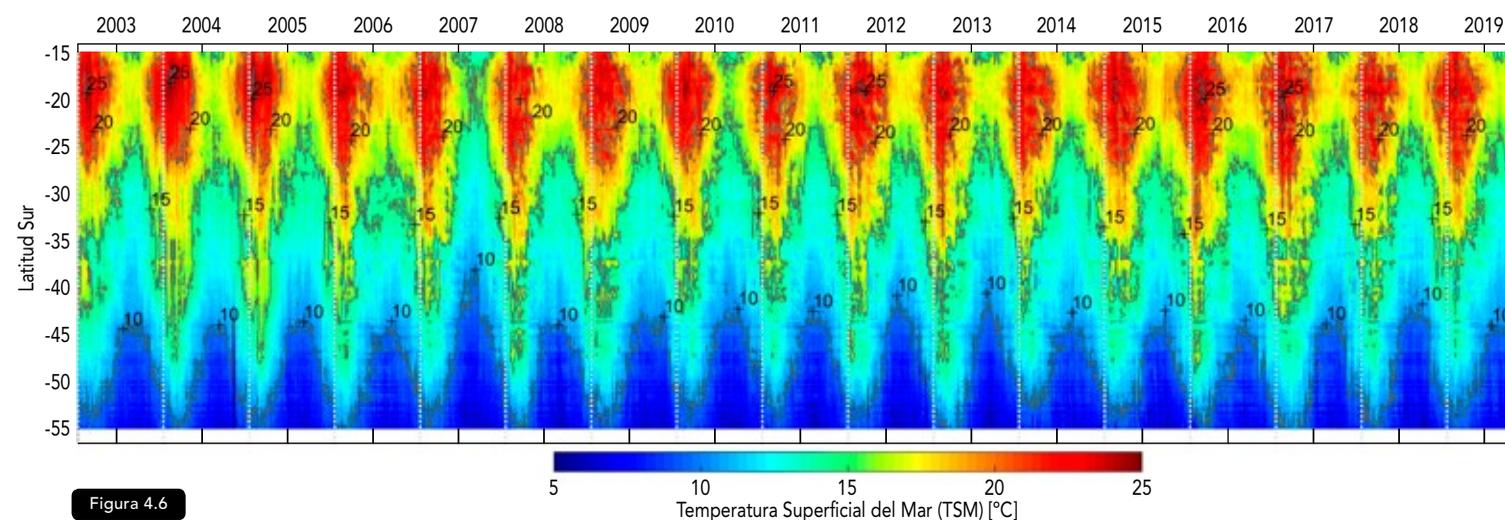


Figura 4.6

Figura 4.7:

Sala de Monitoreo de la Temperatura Superficial del Mar (TSM), ubicada en dependencias del SHOA.

Datos en línea de temperatura superficial del agua, del aire, presión atmosférica y humedad relativa.



Figura 4.7

En Chile, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) mantiene registros de la temperatura superficial del mar en varios puertos del país, cinco de los cuales abarcan desde mediados del siglo XX. Hasta 1999, estos registros se anotaban manualmente tres veces al día (mañana, mediodía y tarde), promediando los resultados para obtener una estimación de la temperatura media diaria. En los últimos años se reemplazó la medición manual por sensores digitales que registran cada hora. Las mediciones de TSM para Chile norte y central ($17^{\circ}\text{S} - 37^{\circ}\text{S}$) muestran un fuerte enfriamiento de aproximadamente $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década costa afuera, que es consistente con la tendencia negativa de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y con modelos de reconstrucción de dicha variable.

4.3.2 Oxígeno

Información científica reciente (Schmidtke *et al.*, 2017) concluye que en los últimos 50 años se ha registrado globalmente una reducción del 2 % en la concentración de oxígeno disuelto (O_2), donde el Pacífico norte y tropical dan cuenta del 40 % y el Pacífico sur, del 7.4 %. La causa sería mayoritariamente el aumento de la temperatura del agua, que acrecienta la solubilidad del O_2 y reduce la ventilación oceánica. El O_2 juega un rol esencial en la vida. La reducción de su concentración en aguas oceánicas puede tener impactos profundos sobre el plancton y las pesquerías. Del mismo modo, se observan ampliaciones de las llamadas zonas de mínimo de oxígeno (ZMO) que existen en el Pacífico suroriental frente a Perú y Chile (Keeling *et al.*, 2010; Mayol *et al.*, 2012).

4.3.3 Acidificación

Al igual que con el O_2 , el CO_2 oceánico está relacionado con los procesos de oxigenación, respiración y productividad. El IPCC estima que entre 1750 y 2011, las emisiones de CO_2 de origen antropogénico a la atmósfera se incrementaron en aproximadamente un 40 %, gran parte de las cuales se produjeron en los pasados 50 años. Según Winckler *et al.*, 2019, un 40 % de estas emisiones permanece en la atmósfera, un 30 % ha sido almacenado en los vegetales y suelos y un 30 % ha sido absorbido por el océano.

La acidificación de aguas costeras en Chile ha sido poco es-

tudiada. El trabajo de Vargas *et al.* (2017) para aguas costeras en los 10 m superiores muestra presiones parciales de CO_2 que son 3 a 4 veces mayores que las de aguas oceánicas abiertas, como consecuencia de factores locales como desembocaduras de ríos, las zonas de surgencias marinas y la alta productividad primaria. El trabajo concluye que la adaptación de las especies marinas a una mayor acidificación oceánica puede ya estar en curso. Finalmente, cabe enfatizar que se han alterado los balances geoquímicos en los océanos, con efectos en el pH, en el ciclo del carbonato y, por ende, en las especies marinas.

4.3.4 Nivel medio del mar

La evidencia científica indica que, a escala global, existe un alza del nivel medio del mar (NMM) asociada al calentamiento de la atmósfera producto de la emisión indiscriminada de gases de invernadero. Esta realidad llevó a que organizaciones intergubernamentales como la OMM (Organización Meteorológica Mundial) y el PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) conformaran el IPCC en el año 1988, el cual es en la actualidad el referente para estas materias. El quinto informe del IPCC (2013) asegura que el NMM se ha elevado entre 10 y 25 cm durante los últimos 120 años, y que existe evidencia abundante para establecer una conexión entre dicho aumento y la influencia del hombre.

El NMM experimenta cambios debido a la fluctuación del volumen total de los océanos,

que a su vez se explica por las variaciones en la temperatura del planeta. El factor más importante que justifica su aumento es la expansión térmica del mar, responsable del 80 % de la variación observada en los últimos 110 años seguido del cambio en la masa de los glaciares continentales, cuya contribución asciende al 15 %, y fenómenos indirectos como las variaciones en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes superficiales. Adicionalmente, el NMM experimenta fluctuaciones cíclicas irregulares, donde el fenómeno El Niño es el principal responsable. De acuerdo con el IPCC (2014), el NMM promedio mundial se elevó 0.19 m \pm 0.02 m entre 1901 y 2010, y se espera que aumente entre 26 y 82 cm entre 2081 y 2100.

El IPCC señala que estos cambios no se producirán uniformemente alrededor del planeta y repercutirán más bien a escala regional. Esta situación es delicada ya que la elevación del NMM producirá un incremento en la erosión costera y en la inundación de grandes extensiones de territorio que albergan parte considerable de la población mundial. Dicha elevación también generará pérdida física del territorio, incidiendo negativamente en numerosas actividades económicas vitales de los estados ribereños.

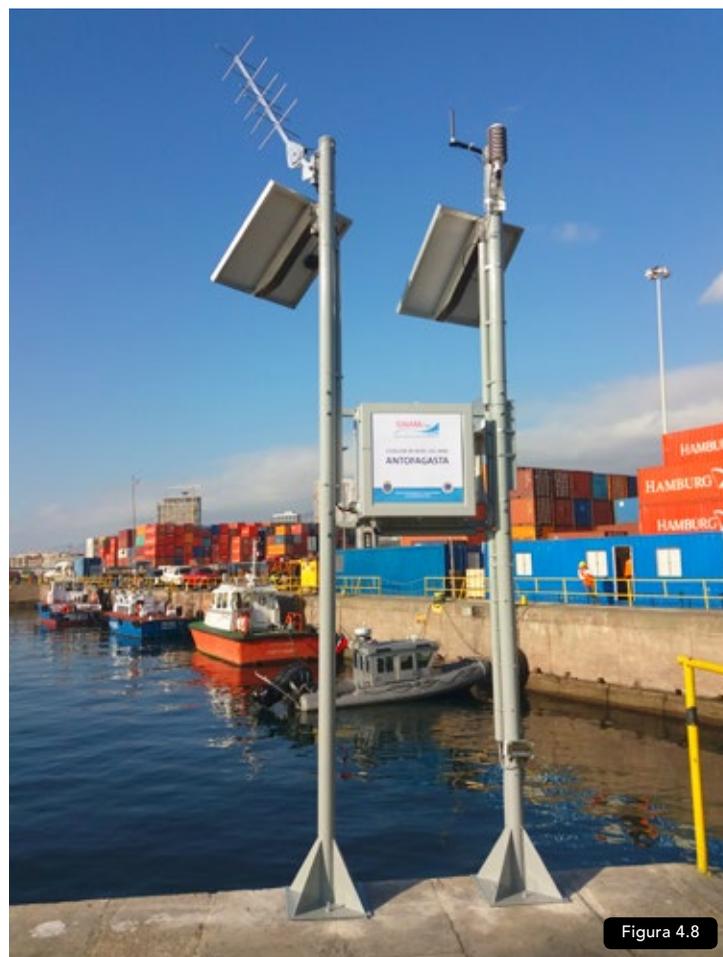


Figura 4.8

Figura 4.8:

Estación de Nivel del Mar ubicada en el puerto de Antofagasta (Región de Antofagasta) y operada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Estas plataformas colectoras de datos permiten la observación metódica del nivel del mar relativo al terreno.

(Foto: SHOA).

Figura 4.9:

Aumento del nivel del mar proyectado para Valparaíso al 2100, a partir de 21 modelos climatológicos globales, respecto al período 1986-2005.

La línea azul corresponde a la mediana de todos los modelos y el área celeste, al rango entre ellos.

Esta gráfica no contempla los efectos de deformación vertical de la corteza terrestre producto del ciclo sísmico.

(Estudio de Winckler *et al.*, 2019)

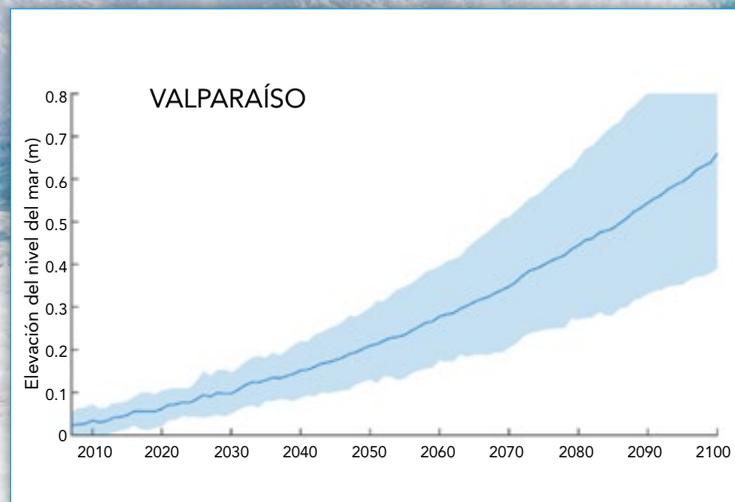


Figura 4.9

A escala mundial, el aumento del NMM afectará a regiones bajas en Bangladés, Florida, los Países Bajos, el mar del Plata, el delta del río Nilo y algunos Estados-isla como las Maldivas en el Índico, o los archipiélagos de Kiribati o Tuvalu en el Pacífico, donde incluso ya ha comenzado la migración hacia otros países. La estabilidad de dichos territorios dependerá, por una parte, de las características físicas de cada una de esas costas, y por otra, de la capacidad de los Estados para generar medidas de adaptación. El destino de países pobres, ciertamente, será muy distinto al de los países desarrollados.

En América del Sur, los cambios del NMM afectarán en forma distinta a las costas acantiladas que caracterizan a la fachada occidental del continente, de las costas bajas y arenosas que predominan en su vertiente atlántica. En estas últimas los procesos naturales podrían causar 1 km de erosión por cada centímetro de alza del NMM. En los grandes estuarios, por su parte, la cuña salina podría avanzar al interior del territorio 1 km por cada 10 cm de subida del NMM.

Como contrapartida, en el litoral del Pacífico suroriental que incluye Colombia, Ecuador, Perú y Chile, los procesos tectónicos generan cambios mucho más importantes y rápidos sobre el NMM que los asociados al **cambio climático**. Los movimientos cosísmicos, que ocurren durante un terremoto, pueden traducirse en solevantamientos o subsidencia costera del orden de metros. Por ejemplo, en el terremoto de marzo de 1985 se generaron solevantamientos de hasta 60 cm, entre San Antonio y Valparaíso (Castilla, 1988), y en el del 27 de febrero de 2010 se produjeron solevantamientos del orden de 2.5 m en la isla Santa María y subsidencias de hasta 1 m al norte de Concepción (Vargas *et al.*, 2011). Estos valores son bastante mayores que el incremento medio de 0.19 m \pm 0.02 m que experimentó el NMM a nivel global entre 1901 y 2010.



Figura 4.10

Figura 4.10:

Boya Axys, Watchkeeper, operada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Permite medir parámetros de oleaje como la altura, la dirección, el período y el espectro energético.

(Foto: SHOA).

En base de modelos numéricos, Albrecht & Shaffer (2016) proyectaron aumentos del nivel medio en la costa de Chile entre 34 a 74 cm para diferentes escenarios a fines del siglo XXI. Si bien estos valores son menores que los esperables para los grandes terremotos, estos contribuirán de todos modos a los cambios en la dinámica costera. Vivir en un país sísmico nos obliga, por ende, a mirar en forma simultánea las contribuciones de la tectónica y del cambio climático para la proyección del NMM.

4.3.5 Oleaje

En Chile no existe una red permanente de medida del oleaje en aguas profundas y solo se cuenta con registros cortos en pocas localidades. Por su parte, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada opera tres boyas oceanográficas instaladas en puntos específicos frente a la costa (Figura 4.10). La cobertura espacial y temporal, no obstante, aún es insuficiente para la extensión del territorio oceánico. Con el fin de suplir esta carencia, se publicó el *Atlas de Oleaje para Chile* (Beyá *et al.*, 2016), que ofrece acceso libre y gratuito a 35 años de estadísticas de oleaje frente a las costas, reconstruidas mediante un mo-

Atlas de Oleaje de Chile

<https://oleaje.uv.cl/>



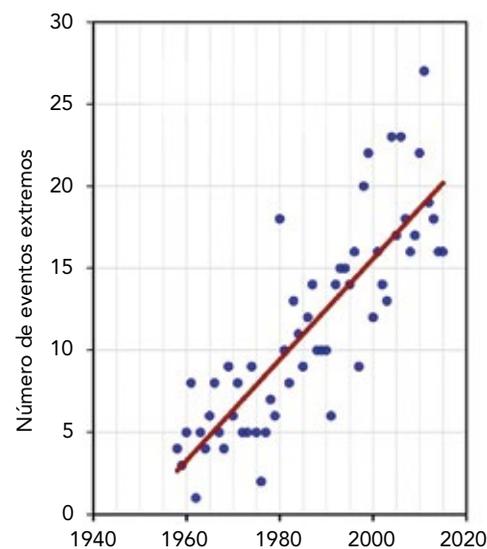


Figura 4.11 a

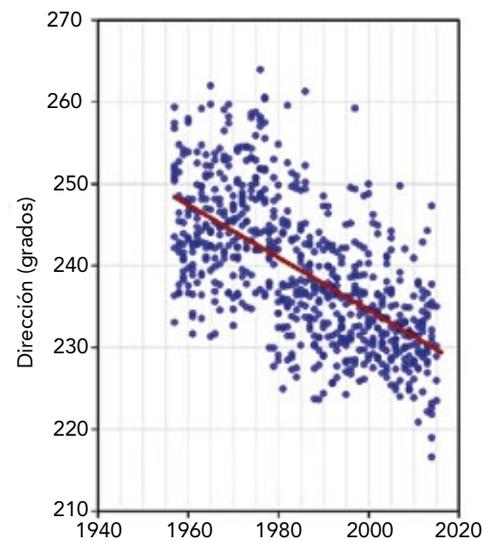


Figura 4.11 b

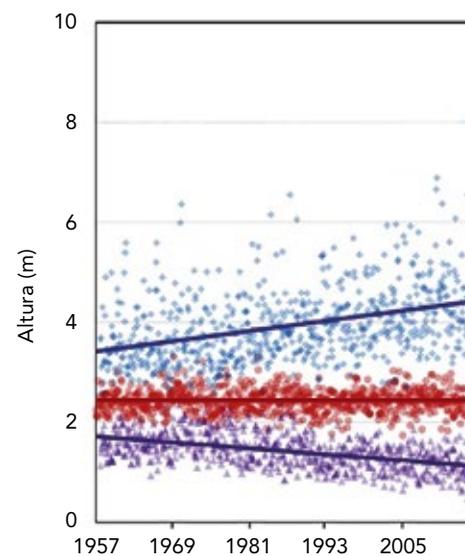


Figura 4.11 c

delo numérico calibrado con altimetría satelital y boyas ocasionales. A partir de dicha estadística, Winckler *et al.* (2019) constataron que en todo Chile ha habido un aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas.

A partir del análisis de 20 años en Chile central, Molina (2011) evidenció aumentos de 10 cm en la altura significativa, un giro de 12° en la dirección del oleaje hacia el sur y cambios menores en el período; variaciones que también se ven alteradas por el fenómeno El Niño. No obstante, estas estadísticas son cortas para evaluar tendencias y variabilidad a largo plazo. Martínez *et al.* (2018) observaron un aumento de cinco eventos anuales a mediados del siglo XX a más de 20 a comienzos del siglo XXI frente a Valparaíso (Figura

4.11), el que podría deberse a un incremento en la frecuencia y/o intensidad de los temporales en el tiempo, un aumento de la infraestructura costera existente o una combinación de ambos.

En Chile, existen escasas proyecciones a futuro del clima de oleaje. En lo relativo al clima medio, CEPAL (2011) encuentra tendencias de aumento en la altura significativa media mensual al año 2070 de entre 3 cm en la zona norte y 6 cm para el extremo sur del país. Algunos investigadores como Church *et al.* (2013), prevén aumentos del orden del 5 % en la altura significativa media para la mayoría del territorio, excepto para las Regiones de la Araucanía y de Los Lagos, donde se prevé una disminución superior al 5 %.

En el estudio «Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile» (Winckler *et al.*, 2019), se entregan proyecciones de oleaje (marejadas), nivel medio del mar y cota de inundación, basadas en el período histórico 1985 - 2004 y la proyección 2026 - 2045, correspondiente al escenario de emisiones RCP 8.5⁴ del IPCC. La Figura 4.12 presenta resultados para el clima de oleaje medio en toda la cuenca del Pacífico y frente a Chile. El estudio concluye que los cambios en el clima medio no serán tan relevantes llegando a fin de siglo, pero las marejadas serán más intensas y frecuentes, siguiendo la tendencia reportada en el mismo estudio para el período 1980-2015. Cabe notar que el estudio generó, además de proyecciones de la amenaza, información de exposición, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas humanos y naturales de la zona costera ubicados en 104 comunas costeras de Chile continental, Rapa Nui y el archipiélago de Juan Fernández.

Cofré & Beyá (2016) cuantificaron el clima extremo de oleaje futuro en Chile, el cual permite definir la altura significativa de período de retorno de 50 años, comúnmente utilizada para diseño de obras marítimas (DOP, 2013). La comparación del período histórico (1980 - 2005) con ventanas futuras (2026 - 2045 y 2081 - 2100) indica que la tendencia general es al aumento de la altura extrema a mediados de siglo y a una estabilización a fines de siglo. Este resultado podría ser benévolo, pero requiere de estudios complementarios que evalúen la incertidumbre.

⁴ RCP 8.5: Escenario de emisiones que corresponde a un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo. En este escenario, la temperatura probablemente no excederá los 4 °C.

Figura 4.11:

Evolución temporal de estadísticas de oleaje entre 1958 y 2015 en aguas profundas frente a Valparaíso.

- a) Número de eventos extremos anuales de oleaje.
- b) Dirección media mensual.
- c) Altura significativa promedio (círculos en contorno negro), máxima (diamantes grises) y mínimos mensuales (triángulos), con sus respectivas rectas de ajuste.

(Adaptado de Martínez *et al.*, 2018).

Figura 4.12:

Altura significativa del oleaje en el período histórico 1985-2004, proyección 2026-2045. En toda la cuenca del Pacífico (arriba) y frente a Chile (abajo), obtenidos por Winckler *et al.*, (2019). En las Figuras de la derecha, el rojo corresponde a aumento y el azul a reducción de la altura significativa.

Específicamente, el estudio de oleaje se basó en el uso de un modelo de generación (Wavewatch III⁵) forzado mediante 6 modelos de viento con buen rendimiento en el océano Pacífico sudeste. La validación de WWIII se fundamenta en registros de boyas direccionales y altimetría satelital entre 1980 y 2015, de acuerdo con la metodología de Beyá *et al.* (2017).

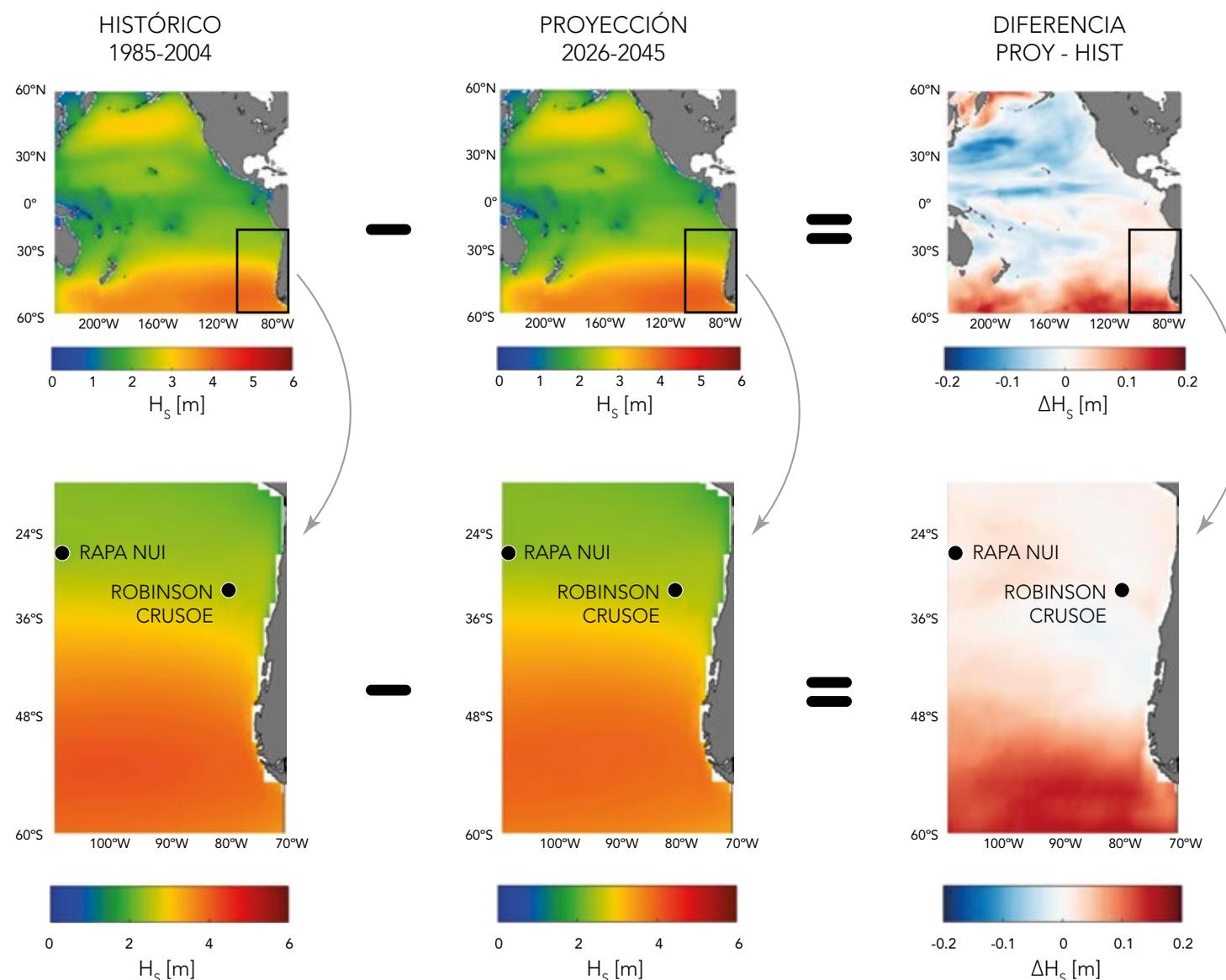


Figura 4.12

Tabla 4-I:

Resumen de diferencias de parámetros de viento y oleaje entre el período histórico (1985- 2004) y la proyección (2026-2045) en las 4 zonas geográficas de Chile. Celdas con guion representan cambios despreciables. (Fuente: Winckler *et al.*, 2019)

PARÁMETRO	ZONA NORTE 19°S – 32°S	ZONA CENTRO 32°S – 37°S	ZONA SUR 37°S – 44°S	ZONA AUSTRAL 44°S - 55°S
Viento superficial	Aumento	Disminución	Disminución	Variable
Altura del oleaje	—	—	—	Aumento
Período del oleaje	Disminución	Aumento	Aumento	Aumento
Dirección del oleaje	—	Giro al sur	Giro al sur	—

Tabla 4-I

⁵ Modelo de tercera generación desarrollado por la National Atmospheric and Oceanographic Administration de los EE.UU. (NOAA), capaz de simular los fenómenos de generación, propagación y disipación del oleaje.

4.4 IMPACTOS EN LA ZONA COSTERA DE CHILE

Algunos de los principales impactos asociados al cambio climático en el territorio costero chileno se ilustran en la Tabla 4-II.

Estos impactos se deben, en forma directa, a las variaciones del NMM, cambios en la frecuencia e intensidad de las marejadas, alteraciones en el régimen de precipitaciones y cambios en las corrientes oceánicas, entre otros. Dada la variedad de impactos asociados al cambio climático en la zona costera, se muestran ejemplos sobre algunos de estos sistemas.

4.4.1 Playas

Las playas juegan un rol clave en la defensa natural de las costas, dando soporte al turismo y esparcimiento de las comunidades. Por estar constituidas por arena, tienen la capacidad de adaptar su forma a las condiciones medias del verano, caracterizadas por un oleaje de baja energía, y a las marejadas del invierno. En palabras simples, las playas son el mecanismo más eficiente de protección costera ante los eventuales cambios en los patrones de oleaje y nivel del mar.

El cambio climático puede suponer una variación en la cota de inundación en una playa y un retroceso o avance de la línea de costa. A nivel mundial, Bird (2011) indica que cerca del 70 % de las playas retrocedieron por efecto de la erosión entre 1976 y 1984. Como orden de magnitud y mediante la regla de Bruun, se puede estimar un retroceso de 100 metros en la línea de costa por cada metro de ascenso del NMM para playas típicas de pendiente en torno a 0.01. Esta regla, no obstante, puede ser excesivamente simplificada para casos particulares, de acuerdo a Cooper & Pilkey (2004). Otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía del oleaje. Dicho retroceso es altamente dependiente del tipo de playa y de la propagación que el oleaje sufra desde aguas profundas.

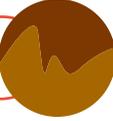
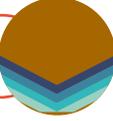
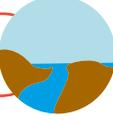
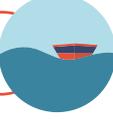
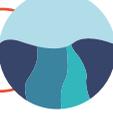
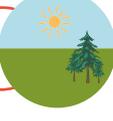
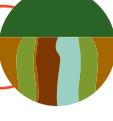
1	Inundación de las zonas bajas	
2	Cambios en la dinámica y desaparición de humedales	
3	Erosión de playas y acantilados	
4	Pérdida de campos dunares	
5	Pérdida de sistemas deltaicos	
6	Cambios en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios	
7	Efectos sobre la operación de puertos y caletas	
8	Mayor frecuencia de daños sobre las obras marítimas	
9	Intrusión salina en acuíferos costeros	
10	Alteración de los ecosistemas y el paisaje	
11	Efectos sobre la agricultura y los recursos hídricos	
12	Trastornos sobre la pesca y la acuicultura	

Tabla 4-II

Tabla 4-II:

Principales impactos asociados al cambio climático en el territorio costero chileno.

(Elaboración propia).

LOS PROCESOS DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS SON ATRIBUIBLES A	ASOCIADOS A
Factores oceanográficos	<ul style="list-style-type: none"> • el incremento en la frecuencia e intensidad de marejadas; • cambios en la dirección del flujo medio de energía del oleaje; • el aumento del nivel medio del mar absoluto;
Factores geofísicos	<ul style="list-style-type: none"> • la subsidencia o el levantamiento cosísmico durante eventos recientes; • cambios más lentos ocurridos durante las diferentes etapas del ciclo sísmico;
Factores antropogénicos	<ul style="list-style-type: none"> • cambios en el aporte sedimentario de los ríos debidos a la expansión urbana; • la extracción de arenas para construcción; • la construcción de presas sin un debido sistema de gestión de sedimentos; • efectos locales debido a la construcción de obras costeras; • la extracción de algas en zonas expuestas al oleaje; • sobrecarga del terreno por edificaciones; • extracción de aguas subterráneas;
Factores hidrológicos	<ul style="list-style-type: none"> • la variabilidad climática manifestada en eventos como la megasequía de la zona central (CR2, 2015); • procesos a mayor escala asociados al cambio climático.

Tabla 4-III:

Factores que contribuyen a la erosión de playas.

(Elaboración propia).

Tabla 4-III



Playa Porma, Región de la Araucanía.

(Fuente: futuro360.com).



Figura 4.13 a



Figura 4.13 c

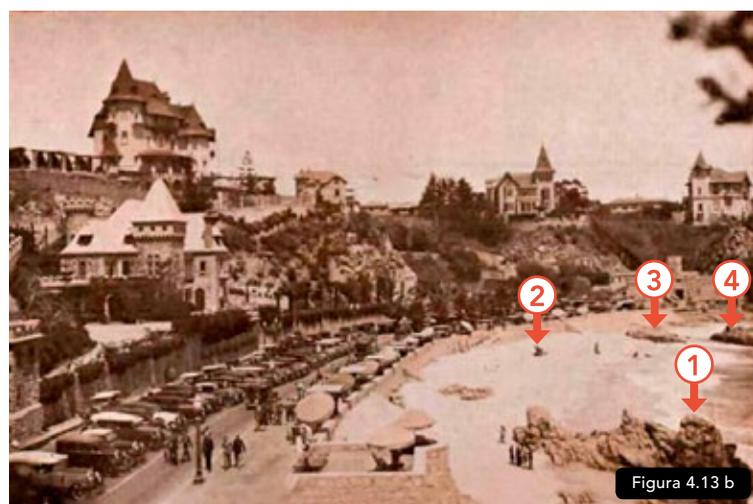


Figura 4.13 b



Figura 4.13 d

En Chile, no obstante, se conoce poco sobre la erosión costera. En Viña del Mar, por ejemplo, se sabe de la desaparición de las playas urbanas de Miramar (Figura 4.13) y Recreo (Figura 4.14) por efecto de la construcción de los ca-

minos costeros, pero no existe evidencia alguna de que esta pérdida se deba al cambio climático. Los escasos estudios sobre morfodinámica de playas aumentaron considerablemente luego del terremoto y tsunami del 2010, incorpo-

rando técnicas de modelación, monitoreo mediante sistemas de video y registros de campo (Martínez *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2015; Villagrán *et al.*, 2011 y Cienfuegos *et al.*, 2014). Por otra parte, las escasas campañas de monitoreo de playas se han hecho más sistemáticas luego del temporal del 8 de agosto de 2015 (Molina *et al.*, 2015; Agredano *et al.*, 2015), que causó pérdidas cuantiosas de arenas en las playas de Quintero y Valparaíso (Winckler *et al.*, 2017).



Figura 4.14 a



Figura 4.14 b

Figura 4.13:

Playa Miramar, Viña del Mar.

a) Año 1913, vista desde el sur. Se observa una playa con abundante arena.

(Foto: Augusto Bruna).

b) Año 1930. Una vez construida la avenida Marina, la playa vista desde el norte. Esta aún se mantiene estable y se identifican roqueríos (1-4) aflorando sobre la arena.

c y d) En la actualidad, la playa ha desaparecido casi completamente y los roqueríos dominan el entorno.

Figura 4.14:

Balneario de Recreo, Viña del Mar. a) en la década de los cincuenta y b) en el año 2009, restos de la infraestructura existentes.

(Fotos: Reproducción de postal/ P. Winckler).

En Winckler *et al.* (2019) se constató que el 80% de un total de 35 playas analizadas en las regiones de Antofagasta, Valparaíso, Maule y Biobío se encuentran con erosión (entre 0.5 y 1.5 m anuales) o erosión alta (más de 1.5 m anuales). El análisis se efectuó para un período del orden de 30 años dependiendo de la disponibilidad de fotos aéreas, imágenes satelitales y levantamientos topográficos en cada playa. Los casos con erosión alta corresponden a la playa de Hornitos en la región de Antofagasta y a las playas de Algarrobo y Santo Domingo en la región de Valparaíso (Figura 4.15). Estas son playas de ensenada donde se desarrollan extensos litorales arenosos, asociados a antiguos campos dunares y humedales costeros. Asimismo, se indica que, para el escenario RCP 8.5 en el período 2026-2045, las playas ubicadas entre Arica y el canal Chacao experimentarán retrocesos medios anuales de entre 3 y 23 m, que se suman a la variabilidad natural que experimentan los perfiles de playa en verano e invierno. Playas con tamaños de sedimentos finos experimentarán mayores retrocesos que playas de arena gruesa, en tanto que aquellas con menor cantidad de arena serán más erosionadas que aquellas con mayores reservas de material. Asimismo, las playas largas tenderán a girar experimentando erosión en sus extremos sur y **acreción** en sus extremos norte.

4.4.2 Humedales costeros

Los humedales son «extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad de marea baja no exceda 6 metros» (RAMSAR, 1971). Los humedales costeros, por su parte, representan ambientes sensibles a las características de las masas de agua que entran y salen de ellos (Niering, 1985). Estos cuerpos de agua ofrecen una serie de servicios ecosistémicos, como los de «retención y remoción de nutrientes, estabilización de la línea de costa, **secuestro de carbono**, contención de sedimentos, provisión y mejoramiento de la calidad del agua y aminoramiento del efecto de las tormentas, inundaciones y otros desastres naturales; esto último, por el rol que cumplen en atenuar la intensidad y altura del oleaje» (Marquet *et al.*, 2012).

Figura 4.15:

El 80 % de un total de 35 playas analizadas en las regiones de Antofagasta, Valparaíso, Maule y Biobío se encuentran con erosión. Representación del sector de la Región de Valparaíso, con los resultados de Winckler *et al.* (2019).



Figura 4.15

Figura 4.16:

Humedal de El Yali, al sur de San Antonio, Región de Valparaíso.

(Foto: Gentileza Manuel Contreras-López).



Figura 4.16

Hacia el 2012, en el tramo de Chile centro-sur comprendido entre los 30° S y 41° 4' S, existían 412 humedales costeros con un total de 38 167 ha, que en conjunto conforman un complejo corredor ecológico fragmentado (Marquet *et al.*, 2012). Estos humedales son ambientes extremadamente dinámicos y frágiles, y su existencia se encuentra condicionada por una gran variedad de factores naturales y antropogénicos, entre los que se cuentan la variabilidad hidrológica y climática, el alto contenido energético litoral, la variabilidad en la disposición de sedimentos y los procesos tectónicos de la costa chilena. Esta combinación tan particular de factores solo tiene referentes similares en algunos sectores de Sudáfrica, Australia (Cienfuegos *et al.*, 2012) y Nueva Zelanda (Nichol *et al.*, 2007). Fariña & Camaño (2012) efectúan una buena recopilación de trabajos científicos orientados a dar una gestión sustentable a los humedales costeros de Chile.

Así, por ejemplo, en la laguna costera El Yali (Figura 4.16), al sur de Santo Domingo, se han experimentado drásticos cambios morfológicos durante los últimos años, producto de los efectos del terremoto y tsunami del año 2010 en combinación con una prolongada sequía. En este sentido, Fariña & Camaño (2012) sugieren que el cambio en el régimen de precipitaciones puede alterar la dinámica del humedal, facilitando las conexiones con el mar cuando existe aporte de precipitaciones y disminuyendo su espejo de agua en períodos de sequía. Contreras *et al.* (2017), por su parte, mostraron que 57 humedales costeros, ubicados entre la región de Valparaíso y Coquimbo, redujeron en un 40 % sus espejos de agua entre el año 2007 a 2016, producto de una prolongada sequía.

En resumen, desde la perspectiva del manejo costero y en un contexto de cambio climático, los humedales juegan un rol fundamental que debe preservarse mediante estrategias sustentables y armónicas con los usos actuales y futuros del territorio costero. En esta línea, Losada (2008) propone medidas como:

- Favorecer la migración hacia el interior de marismas y humedales.
- Evitar la construcción de infraestructura (paseos, caminos y edificaciones) en zonas altamente vulnerables.
- Relocalizar en espacios no inundables y/o abandonar instalaciones e infraestructura existente a una distancia apropiada de la zona costera.
- Introducir estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio climático en la planificación territorial de zonas parcialmente recuperables.
- Promover la compra de terrenos con fines de conservación.
- Proteger los ecosistemas en peligro.

4.4.3 Puertos

En los próximos años, el sector portuario deberá hacer inversiones para adaptarse a los profundos cambios en la tecnología de la industria naviera (por ejemplo, el tamaño de los buques y la forma de transferencia de la carga), a los nuevos estándares en la relación con la comunidad y al cambio climático.

De acuerdo con el marco estratégico para la adaptación de las

infraestructuras relacionadas al cambio climático (CCG, 2013 pp. 73-74), los puertos presentan una serie de particularidades que los hacen especialmente sensibles, a saber:

- *Su vida útil es larga, superando en muchas ocasiones los 50 años, siendo entonces particularmente sensibles frente a los cambios futuros del clima.*
- *Por su localización en las costas, ríos o lagos, están expuestos a una gran variedad de acciones, tales como el ascenso del nivel del mar, las variaciones en marea meteorológica, tsunamis, oleaje y vientos extremos, inundaciones fluviales, embancamiento o socavación, incluso levantamientos o hundimientos (subsidiencias) de origen tectónico.*
- *Las operaciones portuarias se ven afectadas por las condiciones climáticas, produciendo retrasos en la actividad comercial del puerto.*
- *Los puertos son vulnerables a cambios económicos en el mercado global, derivados del cambio climático.*
- *Las mercancías y su demanda/oferta pueden ser sensibles a cambios en las condiciones climáticas (por ejemplo, combustible o productos de agricultura).*
- *El movimiento de mercancías hacia los centros de distribución en tierra depende de infraestructuras de transporte, generalmente gestionadas por entidades externas al puerto, y que, a su vez, se ven afectadas de diversas maneras por el cambio climático.*
- *Como otras instalaciones industriales, son vulnerables a afectaciones sobre servicios como el agua o la electricidad.*

La Tabla 4-IV resume los impactos generados por los variables climáticas (denominadas *drivers* en la literatura especializada) que afectan a la navegación y a la actividad portuaria. Uno de los aspectos relevantes dice relación con el impacto de la climatología en las operaciones portuarias en Chile. Durante los episodios de mal tiempo, los puertos se cierran para garantizar la seguridad de las naves, carga y operadores. Esto se traduce en pérdidas económicas del orden de millones de dólares para los concesionarios portuarios y, a fin de cuentas, para el erario público. A pesar de que las estadísticas de cierre de puertos son escasas en Chile —existen sistemáticamente desde el 2008 (Winckler *et al.*, 2019)—, en la última década se observa un incremento notorio en los principales puertos del centro y del norte. Por ejemplo, de acuerdo con los datos proporcionados por la Empresa Portuaria de Antofagasta, dicho puerto permaneció cerrado el equivalente a dos meses en 2015 debido a acciones climáticas. Aun cuando dicha estadística es muy corta como para atribuir este comportamiento al cambio climático, el hecho de que haya un incremento en el número de eventos extremos de oleaje en los últimos 50 años (Martínez *et al.*, 2018), obliga a idear medidas de adaptación para reducir los cierres de puertos. Entre estas medidas se pueden mencionar el uso de sistemas de predicción de oleaje para cada sitio de atraque o el uso de sistemas dinámicos de amarra de buques, entre otros.

IMPACTO POTENCIAL	DRIVERS	INFRAESTRUCTURA	OPERACIONES	NAVEGACIÓN	ENTORNO
Degradación, fallo y reparación de las estructuras (fiabilidad)	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Aumento de las marejadas. 	✓	✓		
Cambio en las necesidades de dragado	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje. 		✓	✓	
Inundación de áreas bajas	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Aumento de las marejadas. 	✓	✓		
Sobrepaso las estructuras	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Aumento de las marejadas. 	✓	✓		
Pérdida/acreción de arena y sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> Cambios en la frecuencia, duración e intensidad de los temporales. Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje. 	✓		✓	✓
Retranqueo de la línea de costa adyacente (afección a líneas de comunicación terrestre)	<ul style="list-style-type: none"> Niveles extremos de inundación. Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje. 	✓	✓		✓
Pérdida de terreno industrial	<ul style="list-style-type: none"> Niveles extremos de inundación. Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje. 	✓	✓		
Reducción de la capacidad de recuperación natural del sistema costero adyacente	<ul style="list-style-type: none"> Niveles extremos de inundación. Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje. 				✓
Problemas a la navegación	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Aumento de las marejadas. 		✓	✓	
Mayor exposición de los muelles y embarcaderos	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Aumento de las marejadas. 	✓	✓		
Disminución de la operatividad de puertos	<ul style="list-style-type: none"> Cambios en la velocidad y dirección del viento. Cambio en la intensidad y/o frecuencia de las marejadas. Cambios en la frecuencia de nieblas. 		✓	✓	✓
Pérdida en la capacidad de almacenamiento y procesamiento de mercancía	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de los niveles medio y extremo del mar. Aumento de las marejadas. Cambio en el régimen de precipitaciones. Aumento de la temperatura. 	✓	✓		
Acceso a rutas polares	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la temperatura. Derretimiento de los casquetes polares. 		✓	✓	✓

Tabla 4-IV:

Impactos potenciales en los puertos y vías de navegación debido a *drivers* climáticos (Fuente: CCG, 2013). Se llaman *drivers* a las variables que generan un impacto.

Tabla 4-IV



Figura 4.17

4.4.4 Ciudades costeras

El cambio climático puede suponer importantes aumentos en el sobrepaso de obras marítimas, pérdidas de playas e inundación en los paseos marítimos de las ciudades costeras. En la Figura 4.17, se muestra un ejemplo ocurrido durante el temporal del 8 de agosto de 2015 en Valparaíso, que provocó la pérdida de playas, destrucción de infraestructura y de mobiliario público e incluso el corte del metro regional de Valparaíso durante una semana (Winckler *et al.*, 2017). El sobrepaso conlleva un riesgo a la seguridad de las personas y vehículos, como es frecuente observar en las avenidas costeras de Viña del Mar, La Serena, Antofagasta, Iquique y Arica durante los temporales de invierno.

Con el fin de minimizar los riesgos asociados al cambio climático, las ciudades debieran crecer al alero de una planificación urbana que incorpore las variables que este fenómeno conlleva. Desafortunadamente, la planificación urbana suele estar impulsada por intereses de corto plazo asociados a la demanda de viviendas residenciales y turísticas (Yepes & Medina, 2005). Las dunas fósiles de Reñaca, Viña del Mar (Figuras 1.20 y 1.21), y de las

playas de La Serena, Algarrobo y Arica son ejemplos donde esta presión inmobiliaria ha terminado por dañar sistemas sensibles.

Idealmente, en una planificación inteligente, ríos, esteros, dunas y playas debieran permanecer inalterados, de modo de permitir su adaptabilidad a los ciclos naturales. Las futuras obras deben emplazarse fuera de la «zona morfodinámicamente activa», donde el suelo se mueve producto de las dinámicas oceánicas, con el objeto de minimizar la desestabilización de playas.

La omisión de estudios que caractericen los procesos costeros en el marco de la planificación urbana es una de las causas de la erosión y daños como ocurrió en las playas Miramar (Figura 4.13) y Recreo (Figura 4.14). Cuando no se comprenden estos procesos y se permite la construcción de edificios e infraestructura sobre los campos dunares, se corre el riesgo de eliminar los depósitos de sedimentos naturales que podrían movilizarse durante los eventos extremos. El uso de estructuras reflejantes cerca de la costa contribuye también a reducir el ancho de las playas, promoviendo el proceso erosivo e incluso su desaparición.

La planificación urbana debe, por lo tanto, basarse en criterios de adaptación al cambio climático, entre los que destacan:

- La modificación del uso del suelo considerando bajas densidades constructivas en zonas vulnerables. En Chile, un ejemplo interesante es el de Pelluhue (Igualt *et al.*, 2017), donde mediante el Plan Regulador Comunal, implantado luego del tsunami de 2010, se generaron zonas de áreas verdes (ZAV), con prohibición de edificaciones, y zonas turísticas de borde costero (ZTBC), donde se restringió la densidad de uso del suelo a viviendas menores.
- La adaptación de las normas de edificación a la inminente amenaza del cambio climático, siguiendo lo desarrollado para los tsunamis en Chile (MINVU, 2013; INN, 2015).
- La reconversión de usos en la zona costera a aquellos que sean compatibles con el cambio climático futuro. Un ejemplo poco aplicable en Chile, pero bastante ilustrativo, es el desarrollo de viviendas e instalaciones flotantes en los Países Bajos.

Dado que la planificación urbana se pondrá a prueba en escalas temporales muy largas, se hace necesario considerar escenarios basados en hipótesis de crecimiento social y económico en zonas costeras, cuya incertidumbre debe ser estimada.

Los esfuerzos de adaptación al cambio climático en lo nacional, desafortunadamente, no se enfocan en proponer medidas concretas para los puertos y ciudades costeras. Recientemente, por ejemplo, se desarrolló una «Estrategia Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación para un Chile resiliente frente a desastres de origen natural» (CNID, 2016), que pone énfasis en las medidas de adaptación frente al cambio climático, y se redactó la «Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático» (MOP y MMA, 2017), donde se identifican algunos aspectos sobre la vulnerabilidad del país y su adaptación. La comunidad científica, las autoridades, los operadores portuarios y la comunidad interesada en el uso y conservación de la zona costera debieran en lo sucesivo acometer estudios orientados a evaluar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de este territorio ante el cambio climático.

Figura 4.17:

Erosión en playa Caleta Portales (Región de Valparaíso) luego de la marejada del 8 de agosto de 2015.

(Fotos: Gentileza de Mauricio Molina Pereira).



Humedal de Salinas Chicas, ubicado en la playa grande de Tongoy, Región de Coquimbo.

(Foto: Cristián Larraguibel y Manuel Contreras-López).

4.5 ADAPTACIÓN

En el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, CMNUCC (Acuerdo de París, 2015) fueron identificados dos tipos de medidas: de mitigación y de adaptación. Las medidas de mitigación son las acciones encaminadas a la reducción de las emisiones y captura de los gases de efecto invernadero; mientras que las medidas de adaptación se orientan a la reducción de la vulnerabilidad ante los distintos efectos derivados del cambio climático. Por lo tanto, la mitigación se ocupa de las causas del cambio climático, mientras que la adaptación se encarga de sus impactos (COP25, 2019a).

Según UNISDR (2009): «La adaptación al cambio climático se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos».

Las medidas de adaptación al cambio climático tienen una dimensión estratégica y una operativa, y ambas son complementarias (Jiménez *et al.*, 2017). La dimensión estratégica se orienta a la planificación a largo plazo (décadas) basada en el análisis de las variables relevantes en términos históricos, considerando también las proyecciones bajo escenarios de cambio climático. El objetivo de esta dimensión es anticipar los posibles daños en la costa y, en función de ello, jerarquizar sitios donde concentrar los esfuerzos de prevención, mitigación y preparación.

La dimensión operativa, por su parte, se basa en predicciones en tiempo real cuyo objetivo es ayudar en la toma de decisiones en el corto plazo y en la implementación de planes de emergencia. Ejemplos de este tipo de medidas son los sistemas locales de alerta de marejadas. La aplicación sistemática de ambas dimensiones se ha efectuado en escasos lugares en el mundo (Barnard *et al.*, 2009).

A continuación, detallamos tres tipos de medidas que podrían implementarse en nuestro país.

4.5.1 Medidas orientadas a la comprensión del cambio climático

Al respecto, el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (PANCC) señala:

«La ejecución de medidas para hacer frente a los impactos del cambio climático, requiere de

una base de conocimientos, obtenidos mediante la investigación científica integrada y la observación sistemática del clima. También, requiere del fortalecimiento de capacidades, tanto de personas como de instituciones, a fin de que exista una mayor comprensión del tema, facilitando tanto el proceso de transferencia de tecnología como el de acceso a recursos financieros (MMA, 2017: 26)».

4.5.1.1 MEJORAS DE REGISTROS OCEANOGRÁFICOS

Para entender un fenómeno natural como el cambio climático es necesario contar con datos de calidad, con alta resolución espacial y extensión temporal. Sin embargo, en Chile, prácticamente no hay redes de medida de variables biogeoquímicas en el océano y existe una asimetría muy marcada con la disponibilidad de datos en tierra (Figura 4.18).

Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. (PANCC) del Ministerio del Medio Ambiente de Chile.



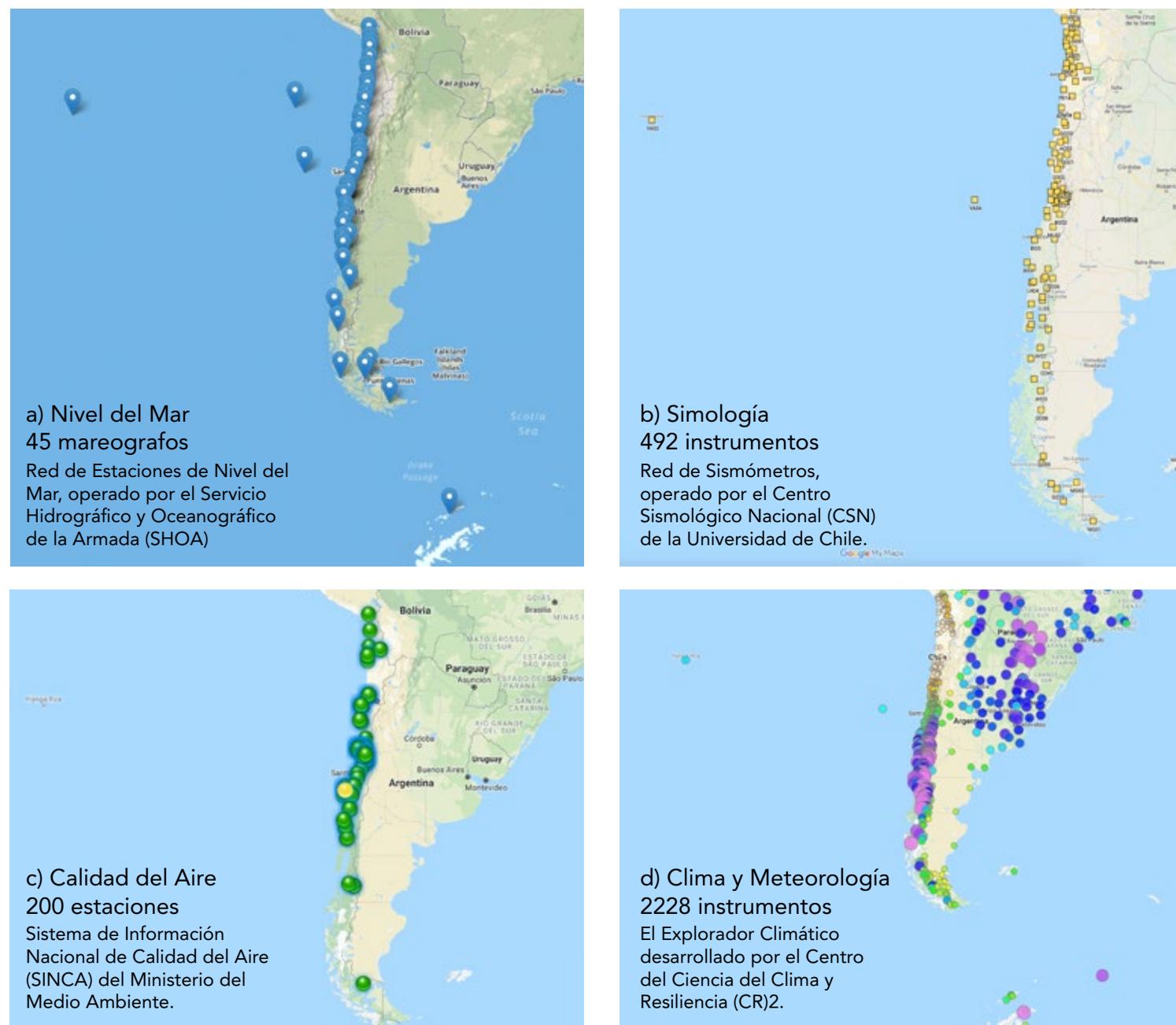


Figura 4.18

Chile, a pesar de su extenso territorio marítimo, posee aún una débil capacidad de observación y monitoreo continuo de los océanos y existe una inmensa disparidad con la disponibilidad de datos continentales (COP25, 2019b). Por ejemplo, para estudios climáticos en el territorio chileno

hay 1145 pluviómetros, 295 termómetros y 788 medidores de caudal con datos disponibles gratuitamente de los servicios públicos, e integrados en una plataforma como el explorador climático⁶. El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) cuenta con 200 estaciones que mo-

nitorean las concentraciones ambientales de los contaminantes atmosféricos actualmente normados en Chile.⁷

Para la sismología, al año 2019, la red se compone por 492 instrumentos, que incluyen 65 estaciones permanentes de banda ancha y movimiento fuerte en tiempo real, 130 sistemas de satélites de navegación global y 297 instrumentos de movimiento fuerte, instalados para comprender mejor el impacto de los terremotos⁸ (Barrientos, 2018).

⁶ <http://explorador.cr2.cl/>

⁷ <https://sinca.mma.gob.cl/>

⁸ <https://www.csn.uchile.cl/red-sismologica-nacional/red-sismografos/>

Figura 4.18:

Las gráficas (capturas de pantalla de los sitios web) reflejan la gran asimetría en la disponibilidad de datos en tierra, respecto a la información sobre variables oceánicas.

(Elaboración propia).

a)



b)



c)



d)





Figura 4.20

Figura 4.20:

La *Ammophila arenaria* se caracteriza por su raíz profunda, la cual le permite fijarse a la arena; mientras que sus múltiples ramas facilitan la contención de las arenas volantes.

(Foto: parqueeolicolebu.cl).

efectos del cambio climático en las zonas costeras mediante la elaboración de mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de inundación en plataformas SIG centralizadas e integradas para gestión de la costa (Losada, 2008) Recientemente, Winckler et al. (2019) presentaron estudios de esta naturaleza para ciudades, caletas de pescadores, puertos, humedales costeros, playas e infraestructura.

Afortunadamente, en Chile se ha desarrollado un conocimiento asociado a la amenaza de los terremotos y tsunamis que podría adaptarse al impacto derivado del cambio climático (por ejemplo, erosión costera, inundación y daños de infraestructura costera, entre otros).

Como elemento fundamental de apoyo a la operación del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM), el Servicio

Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada inició, a partir del año 1997, la ejecución del Proyecto que ha contemplado la elaboración de una serie de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU). Estas herramientas permiten definir los niveles de inundación máximos esperados para las principales áreas urbanas y portuarias de la zona costera de Chile, ante la ocurrencia de eventos sísmicos tsunamigénicos de campo cercano (Figura 4.19). Asimismo, como consecuencia de los terremotos tsunamigénicos de 2010, 2014 y 2015, en Chile se han implementado diversas metodologías (p. ej., proyecto SATREPS, siglas de Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) y estudios específicos de amenaza de inundación por tsunami. Este conocimiento constituye una base conceptual sobre la cual se puede avanzar en la comprensión del riesgo del cambio climático.

4.5.2 Medidas orientadas a controlar la erosión costera

Es prioritaria la estabilización o regeneración de los campos dunares, debido a la importancia que tienen estos en la estabilización de las playas y en el control de la erosión costera. Actualmente, tanto las playas como los campos dunares son afectados por el tránsito de vehículos motorizados, el depósito de basuras y escombros, la extracción de arenas y la construcción de edificaciones. La regulación de estas actividades es vital para controlar la erosión de las playas, y el impacto de eventos extremos como tsunamis y marejadas. La implementación de métodos de fijación de arenas mediante vegetación pionera, es una práctica recomendable y ha resultado exitosa en numerosos lugares del mundo. Algunos estudios establecen que una duna litoral estabilizada con *Ammophila arenaria* (Figura 4.20) captura entre 50% y 70% de la arena proveniente de la playa (Carter & Wilson, 1990, en Tavares, 2002).

4.5.2.1 PROTECCIÓN DE HUMEDALES Y PRADERAS DE MACROALGAS

Los humedales y praderas de macroalgas promueven la atenuación del oleaje y la marea meteorológica, además de estabilizar la costa, gracias a su capacidad de disipar la energía mecánica del oleaje y retener el sedimento. La extracción indiscriminada de algas ha generado la pérdida de playas, erosión costera y edificaciones en playas como El Papagayo, en Quintero (Quezada, 2007), efectos que la Dirección de obras Portuarias ha intenta-



Figura 4.21 a



Figura 4.21 b

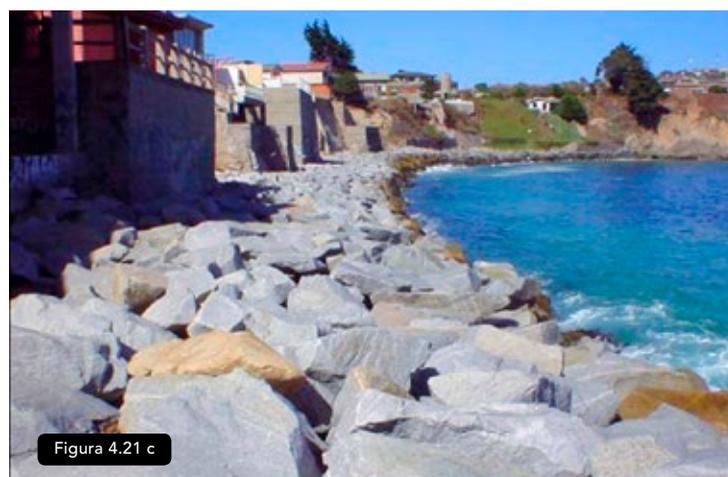


Figura 4.21 c

Figura 4.21:

a) Erosión progresiva en playa El Papagayo, producto de la extracción de algas en el año 1980.

b) Temporal de 1995 en Playa El Papagayo.

c) Protección de fondo construida al pie del talud. Foto tomada en 2007.

(Quezada, 2007).

do resolver con infraestructura costera (Figura 4.21).

A partir de 69 estudios, Narayan *et al.* (2016) muestra que, en promedio, estos hábitats pueden reducir la energía del oleaje entre 70 % y 30 %, donde en términos de eficiencia se ubican los corales, humedales, manglares y las macroalgas. Los impactos antropogénicos y del cambio

climático pueden conducir a la degradación de estos ecosistemas y, como consecuencia, a un aumento de la erosión e inundación costera. Utilizar los recursos que provee el mismo ecosistema marino-costero se asocia además a soluciones basadas en la naturaleza, para mitigar los impactos del cambio climático y de desastres de origen geofísico (Figura 4.22).

Figura 4.22:

Caleta Carrizalillo, Región de Atacama. Las praderas de macroalgas tienen un rol fundamental en la atenuación del oleaje, la marea meteorológica y la estabilización de la costa.

(Foto: P. Winckler).

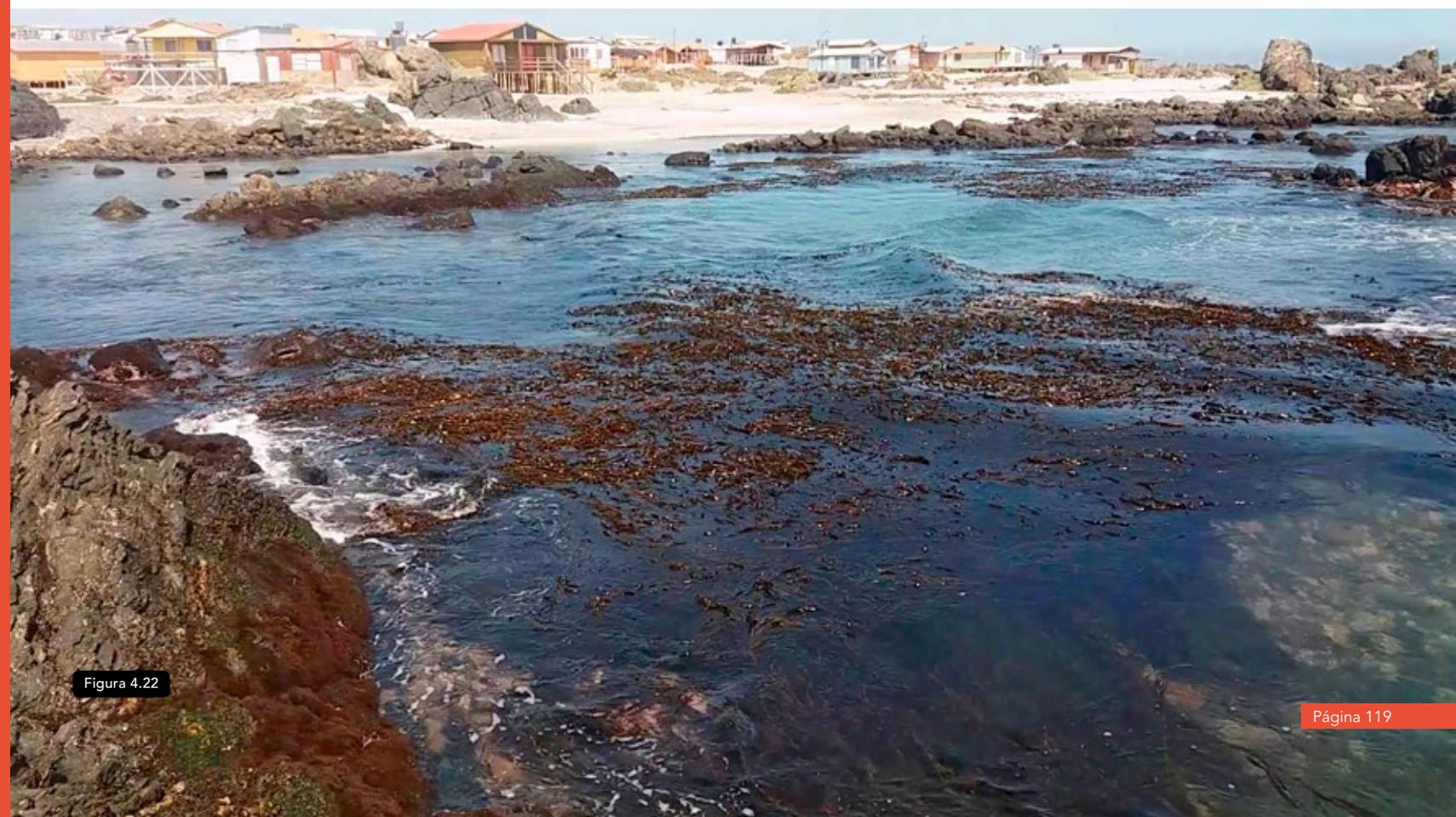


Figura 4.22

4.5.2.2 GENERACIÓN DE CUOTAS DE EXTRACCIÓN DE ARENAS

La extracción ilegal y/o desregulada de arenas provenientes de playas, campos dunares y ríos favorece la erosión de las playas y conduce a alteraciones ecosistémicas que degradan la zona costera. Con la demanda por materiales para la construcción, esta práctica es habitual en muchos lugares de Chile. Un ejemplo de extracción ilegal en las dunas de Ritoque se ilustra en la Figura 4.23. Actualmente, la legislación es poco rigurosa en el control de estas actividades y existe además escasa fiscalización y control en las áreas afectadas. Por otra parte, las consecuencias que esta actividad tiene en la dinámica sedimentaria no han sido estudiadas en detalle en nuestro país. Por ende, se debieran definir cuotas de extracción de arenas de estos sitios de empréstito de modo de garantizar una gestión sustentable del sistema sedimentológico litoral.

4.5.3 Medidas orientadas a mejorar la operatividad portuaria

Existe consenso en que el cambio climático afectará la competitividad del sector portuario, mediante el incremento en los costos, la generación de pérdidas por incidentes y eventuales beneficios que se deriven de la mitigación de gases de efecto invernadero y la adaptación (Minambiente, 2017).

El sistema portuario deberá integrar la mitigación de gases de efecto invernadero y la adaptación en todo el ciclo de vida de los puertos marítimos, en aras de promover su resiliencia ante el cambio climático (Minambiente, 2017). Ante este escenario, es previsible que los puertos que implementen me-

didias de mitigación y adaptación sean los más competitivos.

En esta sección se presentan solo algunas de las medidas de adaptación que se orientan a mejorar la operación portuaria y la gestión de la infraestructura marítima. El lector interesado en temas relacionados con la mitigación puede consultar la abundante literatura existente (p. ej., MOP y MMA, 2017). La Figura 4.24 ilustra ejemplos de medidas de mitigación de GEI en zonas portuarias, basadas en el documento en Colombia

(Minambiente, 2017) sobre gestión de puertos marítimos frente al cambio marítimo.



Figura 4.23

Figura 4.23:

Extracción de arena desde las dunas de Ritoque, en Concón, Región de Valparaíso).

(Foto:@geolascar).

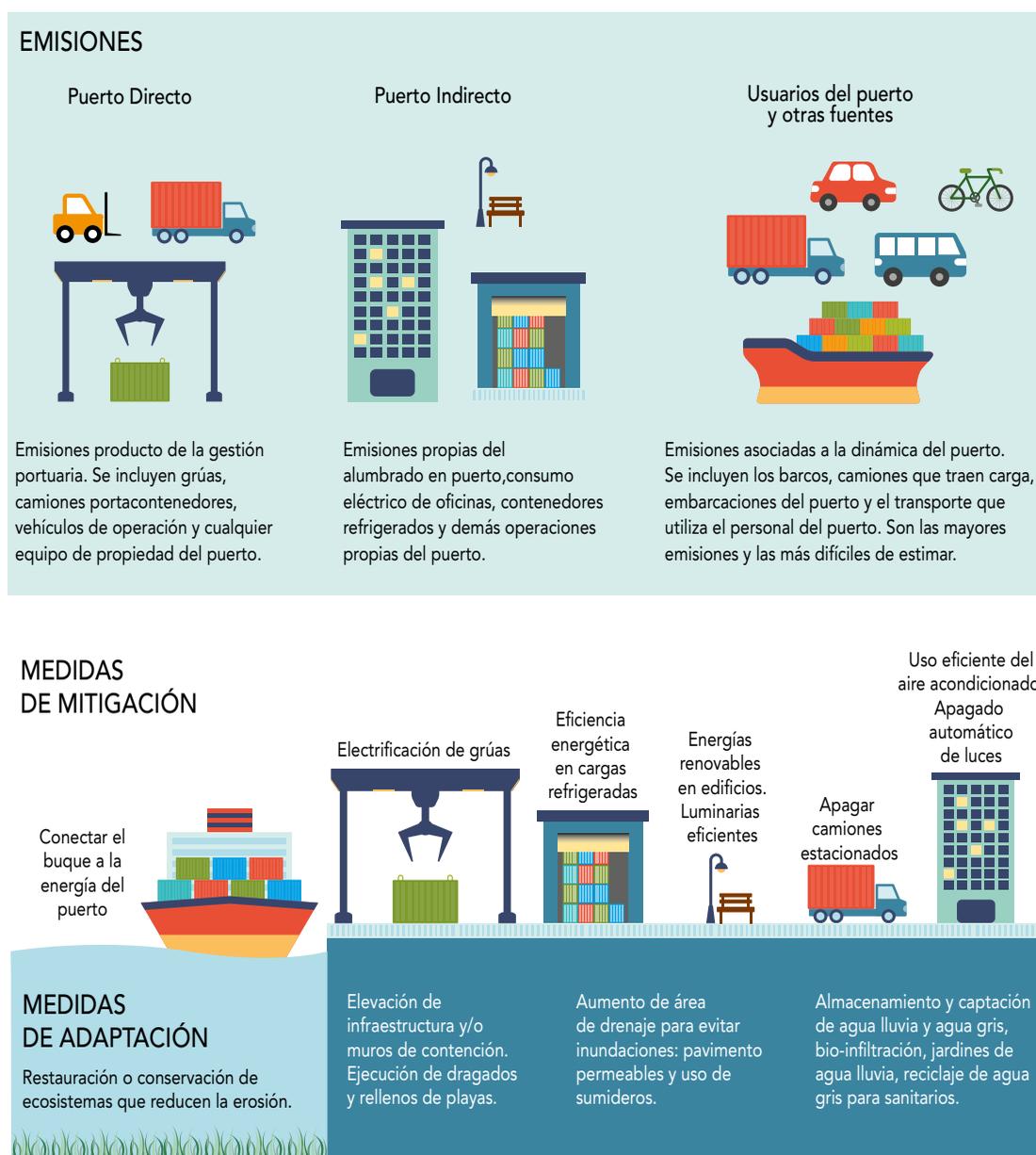


Figura 4.24

Figura 4.24:

Fuentes de emisiones en la actividad portuaria. Medidas de Mitigación y de Adaptación propuestas.

(Adaptado de Minambiente, 2017).

4.5.3.1 MEJORAS ORIENTADAS A LA OPERACIÓN PORTUARIA

Los cierres de puertos generan mermas en toda la cadena logística de los productos que se importan y exportan a través de dichas instalaciones. En un mercado muy competitivo donde los puertos compiten por atraer a las líneas navieras, el garantizar seguridad en el atraque de la nave en un puerto es un requisito mínimo para subsistir. Aquellas instalaciones portuarias que generen planes de adaptación tanto de las operaciones como de la infraestructura al cambio climático tienen mejores perspectivas de mantener o incluso mejorar su posición relativa en el mercado.

Una revisión de la experiencia mundial sobre materias relacionadas con la operatividad de los sitios de atraque en puertos, da cuenta de los siguientes caminos típicos para reducir el tiempo de inoperatividad de los sitios de atraque:

- Mejoramiento de condiciones de abrigo.
- Adecuación de instalaciones portuarias para minimizar sobrepaso y erosión costera.
- Mejoramiento de configuraciones de amarre de naves.
- Uso de sistemas de alerta temprana de marejadas a nivel local.
- Barreras de protección a través de manejo de ecosistemas costeros.

Algunas de estas medidas de adaptación se profundizan a continuación:

a) Condiciones de abrigo

El mejoramiento de condiciones de abrigo está normalmente asociado a la extensión de las obras de abrigo del puerto, buscando reducir los niveles de oleaje al interior de la dársena en que se sitúan los sitios de atraque. Con ello, se busca reducir las amplitudes de movimiento de las naves atracadas y los esfuerzos en los elementos de amarre/atraque. En general, es una alternativa de alto costo.

b) Sistemas de amarre de naves

La mejora de configuraciones de amarre de naves se logra mediante las siguientes alternativas:

- Uso de espías de alta resistencia y flexibilidad.
- Instalación de winches en las espías, que permitan mantener la tensión constante.
- Reemplazo de defensas rígidas por defensas de respuesta amortiguada.
- Uso de sistemas nuevos de amarre, como *MoorMaster*, *ShoreTension* y *DockLock* (Figuras 4.25).

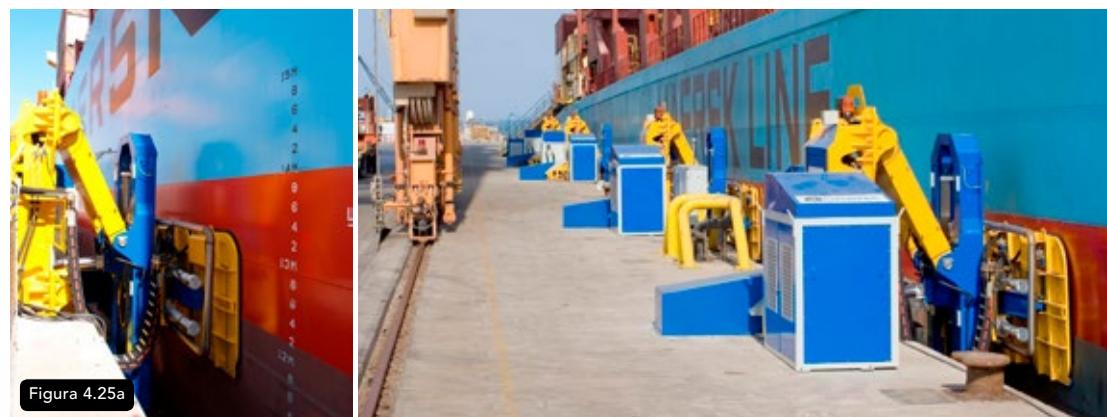
c) Sistemas de Alerta Temprana de Marejadas

Las marejadas tienen impactos diferenciados en el borde costero, cuya predicción requiere de sistemas que cuantifiquen el oleaje localmente. Un sistema local de alerta de marejadas proporciona información útil, a nivel local y a tiempo para la gestión de la

Figura 4.25:

Sistemas de amarre.

a) Tipo *MoorMaster* consistente en paneles que, mediante la generación de vacío, se adhieren al casco de la nave, mientras que se encuentran a su vez conectados al muelle mediante un brazo hidráulico flexible. Los paneles siguen el movimiento del buque, de manera de ajustarse a las variaciones de marea y la carga/descarga de la nave.



b) Tipo *Shore Tension* compuesto de un cilindro y un pistón hidráulicamente controlado, que proporciona tensión a las espías y amortiguamiento adicional. Este sistema fue recientemente instalado en el puerto de Arica.

c) Tipo *DockLock* que posee magnetos controlados electrónicamente a una unidad principal la cual cuenta con brazos hidráulicos, de manera similar al sistema *MoorMaster*. Es un sistema empleado para asegurar el abarloadamiento de naves para la transferencia de combustible y se encuentra en etapas de desarrollo inicial para su puesta en marcha en muelles.

(Fotos: cavotec.com)

emergencia, la movilización de recursos y la rehabilitación de infraestructura. Este tipo de sistemas de respuesta mayores que los sistemas de alerta de tsunami, como el desarrollado en Chile como consecuencia del tsunami de 2010 (www.snamchile.cl).

A nivel mundial, 28 países ribereños de la OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) cuentan con sistemas de pronóstico de oleaje de uso público y 24 de ellos incluyen pronósticos en la costa, entre los cuales Chile no está incluido. Organismos como NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), Ifremer (L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) y ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) distribuyen pronósticos usualmente en forma gratuita para la investigación y bajo un costo de licen-

ciamiento para proyectos privados. La calibración de estos modelos se realiza en regiones específicas en Norteamérica y Europa, donde se dispone de redes de medición de oleaje. No obstante, su limitación radica en la precaria validación cuando no se cuenta con un número adecuado de mediciones locales; lo cual Beyá *et al.* (2017) demostraron al comparar estas bases de datos globales con las generadas en el *Atlas de Oleaje* (Beyá *et al.*, 2016).

Existen consultoras que ofrecen pronósticos bajo un costo de licencia para proyectos específicos en la misma línea. Desde 2016, la Escuela de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso ha desarrollado una herramienta de pronóstico de oleaje en 61 nodos distribuidos a lo largo del país. El pronóstico es de acceso gratuito y abarca sectores ubicados fue-

ra de los puertos. Como plan piloto se han implementado 21 nodos virtuales sobre profundidades de 20 m en la bahía de Valparaíso (Figura 4.26), los que, junto a un pronóstico de marea, permiten evaluar el sobrepaso en sectores costeros. Actualmente, el sistema cubre solo algunas de las principales ciudades costeras.

Este tipo de sistemas debiera ser extendido a todas las ciudades costeras del país, y validado mediante altimetría satelital en aguas profundas e instrumentos de observación de oleaje costero. Su implementación permitiría reducir los impactos del oleaje sobre la seguridad de embarcaciones y bañistas, y anticipan el sobrepaso que experimentan los paseos costeros y el daño de su infraestructura.

4.5.3.2 MEJORAS ORIENTADAS A LA GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA MARÍTIMA

En Chile hay alrededor de 170 instalaciones portuarias —entre grandes puertos estatales, muelles industriales y sistemas de amarre con boyas— que cumplen un rol esencial para el desarrollo económico y el bienestar de la población (Winckler *et al.*, 2019). El desempeño de la infraestructura es directa o indirectamente afectada por las condiciones climáticas existentes, y también lo será por los posibles cambios en la frecuencia y magnitud o intensidad de los eventos extremos producto del cambio climático (Gironás y Yáñez, 2019). En la práctica actual,

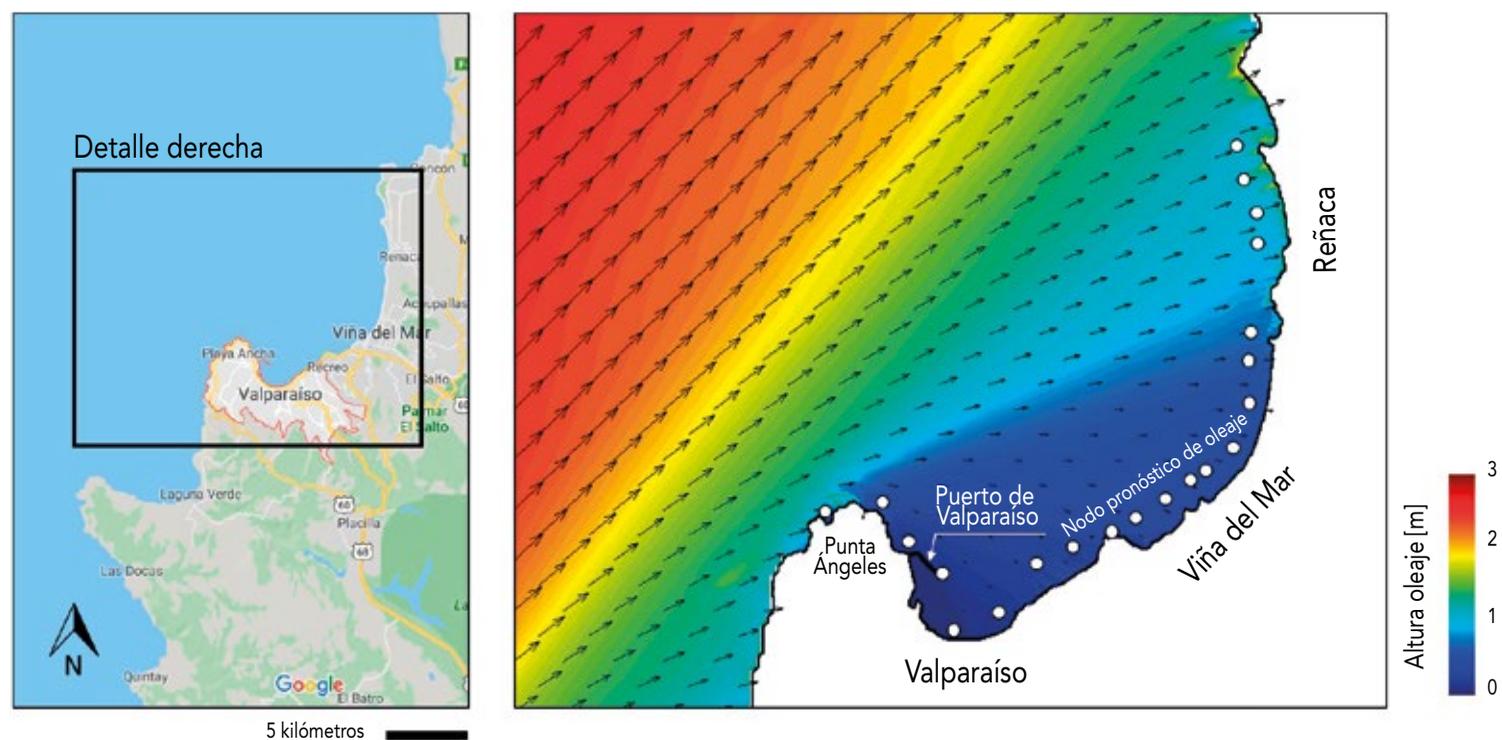


Figura 4.26

Sistema Nacional de Alarma de Maremotos

www.snamchile.cl



Sistema de Alerta de Marejadas

www.marejadas.uv.cl



Figura 4.26:

Sistema local de alerta de marejadas de la Universidad de Valparaíso.

los valores de diseño y la incertidumbre asociada se evalúan bajo condiciones de estacionaridad; es decir, suponiendo que durante la vida útil de una obra marítima existirá un clima estadísticamente equivalente al ocurrido en el pasado, y que se caracteriza mediante registros históricos. No obstante, el cambio climático introduce modificaciones tanto en las tendencias como en la variabilidad, razón por la cual, el uso de nuevas metodologías de diseño que contemplen cambios futuros debería considerarse en todas las etapas de un proyecto de obras marítimas: planificación, prefactibilidad, factibilidad, diseño, ejecución, operación, mantención, reparación y desmantelamiento de la infraestructura.

Desde la perspectiva de la gestión de la infraestructura, las empresas portuarias estatales, los concesionarios y los ministerios competentes en la materia debieran establecer planes de mantención y reparación de obras costeras, de atraque y abrigo que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo. Afortunadamente, la

planificación de infraestructura en el MOP (Ministerio de Obras Públicas) ha comenzado a considerar el cambio climático mediante el Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático (MOP y MMA, 2017). Dicho plan considera 23 medidas en las líneas de acción en los ejes de adaptación al cambio climá-

LÍNEA DE ACCIÓN 1 Cambios metodológicos para incorporar la gestión del riesgo hidrológico futuro en la evaluación, diseño y planificación de servicios de infraestructura.	(*) MEDIDA 1: Incorporación de cambios metodológicos en la evaluación económica de obras de infraestructura con perspectivas de largo plazo.
	MEDIDA 2: Incorporación de cambios metodológicos en las etapas de desarrollo de obras de infraestructura asociadas a la provisión de recursos hídricos: Embalses de regadío.
	(*) MEDIDA 3: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras.
	MEDIDA 4: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de diseño de obras de infraestructura asociadas a conectividad y de protección del territorio que se pueden ver afectadas por eventos extremos de origen hidrometeorológico.
	MEDIDA 5: Generar programas de protección del territorio frente a lluvias intensas.
LÍNEA DE ACCIÓN 2 Monitoreo de amenazas.	MEDIDA 6: Mejoras en monitoreo en disponibilidad de recursos hídricos. Ampliar la densidad de estaciones en glaciares, cuenca y sub-cuenca de zonas con cobertura de nieve.
	MEDIDA 7: Mejoras en monitoreo de caudales extremos.
	(*) MEDIDA 8: Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.
LÍNEA DE ACCIÓN 3 Monitoreo de vulnerabilidad de la infraestructura.	MEDIDA 9: Revisión periódica de obras fluviales, de drenaje y viales.
	(*) MEDIDA 10: Incorporación de un monitoreo semi-continuo del impacto de obras de infraestructura costera.
LÍNEA DE ACCIÓN 4 Incorporación en los procesos de planificación ministerial las implicancias del cambio climático para los servicios de infraestructura del Ministerio de Obras Públicas.	(*) MEDIDA 11: Incorporar en todas las escalas de planificación ministerial los efectos de cambio climático.

Tabla 4-V:

Líneas de acción en el Eje de Adaptación al Cambio Climático, cuyo objetivo es Adaptar los servicios de infraestructura a los impactos proyectados por cambio climático, bajo un enfoque de blindaje climático preventivo. Las medidas con asterisco (*) aplican en infraestructura marítima.

(Fuente: MOP y MMA, 2017).

LÍNEA DE ACCIÓN 5 Mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en la construcción de infraestructura y edificación pública. Contabilidad de reducción de GEI.	MEDIDA 12: Incorporación de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en el desarrollo de infraestructura pública MOP.
	MEDIDA 13: Incorporación de eficiencia energética y confort ambiental en la edificación pública que ejecuta el MOP.
	MEDIDA 14: Medición y gestión de la Huella de Carbono en la obras de infraestructura y edificación pública que ejecuta el MOP.
	MEDIDA 15: Reducción de GEI en la maquinaria del MOP.
LÍNEA DE ACCIÓN 6 Contabilidad de reducción de GEI.	MEDIDA 16: Implementar una plataforma que permita medir y contabilizar la reducción de GEI desde el Ministerio de Obras Públicas.

Tabla 4-VI

LÍNEA DE ACCIÓN 7 Coordinación intra e interministerial del cambio climático.	MEDIDA 17: Coordinación interministerial.
	MEDIDA 18: Coordinación con Plan Nacional de Adaptación, Plan de Acción Nacional y Planes Sectoriales de Adaptación.
LÍNEA DE ACCIÓN 8 Gestión del conocimiento en cambio climático.	MEDIDA 19: Creación de la Unidad de cambio climático.
	MEDIDA 20: Generación de capacidades en cambio climático.
	MEDIDA 21: Gestión del cambio climático en el territorio.
	(*) MEDIDA 22: Cambio en normas y estándares que incorporen, por ejemplo, la inclusión del cambio climático y otros riesgos costeros en el diseño de la infraestructura marítima.
LÍNEA DE ACCIÓN 9 Promoción de la innovación tecnológica para la adaptación al cambio climático.	MEDIDA 23: Incorporación de innovación tecnológica en adaptación y mitigación al cambio climático.

Tabla 4-VII

tico (Tabla 4-V), mitigación al cambio climático (Tabla 4-VI) y gestión del conocimiento (Tabla 4-VII), dentro de las cuales destacan las siguientes medidas específicas para la infraestructura marítima:

- Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras.

- Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.
- Incorporación de monitoreo semi-continuo del impacto de obras de infraestructura costera.

Estas medidas apuntan en la dirección correcta, y de ser implementadas, redundarán en una reducción en la vulnerabilidad del sistema portuario en Chile.

4.5.4 Medidas orientadas a la adaptación de infraestructura

Según Winckler *et al.* (2019), en las últimas décadas, se han evidenciado cambios en los principios de diseño de infraestructura costera. En los años 60 se pensaba que la rigidización de playas mediante espigones o diques exentos era la solución a la erosión costera. Estas soluciones, no obstante, generaron impactos en la dinámica litoral, como la acreción de playas aguas arriba y socavación aguas abajo de las obras. Hay casos donde los impactos de las obras sobre la dinámica litoral se han combatido mediante sistemas de *bypass* de arena, pero estas soluciones son caras y de difícil mantenimiento para la realidad nacional. En Chile, la rigidización se ha utilizado como defensa de caminos, vías férreas y paseos costeros y en

Tabla 4-VI:

Líneas de acción en el Eje Mitigación al Cambio Climático, cuyo objetivo es Propender hacia la construcción de las obras de infraestructura MOP baja en carbono.

Tabla 4-VII:

Líneas de acción en el Eje Gestión del Conocimiento, cuyo objetivo es Generar capacidades e institucionalidad en materia de Cambio Climático en el MOP, para las áreas de adaptación y mitigación.

Figura 4.27:

Balneario municipal de Antofagasta que fue sometido a obras de conservación en el año 2012, oportunidad en la cual se construyó un espigón para estabilizar el volumen de arena utilizado como alimentación artificial.

(Fuente: region2.cl)



Figura 4.27

Figura 4.28:

Alimentación artificial de arena en la playa de Nags Head, North Carolina, Estados Unidos.

(Fuente: dredgingtoday.com).



Figura 4.28

Figura 4.29:

Ejemplo de restauración de sistemas dunares españoles, con mallas de protección para evitar el pisoteo de la vegetación.

(Fuente: greenteach.es/sistemas-dunares/).



Figura 4.30

Figura 4.30:

Restauración de un humedal en Australia. En 1940 un muro de tierra fue construido con fines agrícolas, afectando su flujo natural y alterando los ecosistemas del lugar.

(Fuente: abc.net.au
Foto: Brett Abbott).

Figura 4.31:

Arrecife artificial contruido con Reef balls. Este tipo de soluciones son muy eficientes para cuerpos de agua con oleaje relativamente corto, como el Mar Caribe. Su eficiencia en la reducción del oleaje y resistencia estructural ante las marejadas que caracterizan nuestro país no han sido estudiadas a la fecha.

(Fuente: <http://rbfdevsite.com/reef-ball-description/>)



Figura 4.30

alrededor de una decena de playas artificiales (Figura 4.27).

A fines del siglo pasado se introdujo la «alimentación artificial» de arenas como una opción ambientalmente amistosa a la rigidización, pero la evidencia indica que el trasvase de grandes volúmenes de arena de un sitio de *empréstito* al de la obra puede generar impactos relevantes en los ecosistemas, si no se efectúa respetando los ciclos naturales. La Figura 4.28 muestra una alimentación artificial de arenas efectuada recientemente en la playa de Nags Head, North Carolina, Estados Unidos. En Chile esta

técnica no se ha utilizado a gran escala.

El paradigma actual consiste en el uso de «infraestructura verde» que responda a las demandas económicas, garantizando el bienestar humano y el funcionamiento del ecosistema (Gironás y Yáñez, 2019). Algunos ejemplos de este tipo de soluciones son la rehabilitación y reconstrucción de dunas y playas (Figura 4.29), restauración de humedales (Figura 4.30), el uso de arrecifes artificiales (Figura 4.31) o el uso de cinturones verdes para la protección contra la inundación.



Figura 4.29



Figura 4.31



Figura 4.32



Figura 4.33

En Chile existen pocos ejemplos de cinturones verdes en zonas costeras. Tal vez el más interesante corresponde al Parque Fluvial de Constitución (Figura 4.32), construido en zonas arrasadas por el tsunami de 2010 (Fritz *et al.*, 2011). Otro ejemplo lo constituye la ciudad abierta de Ritoque, en Concón (Región de Valparaíso) (Figura 4.33).

En la actualidad, existen estrategias encaminadas a adaptarse al eventual retroceso de la costa, que se basan en determinar la posición histórica y futura de la línea de costa (*managing shoreline retreat*). Este tipo de soluciones puede ser una alternativa de menor impacto a la rigidización mediante defensas o la alimentación artificial (McLachlan *et al.*, 2013). En esta línea, se proponen medidas como:

- Favorecer la migración hacia el interior de marismas y humedales o evitar construir en terrenos vulnerables. La Figura 4.34 muestra la expansión inmobiliaria, sobre terrenos bajos y vulnerables a tsunamis y marejadas en la bahía de Coquimbo. La Figura 4.35 muestra otro mal ejemplo de asentamientos irregulares en zonas altamente vulnerables de la localidad de Puerto Viejo.
- Evitar la construcción de infraestructura en zonas altamente vulnerables ante marejadas y tsunamis (Figura 4.36).
- Introducir estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio climático en la planificación territorial de zonas parcialmente recuperables y



Figura 4.34

Figura 4.32:

Parque fluvial de Constitución, construido en una zona arrasada por el tsunami de 2010 (Fritz *et al.*, 2011). Se observan las obras de defensa fluvial, la vegetación en fase inicial de crecimiento y piscinas cuya función es amortiguar el impacto de las crecidas fluviales o tsunamis en la ciudad. Al fondo isla Orrego, en el río Maule, donde fallecieron decenas de personas producto del tsunami.

Figura 4.33:

Buen ejemplo de preservación de una zona costera vulnerable en la ciudad Abierta de Ritoque, al norte de Concón. Se aprecia la baja densidad de construcción y terrenos costeros sanos, donde se desarrollan las playas, antedunas y vegetación.

Figura 4.34:

La zona costera de Peñuelas en La Serena, Región de Coquimbo, es una muestra de intervención de una zona costera vulnerable a tsunamis e inundación por marejadas.

(Fotos: P. Winckler).

Figura 4.35:

Asentamientos irregulares en zonas altamente vulnerables en la localidad de Puerto Viejo, Región de Atacama.



Figura 4.35

Figura 4.36:

Impactos de la erosión sobre infraestructura del borde costero.

a) Lago Budi, Región de la Araucanía. En la fotografía, se ve un restaurante de la zona fuertemente afectado por la acción de las olas en junio de 2019.

(Foto: Carabineros de Chile).

b) Playa de Cartagena, Región de Valparaíso, donde se aprecian los efectos devastadores de una marejada, en noviembre de 2019.

(Foto: Félix Fuentes, Municipalidad de Cartagena).



Figura 4.36 a



Figura 4.36 b

- Promover la compra de terrenos con fines de conservación.

En Chile, desafortunadamente, existe poca sensibilidad frente a este tipo de soluciones, lo que se evidencia en el excesivo desarrollo inmobiliario de zonas altamente vulnerables en ciudades costeras, cuyo denominador común es contar con terrenos bajos altamente vulnerables a las variaciones del nivel del mar, las marejadas y los tsunamis.

4.5.5 Medidas orientadas al ordenamiento territorial

Las medidas orientadas al ordenamiento territorial contemplan medidas como la gestión integrada de zonas costeras y la generación de una política nacional de uso del borde costero (Martínez et al., 2019). Ambas medidas se presentan a continuación.

4.5.5.1 GESTIÓN INTEGRADA DE ZONAS COSTERAS

Resulta adecuado atender al concepto de gestión integrada de zonas costeras (GIZC) como un proceso continuo de administración, cuyo objetivo general es poner en práctica el desarrollo sostenible, la conservación de la zona costera y la mantención de la biodiversidad (Comisión Europea, 1999, en Barragán, 2014). Este concepto si bien está ampliamente fundamentado y difundido a nivel internacional no ha sido aplicado en el país como criterio estandarizado, lo cual

es visto como una debilidad en la gobernanza de la costa. Al respecto, el diagnóstico elaborado por Castro et al., (2011), sobre gestión costera en Chile establece que:

- En la Política Nacional las actuaciones están pensadas para el borde costero y el espacio marítimo, no existiendo una idea de ordenación en profundidad;
- este proceso ha tenido más en cuenta las necesidades de desarrollo que las de protección y conservación;

- faltan criterios para la zonificación en regiones;
- faltan mecanismos eficaces de coordinación y cooperación.

La gestión integrada de zonas costeras, con base ecosistémica, involucra cambios de usos de suelo funcionales con la fragilidad de los ambientes costeros. Este enfoque de gestión implica trabajar con el funcionamiento natural del ecosistema y su capacidad de ajuste frente al cambio climático (Yáñez-Arancibia, 2013). De acuerdo con Yáñez & Day (2012), algunas de las estrategias de manejo para mitigar o adaptarse al cambio climático son:

- Promover y utilizar activamente la productividad continuada de los humedales costeros.
- Evitar los pulsos negativos de la disminución del aporte de agua dulce de los ríos en su cuenca baja por la actividad industrial.
- Evitar alteraciones al ciclo de nutrientes inducidos por la agricultura.
- Mantener los ecosistemas costeros saludables con el fin de mantener la capacidad resiliente de mitigar los impactos del cambio climático.

Estas estrategias buscan promover el uso sustentable y conservación de los sectores marino-costeros, con un enfoque ecosistémico, participativo, multisectorial y con base local, donde la dinámica de las costas y los desastres naturales son incluidos. No obstante los beneficios teóricos que ella conlleva, la gestión integrada de las zonas costeras no tiene resonancia en Chile debido, principalmente, a una gobernanza fragmentada.

4.5.5.2 POLÍTICA NACIONAL DE USO DEL BORDE COSTERO

Desde el punto de vista de la gestión costera, Chile posee una Política Nacional de Uso del Borde Costero (PNUBC) que ya tiene 25 años sin revisión, cuyas orientaciones son (D.S. N° 475 de 14 de diciembre de 1994. Subsecretaría de Marina):

- Creación y consolidación de una estructura nacional y regional, para la implementación de la Política Nacional de Uso del Borde Costero.
- Fortalecimiento de las visiones regionales sobre los usos preferentes de sus espacios costeros, materializados en propuestas de zonificación.
- Reconocimiento a nivel nacional, regional y local de la Zonificación de Uso del Borde Costero como un instrumento de ordenamiento territorial validado en normativas legales.

- Incorporación de consulta a las Comisiones Regionales en la decisión de otorgamiento de nuevas **concesiones marítimas**, como una acción participativa y de carácter consultivo.
- Participación de las Comisiones Regionales en el proceso de solicitud de Espacios Costeros Marinos de Pueblos Originarios, de carácter resolutivo.

El actual escenario de crecimiento urbano, las actividades económicas de alto impacto están afectando el funcionamiento de los ecosistemas marino-costeros y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto hace que sea necesario una revisión crítica de su marco operativo y su vinculación con instrumentos de planificación territorial, especialmente en la forma de conducir la gobernanza de la costa, ya que las metas internacionales de reducir la pobreza y detener la degradación ambiental deben abordarse de manera simultánea (BID, 2017).

Si bien, en el 2019, la Ley de Borde Costero se encontraba en agenda parlamentaria, su prioritario contenido no fue sometido a la opinión pública. Al respecto, Martínez *et al.* (2019) elaboraron un Policy Paper donde establecieron las siguientes recomendaciones referentes a la actual Ley de Borde Costero:

- La revisión del concepto de «borde costero» que, como unidad básica de gestión, es insostenible frente a las actuales necesidades de ordenamiento y planificación territorial que surgen ante la rápida degradación que está experimentando la zona costera. Es urgente que se releve el concepto de «zona costera» y se reconozca en la práctica como un territorio singular, para que pueda ser comprendida como objeto de gestión.
- Uno de los mayores desafíos que involucra la revisión de la PNUBC, es su adecuación a las modificaciones que están teniendo lugar en el país en materia de ordenamiento y planificación territorial. Ello conlleva a asegurar que la visión del desarrollo sostenible planteada por las Estrategias Regionales sea plasmada en instrumentos de planificación que reconocen y valoran los ambientes costeros como parte esencial de este desarrollo. Es fundamental que, en este nuevo escenario de ordenamiento territorial, se reconozca e integre a la zona costera como objeto particular de gestión local.

Frente a esto último, se observó que si bien a nivel nacional y regional, todos los lineamientos estratégicos asociados al ordenamiento y la planificación territorial reconocen los ecosistemas costeros como parte fundamental del desarrollo sostenible, en la práctica el enorme traslape de atribuciones, la descoordinación entre funciones y la gran cantidad de entidades públicas que participan en la gestión, entorpece los procesos de gestión y termina generando zonificaciones costeras con poco poder de articulación y desfasadas en el tiempo.

Caleta Portales, Región de Valparaíso.

(Foto: P. Winckler).

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- AGREDANO, R., R. CIENFUEGOS, P. CATALÁN & E. MIGNOT (octubre 21–23, 2015). Descripción de la evolución mensual de la playa de Reñaca y el impacto de las marejadas de agosto 2015. *XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, Santiago.
- ALBRECHT, F., & G. SHAFFER (2016). Regional sea-level change along the Chilean Coast in the 21st century. *Journal of Coastal Research*, 32(6), 1322-1332.
- ANDERSON, J., D. WALLACE, A. SIMMS, A. RODRIGUEZ, & K. MILLIKEN (2014). Variable response of coastal environments of the northwestern Gulf of Mexico to sea-level rise and climate change: implications for future change. *Mar. Geol.*, 352: pp. 348-366.
- BARNARD, L., W. Y. LAN, Y. M. TO, V. O. PATON, & S. L. LAI (2009). Measuring self-regulation in online and blended learning environments. *The internet and higher education*, 12(1), 1-6.
- BEYÁ, J., M. ÁLVAREZ, A. GALLARDO, H. HIDALGO, C. AGUIRRE, J. VALDIVIA, C. PARRA, L. MÉNDEZ, C. CONTRERAS, P. WINCKLER & M. MOLINA (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- BEYÁ, J., M. ÁLVAREZ, A. GALLARDO, H. HIDALGO, P. WINCKLER, & M. MOLINA (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 116, 16-32.
- BARRAGÁN, J. (2014). *Política, Gestión y Litoral: Nueva visión de la gestión integrada de áreas litorales*. UNESCO. Ed. Tebar Flores: Madrid. Castro (127)
- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO-BID (2017). *Soluciones basadas en la naturaleza para fortalecer la resiliencia costera*. <http://dx.doi.org/10.18235/0000824>
- BARRIENTOS, S. (2018). The Seismic Network of Chile. *Seismological Research Letters*, 89 (2A), 467- 474.
- BIRD, E. C. (2011). *Coastal geomorphology: an introduction*. John Wiley & Sons.
- BRUUN, P. (1968). Beach erosion and coastal protection. Fairbridge, R.W. ed. *The Encyclopedia of Geomorphology*. New York, Reinhold Boob Corp.
- CASTILLA, J. C. (1988). Earthquake-caused coastal uplift and its effects on rocky intertidal kelp communities. *Science*, 242(4877), 440-443.
- CASTRO, C., C. ALVARADO, R. ANDRADE, C. DE LA MAZA, R. GUIJÓN, C. GODOY, G. LABBÉ, F. PEÑA, M. VIEJO, R. VILLABLANCA, F. ZAMORA, & J. URREA (2011). Algunas orientaciones para el manejo costero integrado en Chile. En: Barragán Muñoz, J.M. (coord.). *Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Propuestas para la acción*. Red IBERMAR (CYTED), Cádiz, 159-170.
- CENTRO DE CAMBIO GLOBAL- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE (CCG, 2013). *Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al Cambio Climático*.
- CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (CR)2 (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro.
- CHURCH, J.A., P.U. CLARK, A. CAZENAVE, J.M. GREGORY, S. JEVREJEVA, A. LEVERMANN, M.A. MERRIFIELD, G.A. MILNE, R.S. NEREM, P. D. NUNN, A.J. PAYNE, W.T. PFEFFER, D. STAMMER, & A.S. UNNIKISHNAN (2013). *Sea level change. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the inter-governmental panel on climate change*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- CONTRERAS-LÓPEZ, M., R. FIGUEROA, J. SALCEDO, H. VERGARA, C. ZULETA, V. BRAVO... & F. CORTÉS (2017). *Vulnerabilidad de humedales y dunas litorales en Chile central*. Universidad Autónoma de Campeche.
- CIENFUEGOS, R., J. R. CAMPINO, J. GIRONÁS, R. ALMAR & M. VILLAGRÁN (2012). Desembocaduras y lagunas costeras en la zona central de Chile. En: Humedales costeros de Chile (J. Fariña y A. Camaño Eds.). Ediciones UC, Santiago, 21-66.
- CIENFUEGOS, R., M. VILLAGRÁN, J.C. AGUILERA, P. CATALÁN, B. CASTELLE, & R. ALMAR (2014). Video monitoring and field measurements of a rapidly evolving coastal system: the river mouth and sand spit of the Mataquito river in Chile. *J. Coast. Res.*, 10.2112/SI70-108.1. Special Issue 70.
- CONSEJO NACIONAL DE INNOVACIÓN PARA EL DESARROLLO - CNID (2016). Hacia un Chile resiliente frente a desastres: una oportunidad. Estrategia nacional de investigación, desarrollo e innovación para un Chile resiliente frente a desastres de origen natural. Disponible en <http://www.cnid.cl/wp-content/uploads/2016/12/INFORME-DESASTRES-NATURALES.pdf>
- COFRÉ, C. & J. BEYÁ (2016). Proyecciones y tendencias en el clima de oleaje en las costas chilenas bajo escenarios de cambio climático. *VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. San Antonio, 26 al 28 de octubre de 2016, 15 pp.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE - CEPAL (2011). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática*. Estudio elaborado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.
- COMITÉ CIENTÍFICO COP25 (2019a). *Océano y cambio climático: 50 preguntas y respuestas*, Santiago, Chile.
- COMITÉ CIENTÍFICO COP25 (2019b). *Propuesta de un Sistema Integrado de Observación del Océano Chileno (SIOOC)*, Santiago, Chile.

COOPER, J. A. G., & O. H. PILKEY (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and planetary change*, 43(3-4), 157-171.

DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS- DOP (2013). *Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras*.

FARIÑA, J. M. & A. CAMAÑO, Eds. (2012). *Humedales costeros de Chile: Aportes científicos a su gestión sustentable*. Ediciones UC, Santiago, 464 pp.

FRITZ, H., C. PETROFF, P. CATALÁN, R. CIENFUEGOS, P. WINCKLER, N. KALLIGERIS, R. WEISS, S. BARRIENTOS..., C. SYNOLAKIS (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics* 168: 1989-2010.

GIRONÁS, J. & G. YÁÑEZ (2019). Capítulo 18. Impactos y Adaptación en Infraestructura. *En Cambio Climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación*. Castilla, J. C., Meza, F., Vicuña, S., Marquet, P. A., Montero, J.-P. (eds.). Ediciones UC. Santiago, Chile, 2019, p. 480.

IGUALT, F., W. BREUER, P. WINCKLER & M. CONTRERAS-LÓPEZ (2017). Rehabilitación de centros urbanos afectados por el tsunami 2010 en la Comuna de Pelluhue, Chile. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 659-674.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS-INE (2015). ENCUESTA MENSUAL DE ALOJAMIENTO TURÍSTICO MARZO 2015. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago, 71 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC (2013): *Cambio climático 2013: La base de la ciencia física*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [Stocker, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y PM Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU., 1535 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.

JIMÉNEZ, J., C. ARMAROLI, E., & BOSOM (2017). Preparing for the Impact of Coastal Storms: A Coastal Manager-oriented Approach. *Coastal Storms: Processes and Impacts*, 217-239.

KEELING, R. F., A. KÖRTZINGER, & N. GRUBER (2010). Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual review of marine science*, 2, 199-229.

LOSADA, I. (2008, abril). El cambio climático en las zonas costeras; previsiones y estrategias de adaptación. *En Simposio Internacional Evaluación crítica de las previsiones sobre el cambio climático: una perspectiva científica*.

MARQUET, P. A., S. ABADES & I. BARRÍA (2012). *Distribución y conservación de humedales costeros: una perspectiva geográfica. Humedales costeros de Chile*. Aportes científicos a su gestión sustentable. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2-19.

MARTÍNEZ, C., O. ROJAS, E. JAQUE, J. QUEZADA, D. VÁZQUEZ & A. BELMONTE (2011). Efectos territoriales del tsunami del 27 de febrero de 2010 en la costa de la región del Biobío, Chile. *Revista Geográfica de América Central*, 2(47E).

MARTÍNEZ, C., D. ROJAS, M. QUEZADA, R. OLIVA, & J. QUEZADA (2015). Post-Earthquake coastal evolution and recovery of an embayed beach in central-southern Chile. *Geomorphology*, 250: 321-333.

MARTÍNEZ, C., M. CONTRERAS-LÓPEZ, P. WINCKLER, H. HIDALGO, E. GODOY, & R. AGREDANO (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.

MARTÍNEZ, C., F. ARENAS, K. BERGAMINI & J. URREA (2019). Hacia una ley de costas en Chile: criterios y desafíos en un contexto de cambio climático. Serie Policy Papers, CIGIDEN. Disponible en https://www.cigiden.cl/wp-content/uploads/2019/10/PP_LeyBordeCostero_digital.pdf

MAYOL, E., S. RUIZ-HALPERN, C.M. DUARTE, J.C. CASTILLA, & J.L. PELEGRÍ (2012). Coupled CO₂ and O₂-driven compromises to marine life in summer along the Chilean sector of the Humboldt Current System. *Biogeosciences*, 9(3), 1183-1194.

MCLACHLAN, A., O. DEFEO, E. JARAMILLO, & A. D. SHORT (2013). Sandy beach conservation and recreation: guidelines for optimising management strategies for multi-purpose use. *Ocean & coastal management*, 71, 256-268.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE - MMA (2016). Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Disponible en <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/TCN-2016b1.pdf>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE - MMA (2017) Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC) 2017-2022. Disponible en https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/plan_nacional_climatico_2017_2.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE COLOMBIA (Minambiente, 2017). *Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia*. Documento de Trabajo, Bogotá: 76 pp.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - (MOP) Y MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE- (MMA) (2017). *Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017-2022*. Obtenido de <http://www.dgop.cl/Documents/PlanAccionMop.pdf>

MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO - MINVU. (2013). *Estrategia Nacional de Construcción Sustentable 2013-2020*.

- MOLINA, M. (2011). *Estudio No Estacionario de Clima Medio de Oleaje en la Costa Central de Chile*. Memoria del proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso, Chile. 125 pp.
- MOLINA, M., R. CAMPOS-CABA, D. MANOSALVA, D. BECERRA & B. GÁLVEZ (octubre 21–23, 2015). *Efecto de las marejadas del 6 y 8 de agosto de 2015 en 3 playas de la Bahía de Valparaíso*. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago.
- NARAYAN, S., M.W. BECK, B. G. REGUERO, I. J. LOSADA, B. VAN WESENBEECK, N. PONTEE, ... & BURKS-COPES, K. A. (2016). *The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences*. *PloS one*, 11(5), e0154735.
- NG, C.K., K. SIVAKUMAR, X. LIU, M. MADHAIYAN, L. JI, L. YANG, C. TANG, H. SONG, S. KJELLEBERG, & B. CAO (2013). Influence of outer membrane c-type cytochromes on particle size and activity of extracellular nanoparticles produced by *Shewanella oneidensis*. *Biotechnol. Bioeng.*, 110 (2013), pp. 1831-1837.
- NICHOL, S. L., O. B LIAN, M. HORROCKS, & J.R. GOFF (2007). Holocene record of gradual, catastrophic, and human-influenced sedimentation from a backbarrier wetland, northern New Zealand. *Journal of Coastal Research*, 605-617.
- NIERING, R. (1985). *Wetlands. The audubon society nature guides*. Alfred A. Knopf Inc. 638 pp.
- QUEZADA, M. (2007). *Estudio de erosión costera y regeneración de Espacios litorales. Una aplicación en playa el Papagayo, Quintero*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso.
- RAMSAR, D.E. (1971). *Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas*. RAMSAR, 2, 1971.
- ROBINSON, I. S. (2010). *Discovering the Oceans from Space: The unique applications of satellite oceanography*. Springer-Praxis Publishing, UK. 638 pp.
- SCHMIDTKO, S., L. STRAMMA, & M. VISBECK (2017). Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 542(7641).
- SILVA, R., D. LITHGOW, L. ESTEVES, M. MARTÍNEZ, P. MORENO-CASASOLA, R. MARTELL, P. PEREIRA, E. MENDOZA, A. CAMPOS-CASCAREDO, P. WINCKLER, A. OSORIO, J. OSORIO-CANO, & G. RIVILLAS (2017). Coastal risk mitigation by green infrastructure in Latin America. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: *Maritime Engineering*, Bournemouth University, Fern Barrow, Poole, Dorset, BH12 5BB, UK.
- SPEYBROECK, J., D. BONTE, W. COURTENS, T. GHESKIERE, P. GROOTAERT, J. P. MAELFAIT..., & V. V. LANCKER (2006). Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. *Aquatic conservation: Marine and Freshwater ecosystems*, 16(4), 419-435.
- TAVARES, C. (2002). Efficiency of *Ammophila arenaria* in trapping sediments transported by the wind. *Ecol Aplicada*, 1, 13-17.
- TRENBERTH, K., J. FASULLO, & J. KIEHL (2008). Earth's Global Energy Budget. *Journals Online*. AMS100. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2008BAMS2634.1>
- UNISDR, U. (2009). Terminology on disaster risk reduction. Geneva, Switzerland.
- VAN DER NAT, A., P. VELLINGA, R. LEEMANS, & E. VAN SLOBBE (2016). Ranking coastal flood protection designs from engineered to nature-based. *Ecological Engineering*, 87: 80-90
- VARGAS, G., M. FARÍAS, S. CARRETIER, A. TASSARA, S. BAIZE, & D. MELNICK (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology* 38 (1): 219-238.
- VARGAS, C. A., N. A. LAGOS, M. A LARDIES, C. DUARTE, P. H. MANRÍQUEZ, V. M. AGUILERA..., & S. DUPONT (2017). Species-specific responses to ocean acidification should account for local adaptation and adaptive plasticity. *Nature ecology & evolution*, 1(4).
- VILLAGRÁN, M., R. CIENFUEGOS, R. ALMAR, J. GIRONÁS, P. CATALÁN, C. CAMAÑO, & J. DOMÍNGUEZ (2011). Natural post tsunami recovery of Mataquito river mouth after 2010 Chilean tsunami. Procc. AGU Fall Meeting Conference: San Francisco, USA.
- WINCKLER, P., M. CONTRERAS-LÓPEZ, J. BEYÁ & M. MOLINA (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research (LAJAR)*, 45(4): 622 – 648. DOI: 10.3856/vol45-issue4-fulltext-1.
- WINCKLER, P., M. CONTRERAS-LÓPEZ, S. VICUÑA, C. LARRAGUIBEL, J. MORA, C. ESPARZA, J. SALCEDO, S. GELCICH, ...& A. PICA (2019). Resumen Ejecutivo, en «*Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile*». Preparado para el Ministerio del Medio Ambiente.
- YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. & A.J. DAY (2012). Manejo ecosistémico costero: interdisciplina frente al cambio climático, p. 45-58. En: V. Fernández, L. Repetto, B. Vianni, C. von Sanden (Eds.), *Procesos, Contexto y Resultados del Trabajo Interdisciplinario. Seminario En_Clave Inter Oct. 2012*. Universidad de la República, Uruguay. 184 pp.
- YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. (Ed.) (2013). *Cambio Climático, Dimensión Ecológica y Socioeconómica*. Instituto de Ecología A. C., INECC-SEMARNAT, AGT Editorial, México DF. 300 pp.
- YEPES, V., & J. R. MEDINA (2005). Land use tourism models in Spanish coastal areas. A case study of the Valencia region. *Journal of Coastal Research*, 83-88.

RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS EN LA ZONA COSTERA

Páginas 132 - 143



Figura 5.1

Figura 5.1:

Rocas de Santo Domingo es una ciudad, comuna y balneario del litoral central de Chile (región de Valparaíso).

(Foto: Keokan / Wikipedia).

La explotación de recursos minerales y energéticos presentes en los bordes costeros del mundo tiene larga data. Esta cubre desde el coral rojo, utilizado en la confección de adornos y joyas cuyo tráfico se desarrolló en el Egipto de los Faraones, hasta la gigantesca industria petrolera y de gas «costa afuera» existente en la actualidad.

5.1 EXPLOTACIÓN DE ÁRIDOS

Aun cuando las arenas y las gravas siempre han sido miradas como de poca importancia, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2014) las caracterizó como «la materia prima más usada

en la tierra después del agua», agregando que «su uso excede ampliamente su tasa natural de renovación». Hasta hace poco, las arenas se extraían de las canteras y los lechos de ríos; pero, con el aumento de la demanda, los proveedores la comenzaron a **dragar** de las aguas costeras. Esta arena proviene de la erosión de rocas de las montañas, material que inicia un largo viaje por ríos y arroyos hasta el océano.

Con el aumento de la población, crece también la demanda por construir viviendas e infraestructura. Materiales como el hormigón y vidrio se componen principalmente de arena, razón por la cual la minería de este material se ha transformado en una industria multimillonaria en todo el mundo.

Figura 5.2:

La extracción de arenas provenientes de playas, campos dunares y ríos genera la erosión de las playas y conduce a alteraciones ecosistémicas que degradan la zona costera. En la fotografía faenas de extracción de arena en sector Tunquén, Algarrobo.

(Foto: algarrobodigital.cl).



Figura 5.2

La explotación de arena en las playas y mediante el dragado en las aguas costeras puede, ante la falta o deficiente aplicación de normas, acelerar el proceso erosivo. Las prohibiciones de extracción impuestas en algunos países para moderar este impacto han aumentado los precios de esta materia prima. El deterioro ambiental afecta en ocasiones a otros usuarios de la zona costera, como son el turismo y la pesquería artesanal.

En Chile, la normativa legal es algo laxa en lo relativo al manejo de la arena de playa. El artículo 13 del Código de Minería señala, por ejemplo, que «no se consideran sustancias minerales y, por tanto, no se rigen por el presente Código, las arcillas superficiales y las arenas y demás materiales aplicables directamente a la construcción». No existe en el país un cuerpo legal único que regule el proceso de extracción de áridos en su conjunto; en consecuencia, la normativa aplicable se encuentra diseminada en diversos cuerpos legales. Tampoco existe en la Ley Orgánica de Municipalidades, una norma que regule el procedimiento de concesión de la extracción de áridos, por lo que esta actividad queda supeditada a lo que establezca cada ordenanza municipal. Lo más concreto es que la Dirección de Obras Hidráulicas entrega asesoría técnica a los municipios que reciben solicitudes de extracción de áridos, pero dicha asesoría no implica la entrega de permisos.

Recientemente, se promulgó en Chile la Norma Secundaria de Calidad Ambiental, la que establece los valores de las concentraciones de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, así como sus períodos máximos y mínimos permisibles, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (Ley 19300 de Bases del Medio Ambiente). Sin embargo, la Región de Aysén es la única que cuenta con un anteproyecto en elaboración de Norma de Calidad Secundaria para Sedimentos Marinos (Resolución Exenta N° 115 c), cuya aplicación aún no entra en vigor.

5.2 EXPLOTACIÓN DE MINERALES

Los recursos áridos no se utilizan únicamente como materiales para la construcción. En las arenas de playa están presentes también numerosos minerales pesados, cuya alta concentración es promovida por el oleaje y las corrientes costeras. La **resaca** del oleaje, especialmente durante las tormentas, lava los materiales más livianos de las playas, produciendo altas concentraciones de minerales pesados que se denominan **placeros**. Las variaciones de la marea en combinación con los vientos oblicuos promueven el proceso, pues exponen una faja mayor de playa a la acción del oleaje.



Figura 5.3

Figura 5.3:

Prospección, extracción y tamizado de arena para la obtención de minerales pesados en la playa de Rahue, al sur de Cucao, Chiloé.

(Foto: Jorge León Cabello, disponible en <https://www.flickr.com/photos/jorgeleon-cabello/>).

En los placeres de una playa, se encuentran minerales como la casiterita, diamante, oro, ilmenita, magnetita, monazita, rutilo, xenotima y circón. Estos recursos están presentes en casi todos los litorales del mundo, entre los que se destacan los placeres de oro de Nome, en Alaska; los placeres en costa occidental de la isla de Chiloé (Figura 5.3); los placeres diamantíferos de Namibia; las arenas de ilmenita–monazita–rutilo de Travencore y Quilon, en India; las arenas de rutilo–circón–ilmenita de Australia y las arenas de magnetita de North Island, en Nueva Zelanda. Las altas concentraciones de estos minerales pueden provenir de rocas costeras o vetas aflorantes en la costa, del fondo marino, del aporte de los ríos u otros depósitos arenosos más antiguos retrabajados por el mar, como es el caso de Chiloé. Los placeres marinos recientes se presentan a diferentes niveles topográficos

debido a cambios del nivel del mar durante el Pleistoceno.

Existen otros recursos en la zona costera que, debido a su progresiva explotación, fueron motivo del ordenamiento normativo. Un ejemplo señero lo constituye la Real Cédula del Consejo de Hacienda del Imperio Español del año 1760, que indicaba que *«cuando se encuentren en la costa bastimentos menores con tabaco y sal [...] se visiten y proceda contra los patrones, maestros y marineros, con arreglo a las Ordenanzas y leyes de estos reinos»*. Pero es solo a partir de la primera mitad del siglo XX que esta explotación se realiza a gran escala, generándose con ello una cantidad significativa de normativas nacionales. Baste mencionar la creación de la Convención del Derecho del Mar de las Naciones Unidas (CONVEMAR), entre otras.

5.3 EXPLOTACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Aun cuando la primera extracción de petróleo procedente de las áreas marinas comenzó en 1896 en California, no fue sino hasta 20 años después, con el descubrimiento del yacimiento de Bolívar en Venezuela, cuando estas reservas cobraron importancia para la economía mundial. La primera plataforma «costa afuera» se instala durante los años cuarenta en el golfo de México, a una profundidad de apenas 7 m. A partir de esa fecha, la exploración de los hidrocarburos presentes en depósitos submarinos litorales se ha transformado en la explotación más intensa de recursos minerales marinos, generando consecuentemente un enorme desarrollo tecnológico y económico.

En Chile, la explotación de recursos minerales y energéticos se remonta, en el caso del carbón, a la época colonial. Pero fue con la incorporación de la máquina de vapor y del ferrocarril, que la minería del carbón se masificó y jugó un rol importante en el desarrollo minero del Norte Chico, antes de la Guerra del Pacífico, y del Norte Grande, después de que este fue incorporado al territorio nacional. En la primera década del siglo XX, la producción nacional de carbón alcanzó como promedio las 800000 toneladas anuales. Hacia la década del cincuenta, la producción prácticamente se duplicó, llegando a 2100000 toneladas en 1961, para luego experimentar un descenso gradual. El promedio para el decenio 1971-1980 fue de 1000000 de toneladas, reactivándose en 1983 y 1986, años en que la producción aumentó de 1077831 a 1333743 toneladas.

Los yacimientos de carbón de Chile se localizan prácticamente en la zona costera, como son los casos de Concepción y Magallanes. En el año 1869 y ante el agotamiento de los mantos carboníferos de Punta Puchoco, en las cercanías de Coronel, se inicia en forma pionera la explotación de mantos del mineral, construyéndose piques submarinos en el subsuelo de la zona submarina adyacente a dicha costa. El yacimiento «Pique Carlos», conocido hoy como el «Chiflón del Diablo», se constituyó en la primera y única mina submarina del mundo. Esta mina se caracterizó por poseer ventilación natural y por el modelo de explotación denominado «por pilares». Este consistía en la estructuración de pilares de carbón de 1 a 1.2 m de altura, en donde el minero debía trabajar de rodillas, extrayendo el carbón hacia arriba o hacia abajo para conformar una caverna de extracción y un pilar sostenedor. Este tipo de explotación dejó como legado una compleja trama de túneles y galerías interconectados, que se pueden visitar hasta el día de hoy.

Hacia el sur del país existen importantes reservas de carbón. En la isla Riesco, cerca del estrecho de Magallanes, se encuentra la mina Elena, que comenzó a ser explotada a finales del siglo XIX. En la década de los treinta, la producción de carbón ascendía a 2000 toneladas mensuales, que se sumaba a lo extraído desde los yacimientos Magdalena y Josefina, también en la isla. En el yacimiento Estancia Invierno, que abarca 4030 hectáreas, hay reservas por un total de 670 millones de toneladas de carbón, de las cuales cerca de 280 millones de toneladas corresponden a la categoría de reservas probadas y el resto a la categoría de probables. Su explotación, hoy en día, genera resistencia en las comunidades locales debido a los sistemas de explotación basados en tronaduras.

La minería del carbón no solo fue pionera en lo referente a la minería submarina, sino que también fue una de las consideraciones que llevaron al presidente, don Gabriel González Videla, a proclamar la «Declaración Presidencial de Chile de 1947». Dicha revolucionaria iniciativa reivindica, por primera vez en la historia del Derecho Internacional Marítimo, «todas las riquezas

naturales que en el (océano) existen y bajo él, conocidas o por descubrirse» en las primeras 200 millas desde la costa chilena. Esta declaración lleva posteriormente a uno de los hitos más importantes en la creación del nuevo Derecho del Mar, al constituirse en el primer instrumento internacional de carácter multilateral, que consagra la soberanía y jurisdicción exclusivas del Estado ribereño sobre una zona adyacente a la costa. Este hito se consagró en «la Declaración de Santiago» de 1952, suscrita por Chile, Perú y Ecuador.

Junto a la explotación carbonífera se confirma, en 1945, la existencia de petróleo y gas en la zona austral de Chile, estableciéndose el primer yacimiento de petróleo en el sector de Springhill, Tierra del Fuego. Desde la década de los cincuenta, la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) explota los únicos yacimientos de hidrocarburos y gas del país, presentes en la Región de Magallanes. En la década de los ochenta, ENAP puso

en producción los yacimientos «costa afuera», con la instalación de plataformas petroleras en el estrecho de Magallanes.

En la actualidad, parte importante de la energía requerida se obtiene a través del gas natural licuado (GNL), que es un recurso energético de combustión limpia, de precio competitivo, amplia disponibilidad y que en la década de los 90 se suministraba exclusivamente desde Argentina a través de un gasoducto. Dicho suministro se interrumpió en los años 2004 y 2005, lo que obligó al Estado chileno a tomar urgentes medidas, como construir un terminal de recepción, descarga, almacenamiento y regasificación de GNL en la bahía de Quintero. El traslado del gas natural licuado a $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduce su volumen en más de 600 veces, haciendo viable su traslado por barco desde diversos países productores. La bahía de Quintero fue seleccionada tanto por abrigo natural como por cercanía a los principales consumidores de gas natural. En enero de 2011



Figura 5.4:

Terminal de Regasificación GNL Quintero.

(Foto: plataformaurbana.cl).

Figura 5.4

se dio inicio a la operación comercial, con todos los componentes del terminal operativos, incluidos dos estanques de 160 000 m³. En 2015 se aumentó la capacidad de suministro, con la puesta en marcha de un tren de vaporización que incrementó la capacidad de regasificación en un 50 %, alcanzando un total de 15 millones de m³/día, y dos nuevas islas de carguío en la estación de carga de camiones, que le permitieron duplicar la carga de GNL en camiones cisterna.

Del mismo modo, desde 2010 opera en la bahía de Mejillones, el Terminal de Regasificación GNL Mejillones, cuya capacidad de regasificación alcanza a los 5 500 000 m³/día, con los que abastece principalmente a las generadoras eléctricas del norte.

En el mes de octubre del año 2018, se reanuda la comercialización de gas natural proveniente de la República Argentina a través del gasoducto «Gas Andes», en el sector de San Bernardo, aportando 1 300 000 m³/día y con

una potencialidad de llegar a los 10 000 000 m³/día. El gasoducto tiene 463 km de extensión y se ubica entre las localidades de La Mora en Mendoza, República Argentina, y San Bernardo en las cercanías de Santiago de Chile.

5.4 LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES

A pesar de los esfuerzos por diversificar la matriz energética, la realidad es que nuestro país es frágil en este aspecto y carece de reservas de combustibles fósiles. Por ende, está fuertemente afecto a los precios internacionales y necesita de la exploración de otras fuentes energéticas. La autoridad política ha adoptado, en los últimos años, la decisión de efectuar un cambio progresivo de la matriz energética hacia la utilización de «Energías Renovables No Convencionales» (ERNC). Este cambio de paradigma ha demostrado ser exitoso dado que hay 2880 MW (megava-

tio) de nueva capacidad instalada en el año 2018, de los cuales 1200 MW provendrían de energía fotovoltaica, 1000 MW (megavatio) de energía eólica y 130 MW de «Pequeños Medios de Generación Distribuida» (PMGD), por lo que solo 550 MW se generarían con fuentes tradicionales. El segmento de los PMGD está referido a los medios de generación cuyos excedentes de potencia son menores o iguales a 9 MW.

En la actualidad, el porcentaje de las energías renovables en la matriz energética chilena se ha multiplicado por 5 desde 2012, y se espera que siga creciendo. En el año 2017, las ERNC fueron responsables del 20.2 % de la generación de los «Sistemas Interconectados del Norte Grande» (SING) y «Sistemas Interconectados Central» (SIC). Actualmente, estos sistemas, otrora independientes, están en proceso de unión. En total, a lo largo del año, las ERNC alcanzaron una capacidad instalada de 4895 MW. De ese modo, la meta impuesta por ley, de que en 2025 al menos el 20 % de la generación del país provenga de fuentes limpias, se alcanzó con ocho años de antelación.

Debido a la configuración geográfica del país, es posible proyectar el uso de otras energías renovables y limpias, tanto en la costa norte, que recibe abundante radiación solar, como de la costa de su extremo sur, que tiene abundante energía eólica, mareomotriz y undimotriz (de las olas). La energía solar se puede transformar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos de silicio, o mediante la generación de flujos de gran velocidad, que luego es transformada en electricidad mediante turbinas. Un caso innovador es la planta termosolar de 110 MW en María Elena, que cuenta con 10 600 espejos. La energía solar no contamina y es casi permanente, con excepción de las horas de la noche, lo cual la hace muy interesante. En contraste, demanda mucho espacio, pues es una fuente de energía distribuida en el espacio.



Figura 5.5

Figura 5.5:

Las energías marinas son importantes fuentes energéticas alternativas a los combustibles fósiles.

(Foto: Dimitris Vetsikas en Pixabay).

Figura 5.6:

Turbinas eólicas del complejo de Middelgrunden, en Copenhague, Dinamarca.

(Foto: P. Winckler).



Figura 5.6

La energía eólica, por su parte, es otra de las ERNC que generan energía a través de aerogeneradores que han comenzado a levantarse en lugares donde el viento es fuerte y bastante permanente. El potencial chileno en esta materia se estima en 25000 MW, considerando que la zona sur del país es una de las zonas con más viento en el mundo.

En la actualidad, existe una serie de herramientas para evaluar el recurso eólico en Chile. El Explorador de Energía Eólica, desarrollado por la Universidad de Chile, es una aplicación de análisis del recurso viento, que entrega resultados a partir de una simulación numérica realizada por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting). La información entregada por esta herramienta permite realizar una evaluación preliminar de este recurso en cualquier lugar de Chile, con excepción de un pequeño tramo en la zona austral de Chile.

Existen, asimismo, amplias zonas no exploradas de energía geotérmica, que corresponde a la energía calórica contenida en el interior de la Tierra. Esta energía se presenta en dos formas: i) la hidrotérmica, que involucra la presencia de agua a alta presión almacenada bajo la corteza de la tierra en rocas permeables cercanas a una fuente de calor, y ii) la denominada de sistemas de roca caliente, que comprenden capas de rocas impermeables que recubren un foco de calor.

5.5 LAS ENERGÍAS MARINAS

Como consecuencia del cambio climático en estas últimas décadas se ha acentuado la necesidad de utilizar fuentes energéticas alternativas a los combustibles fósiles y que tengan las propiedades de ser renovables y no contaminantes. Las energías marinas que cumplen con estos requisitos son:

- La energía mareomotriz, asociada tanto a las diferencias de nivel como a la velocidad de las corrientes generadas por las mareas.
- La energía undimotriz, que se genera a partir de la energía potencial y cinética del oleaje.
- La energía eólica asociada al viento, que en la mayoría de los casos en las zonas costeras es más potente que al interior del continente.
- La energía asociada al gradiente térmico entre aguas superficiales cálidas y aguas profundas frías.

De este tipo de energías, la eólica es la única que se ha desarrollado a gran escala en Chile, a través de varias plantas de generación ubicadas en las costas del Norte Chico. En lugares como Copenhague, en Dinamarca, se han instalado turbinas eólicas en el mar (Figura 5.6). Los dispositivos de generación de energía undimotriz y mareomotriz, por su parte, se encuentran aún

en estado de desarrollo a nivel mundial y se espera que alcancen una fase comercial en un par de décadas. El extenso litoral de Chile dispone más de 4500 km de costa, con un buen potencial de generación a partir del oleaje. Por otra parte, en lugares puntuales donde el flujo mareal se encajona y acelera, existen sitios idóneos para obtener energía mareomotriz. Por ende, los estudios de caracterización del potencial energético marino en Chile serán útiles para cuando estas tecnologías se encuentren en fase de explotación a gran escala.

5.5.1 La energía mareomotriz

Las mareas se han utilizado como una fuente de energía por varios cientos de años. Ya en el siglo XII, las turbinas hidráulicas impulsadas por corrientes mareales se utilizaron para hacer funcionar aserraderos y para los denominados «molinos de marea», destinados en su gran mayoría para moler el grano.

La energía mareomotriz se puede aprovechar construyendo una represa a través

de la boca de una bahía o un estuario que tenga un gran rango mareal. Mediante el represamiento del agua, el flujo de entrada y salida se puede utilizar para impulsar turbinas y generadores eléctricos. No obstante, estas centrales requieren de rangos de marea superiores a 5 m y de bahías estrechas, cerradas, pero de gran extensión. Estas exigencias limitan las áreas aptas para la localización de centrales mareomotrices a tan solo unos veinte lugares en el mundo. Asimismo, los impactos ambientales asociados a este tipo de solución son enormes, pues el uso de una presa modifica completamente el patrón hidrodinámico de la bahía.

Una opción menos eficiente es extraer la energía mecánica de las corrientes mareales mediante turbinas, con lo cual no se requiere embalsar el agua. A diferencia de una presa, donde la energía del flujo se concentra en un ducto en el cual se ubica el generador; en este caso la energía no está concentrada y, por lo tanto, los rendimientos son mucho menores. En este sentido, la energía obtenida por medio de turbinas hidrocine-

Explorador de Energía Eólica

<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>





Figura 5.7

Figura 5.7:

Fotografía aérea de la sección más angosta del canal Chacao, durante una condición de marea vaciante. Al fondo se encuentra el océano Pacífico. En el tramo central, donde se observa espuma superficial, se ubica la roca Remolinos; una formación de baja profundidad donde se emplazará una de las torres del futuro puente Chacao. El canal Chacao es uno de los lugares con mayor potencial de energía mareomotriz de Chile.

(Foto: Horacio Parragué).

ticas individuales se asemeja a la conversión de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos o de la eólica a través de turbinas, pues todas requieren de una gran cobertura espacial para generar una cantidad de energía comparable a la de los sistemas donde la energía se concentra.

Uno de los sectores interesantes para el aprovechamiento de la energía mareomotriz en Chile es el canal Chacao (Figura 5.7). La Escuela de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso desarrolló una evaluación del potencial de energía de corrientes de marea y oleaje entre las Regiones de Coquimbo y de Los Lagos, en Chile (EICO,

2009), trabajo que, entre otras cosas, define la mejor ubicación de un prototipo en la zona del canal Chacao mediante un modelo hidrodinámico. Las conclusiones más relevantes de este estudio, en lo que dice relación con la energía generada por las mareas fueron:

- La energía máxima disponible se estima en 6.2 TWh/año, lo que ubica al canal Chacao como uno de los lugares con mayor potencial mareomotriz a nivel mundial.
- La potencia describe una notoria variabilidad horaria a lo largo del ciclo lunar, donde las mayores intensidades se presentan en el período de

sicigia durante la vaciante y las menores, en cuadratura durante la llenante. La variación mensual y anual es poco relevante, por lo que podría garantizarse una potencia firme mayor que otras alternativas de energías renovables no convencionales, tales como el oleaje, la energía solar o la eólica.

- Se identificaron seis zonas de interés a lo largo del canal, cuyas velocidades máximas superan un umbral de 2.5 m/s y poseen profundidades inferiores a 60 m. Tres de ellas se encuentran en las inmediaciones de la roca Remolinos, en el sector más angosto del canal Chacao. Las restantes se encuentran cercanas a la boca occidental del mismo, en las cercanías de Carelmapu.

En consecuencia, la energía mareomotriz en canal Chacao surge como una opción atractiva, ya que es predecible, permanente e inagotable. Existen otros estudios posteriores (Guerra *et al.*, 2017) que constatan que este es uno de los canales más energéticos del mundo.

Finalmente, la periodicidad de las mareas constituye una ventaja frente a la planificación del recurso. Por ejemplo, García

Figura 5.8:

Gráfico de potencia requerida por un sistema aislado en la localidad de Melinka. En rojo se muestran los momentos en que, debido a los menores rangos mareales, la energía es abastecida mediante un sistema de respaldo activado por petróleo. En azul, aquellos momentos donde la energía mareomotriz alcanza a satisfacer las demandas.

(Adaptado de García & Winckler, 2009).

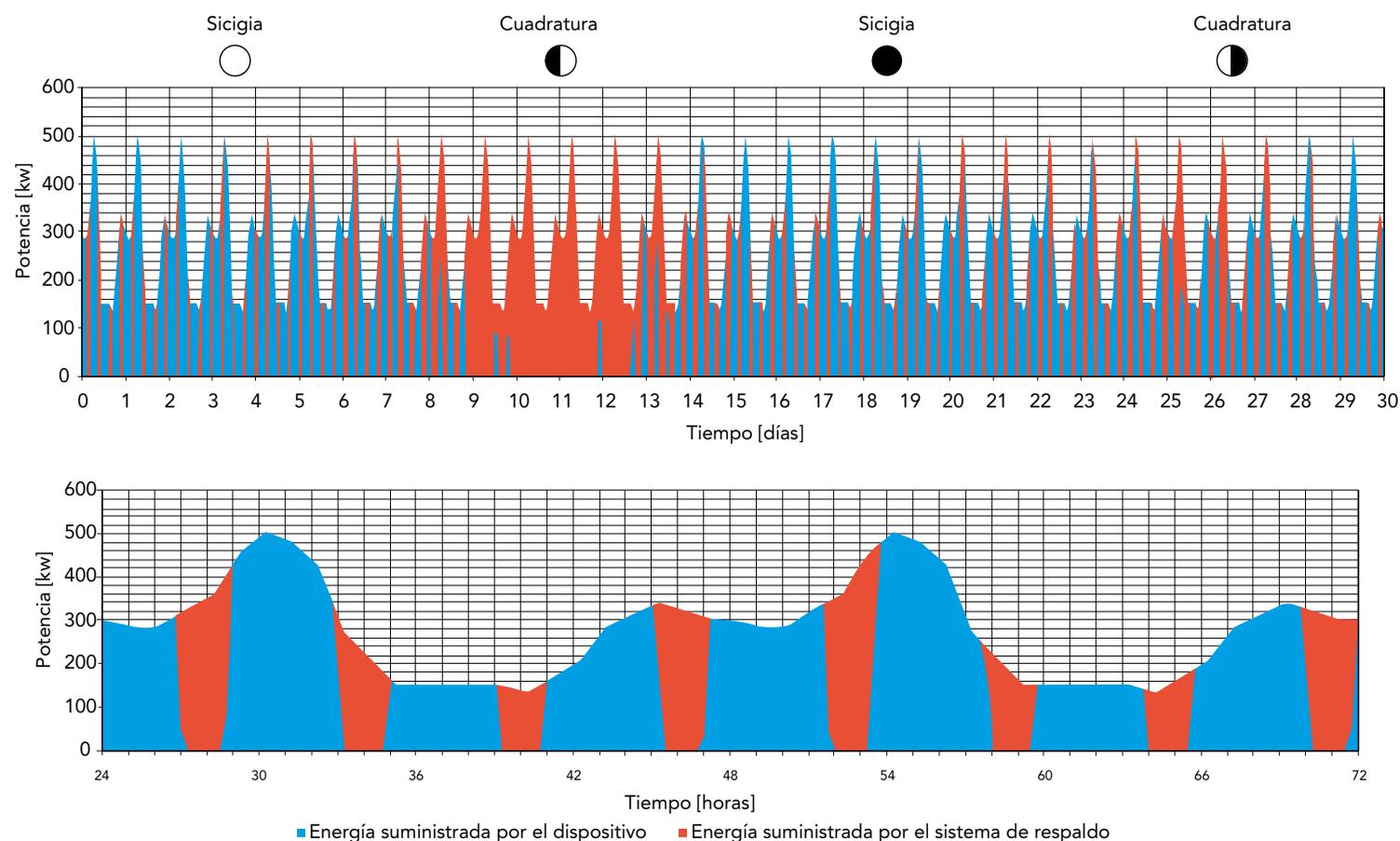


Figura 5.8

& Winckler (2009) efectuaron, en la localidad de Melinka, una evaluación del potencial de la energía originada por corrientes de marea para generación en sistemas aislados, donde propuso un sistema híbrido en que la oferta energética se satisface, principalmente, con petróleo, durante las cuadraturas y con energía mareomotriz durante sicigias (Figura 5.8).

5.5.2 La energía undimotriz

La energía undimotriz se obtiene a través de la captación de la energía mecánica del oleaje. Teóricamente, la cantidad de energía disponible es proporcional al período y al cuadrado de la amplitud de las olas. Su conversión, no obstante, es compleja, pues los dispositivos se sumergen en un ambiente hostil, donde los eventos extremos generan grandes fuerzas y la salinidad del agua amenaza su integridad a largo plazo. Asimismo, la costosa mantención de artefactos flotantes y el costo por unidad de energía generada es mucho mayor que otras tecnologías más baratas producidas en tierra.

La historia de intentos fallidos por extraer energía undimotriz es larga. En 1884, el catalán José Barrufet patentó un ingenio para

aprovechar las olas denominada «Marmotor», consistente en una serie de boyas cuyo movimiento se transmitía a un generador eléctrico que lo transformaba en electricidad, proporcionando un mínimo de energía de 0.36 kW. Sería la primera de 15 patentes de dispositivos de energía undimotriz que quedó en el olvido por razones desconocidas.

En el 2004, 120 años después, un dispositivo denominado «Pelamis» fue el primero en inyectar energía a la red eléctrica del Reino Unido. El dispositivo, de 150 m de largo, consistía en cuatro grandes tubos de acero, articulados por tres bisagras, en las cuales se alojaban bombas hidráulicas. El oleaje movía las bsa-

gras y las bombas hidráulicas entraban en acción, enviando un fluido a alta presión al generador hidráulico que produce la energía eléctrica. Cada «Pelamis» era capaz de generar 750 kW, los que eran transmitidos a tierra a través de unos cables submarinos. La compañía efectuó pruebas de concepto y llegó a operar en fase comercial, pero en el 2014 se declaró en bancarrota. En la actualidad, se siguen desarrollando distintos tipos de dispositivos en aguas profundas, intermedias y cerca de la costa, ninguno de los cuales ha alcanzado un grado de desarrollo suficiente para la explotación a gran escala.

Para comprender estas tecnologías, vale recordar algu-

nos aspectos esenciales de las características del oleaje en Chile.

El oleaje es generado por mecanismos de origen local (*seas*) y remoto (*swell*). En el primer caso, los vientos producen olas en la zona inmediata, cuyos períodos típicos son de 4 a 8 s. El *swell* proviene de diferentes regiones en la cuenca del océano Pacífico, con períodos del orden de 8 a 25 s. El oleaje en las costas abiertas de Chile se ve dominado por el *swell* remoto, lo que las convierte en uno de los sitios más aptos del mundo para la generación de electricidad con energía undimotriz. El *swell* es marcadamente regular, con baja dispersión direccional y períodos altos, lo que incide en la baja variabilidad estacional de la potencia y en los altos factores de capacidad que pueden desarrollar los dispositivos de explotación de esta energía.

En el estudio de la Universidad de Valparaíso (EICO 2009) se evaluó la disponibilidad energética de oleaje en las zonas costeras, comprendidas entre las Regiones de Valparaíso y la de Los Lagos, con el objetivo de efectuar una preselección de potenciales sitios atractivos para el desarrollo de esta fuente energética. Considerando una serie de factores como la disponibilidad energética y la cercanía a la red eléctrica, el trabajo concluyó que los sectores más atractivos son Punta Curaumilla (Región de Valparaíso), Punta Nugure (Región del Maule) y Punta Tucapel (Región del Biobío), con máximas potencias de 33, 35 y 47 kW/m, respectivamente. El estudio se enfocó en penínsulas, porque ellas generan amplificación en la energía del oleaje debido a la acción combinada de la refracción, el asomeramiento y la reflexión.

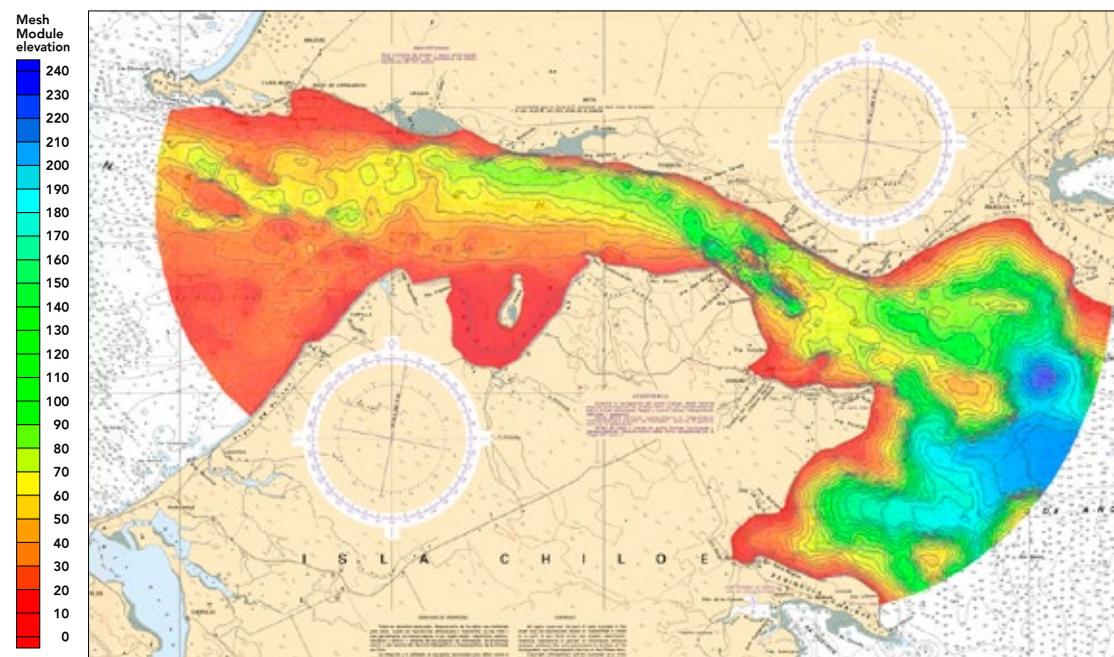


Figura 5.9 a

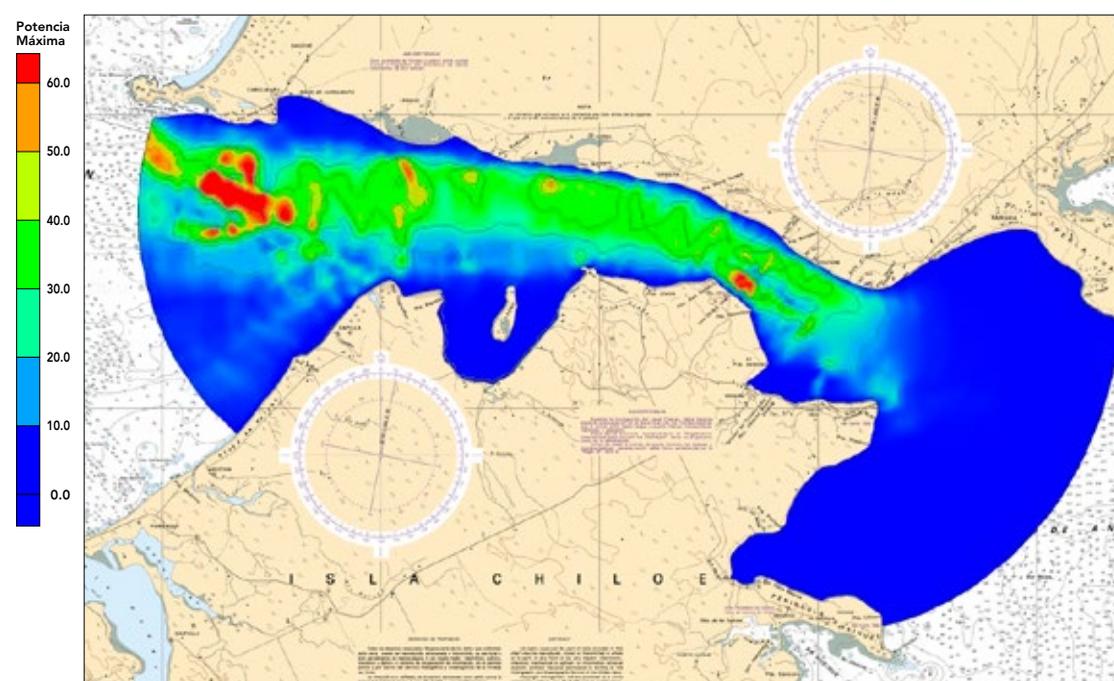


Figura 5.9 b

Se observó también que en los sitios estudiados no existe un aumento significativo de la potencia entre aguas profundas y someras, lo que implica que no necesariamente serán los mejores lugares para ubicar dispositivos. Esto se traduce

en que, prácticamente, cualquier porción de costa expuesta al Pacífico será atractiva para la explotación, en la medida que la batimetría local permita utilizar sistemas de transmisión a costos razonables. Al respecto, cabe destacar que los costos de instalación y mantenimiento aumentan a medida que crece la distancia entre el emplazamiento de la central y el continente, por lo que esta debiera minimizarse al momento de proyectar una futura planta undimotriz.

Figura 5.9:

Modelación hidrodinámica del canal Chacao, orientada a definir lugares atractivos para extraer la energía de las corrientes de marea.

a) Batimetría utilizada en el modelo numérico.

b) Máxima potencia del flujo [kW/m^2] obtenida durante un ciclo lunar, durante una sigiccia. La potencia se concentra en lugares donde la velocidad del flujo es alta, como en Roca Remolino, en la sección más angosta del canal. También hay una zona de alta concentración de energía al sur de Carelmapu, en el extremo occidental del canal, donde el canal es relativamente bajo pero tiene dos canales donde la velocidad es alta. Los lugares en rojo son candidatos a disponer de turbinas hidrocinéticas para extraer la energía del flujo.

(Fuente: García & Winckler, 2009).

Figura 5.10:

Parque eólico Canela, Región de Coquimbo.

(Foto: Cristian Contreras/
www.plataformaurbana.cl).



Figura 5.10

5.5.3 La energía eólica en la costa

El viento es una corriente de aire que tiende a compensar el desequilibrio en la atmósfera por la existencia de masas de aire a distintas temperaturas. El viento genera una energía renovable, gratis y no contaminante, que se ha utilizado durante siglos. Los granjeros dependían de ella para bombear agua y generar electricidad. El desarrollo de las grandes centrales eléctricas a partir de la década de los treinta, disminuyó fuertemente dicha dependencia.

Aproximadamente, el 0.25 % de la energía solar que alcanza las capas inferiores de la atmósfera se transforma en viento. A pesar de ser un porcentaje poco significativo, la cantidad absoluta de energía es muy grande. De hecho, con la tecnología actual, diez molinos de viento pueden generar energía para abastecer la demanda de 19 000 hogares en un año, mientras que uno solo evita la emisión de 6375 toneladas de CO₂.

En Chile, los indicadores que dan cuenta del potencial eólico muestran que la mayor ocurrencia se presenta a lo largo de la costa. El Ministerio de Energía estima un potencial cercano a los 40 500 MW en proyectos, cifra que refleja el extenso espacio disponible para nuevas iniciativas eólicas. Sin embargo, no todos los sitios con buen potencial son aptos, dado que en las zonas costeras donde están los mejores vientos puede existir resistencia de las comunidades locales o áreas protegidas.

Los tres primeros aerogeneradores en el país se instalaron en la localidad de Alto Baguales, cerca de Coyhaique, en noviembre de 2001; dispositivos con una capacidad instalada de 2 MW que abastecen de electricidad a casi 2000 familias. En el año 2007, entró en operaciones el primer parque eólico unido al Sistema Interconectado Central (SIC), ubicado en la localidad de Canela, Región de Coquimbo (Figura 5.10). El parque partió con 11 aerogeneradores que producen 1.65 MW cada uno, con una generación anual de 46 000 MWh.

A partir de ese primer parque eólico, se inició un verdadero «boom» de estas instalaciones en Chile, principalmente en la

zona costera del Norte Chico y del Biobío. A estos grandes parques hay que sumar un número creciente de aerogeneradores de pequeña escala, situados en sistemas aislados, que no forman parte del SIC y también de aerobombas que llevan décadas funcionando en el país. Hacia 2018, existían 651 aerogeneradores, número que sigue creciendo un año después.

El ministerio del ramo indica que la energía generada a través de parques eólicos aumentará considerablemente en función de nuevos proyectos. La meta es que al menos un 70 % de la matriz eléctrica al año 2050 provenga de fuentes renovables, con énfasis en la energía solar y la eólica, y con la incorporación progresiva de la geotermia, la biomasa y las energías oceánicas.

5.6 LOS HIDRATOS DE METANO

En el año 2001, cuando se aceleraban las gestiones para el reemplazo del suministro de gas proveniente de la República de Argentina, un conjunto de instituciones nacionales y extranjeras, lideradas por la Pontificia Universidad

Católica de Valparaíso, con el apoyo del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) y empresas privadas, desarrollaron el proyecto denominado «Hidratos Submarinos. Una nueva fuente de energía para el siglo XXI»¹. Su propósito fue demostrar la existencia de una novedosa fuente de energía en los fondos marinos cercanos al litoral de Chile: los hidratos de gas submarinos. Este tipo de formación natural contiene grandes cantidades de gas natural, principalmente metano, y agua en forma de hielo (Figura 5.11).



Figura 5.11

Figura 5.11:

Hidratos de metano. Recurso compuesto por acumulaciones cristalinas formadas por gas natural y agua.

(Fotos: SHOA).

¹ El proyecto fue dirigido por el Dr. Esteban Morales, uno de los autores de este texto.

Los hidratos de gas son acumulaciones cristalinas similares al hielo, formadas de gas natural y agua. El bloque constructor de este sólido cristalino es una estructura denominada «clatrato», en la cual las moléculas de agua forman una celda cuyo interior está ocupado por moléculas de gas. En la naturaleza existen varios gases que tienen tamaños moleculares adecuados para formar hidratos de gas; sin embargo, el más común es el hidrato de metano. Estos hidratos son concentradores naturales de gas y pueden almacenar grandes porcentajes de este por unidad de volumen, en condiciones de presión y temperatura estándar. En concreto, 1 m³ de hidrato de metano produce 164 m³ de metano gaseoso y 0.8 m³ de agua (Figura 5.12).

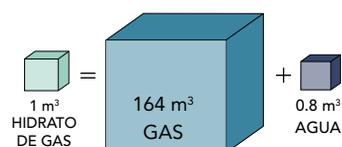


Figura 5.12

A nivel mundial hay dos ambientes donde se encuentran hidratos en grandes cantidades. El primero es bajo capas de suelo congeladas permanentemente, denominadas «permafrost», que se sitúan en las regiones frías del planeta y a profundidades de algunos cientos de metros. El segundo ambiente es el fondo oceánico y a poca profundidad, en un sistema finamente balanceado entre sus componentes, tales como los sedimentos, la presión, la temperatura y el agua que cubre la capa de sedimentos.

A escala global, la cantidad de gas almacenado en los hidratos de metano se estima entre 10¹⁵

y 10¹⁶ m³, lo que equivale a varias veces las reservas mundiales de gas y petróleo. En el margen continental de Chile, por su parte, se estima que el volumen de gas podría ser del orden de 3.2 x 10¹³ m³, lo que es tres órdenes de magnitud superior al consumo anual del país. Si solo una pequeña fracción de este gas pudiera efectivamente ser explotado, podría constituir la reserva de combustibles fósiles más grande de la tierra y colaborar de manera importante en la economía nacional.

El proyecto «Hidratos de gas submarinos: una nueva fuente de energía para el siglo XXI» consistió en compilar la información geológica y geofísica del margen continental de Chile, definir áreas prioritarias para prospecciones futuras, estimar los volúmenes de metano disponibles y proponer un marco legal para el manejo del recurso. El área considerada para el proyecto comprendió entre los 31° a 39° S y entre la línea de la costa y los 77° W. Debido a la falta de equipos y profesionales calificados en Chile, se buscó apoyo científico y tecnológico de investigadores de Alemania, Dinamarca, Noruega, Canadá, Estados Unidos y Japón. La Armada de Chile puso a disposición el buque oceanográfico «Vidal Gormaz» para realizar tres cruces de prospección en la zona de estudio (Figura 5.13).

Las mediciones en terreno y los antecedentes de campañas oceanográficas extranjeras permitieron mejorar el conocimiento de un sector importante del margen continental chileno, y generar, entre otros productos, una cartografía submarina de gran resolución, elaborada a partir de las mediciones de un poderoso ecosonda multihaz facilitado por GEOMAR (Alemania).

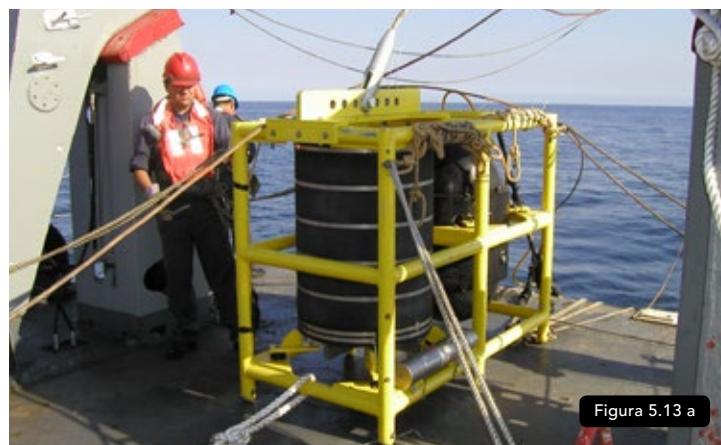


Figura 5.13 a



Figura 5.13 b

Estas observaciones se complementaron con mediciones de las anomalías de la gravedad obtenidas con un gravímetro facilitado por la Universidad de Bergen (Noruega) y con mediciones del magnetismo que, en conjunto, permitieron discriminar los contrastes en densidad y magnetización de la secuencia sedimentaria que aloja los hidratos de gas. Con ello se caracterizaron las unidades litológicas del subsuelo y de su sistema estructural. Una medición novedosa consistió en la determinación del transiente electromagnético, gracias a un equipo facilitado por la Universidad de Toronto (Canadá), que permitió conocer la resistividad de los hidratos de gas y del gas atrapado bajo ellos. Otra medición relevante fue la de flujo de calor, dado que las condiciones de presión y temperatura son críticas para la estabilidad de los hidratos. Estas observaciones constituyeron, además, las primeras observaciones masivas de flujo de calor realizadas en el margen chileno, gracias al apoyo de equipos y científicos aportados por la Universidad de Bremen (Alemania).

Estas mediciones se completaron con las de reflexión sísmica convencional mediante un instrumento operado por científicos de la Universidad de Aarhus (Dinamarca), que permitió la identificación de una anomalía conocida como «Bottom Simulating Reflector», comúnmente utilizada para la identificación de hidratos de gas. Estas mediciones se complementaron con observaciones de reflexión sísmica profunda, obtenidas mediante un equipo de última generación aportado por la Oficina de Investigaciones Navales de la Armada de los Estados Unidos

Figura 5.12:

Equivalencia en gas y agua de 1 m³ de hidrato de metano.

(Elaboración propia).

Figura 5.13:

Crucero Hidratos de Gas realizados a bordo del buque oceanográfico «Vidal Gormaz» de la Armada de Chile.

a) Deep Towed Acoustic Geophysical System» (DTAGS), equipamiento de última generación utilizado en la ocasión.

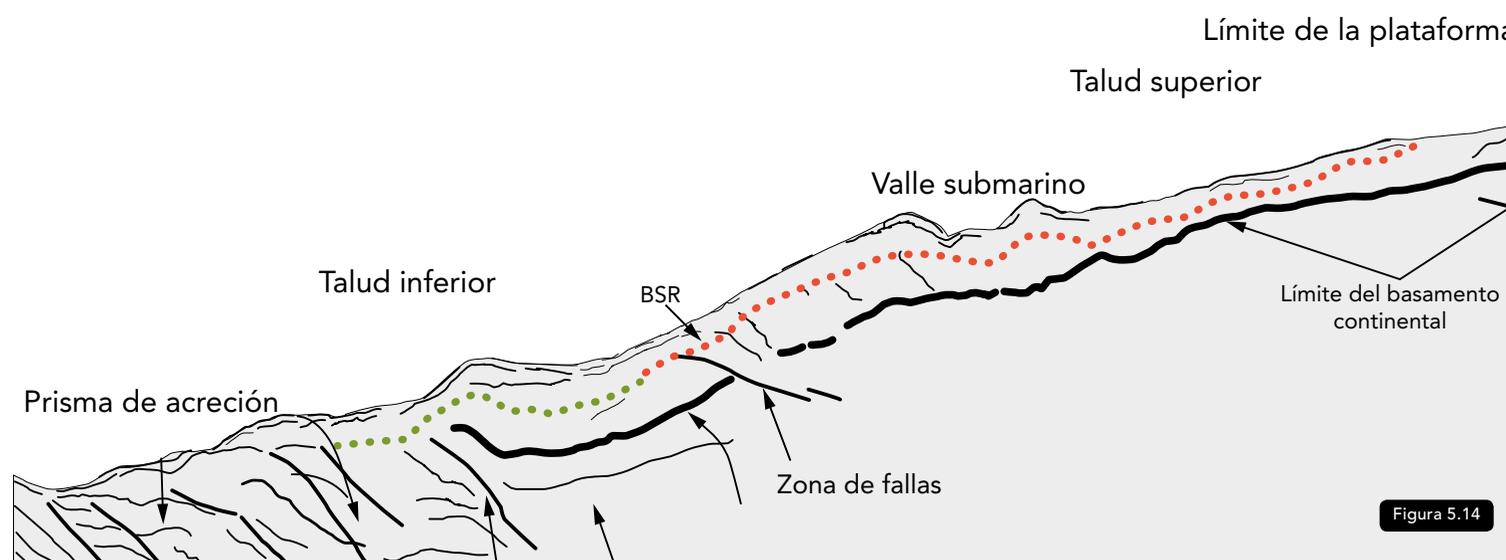
b) Pistón corer para muestras del fondo marino.

(Fotos: SHOA).

Figura 5.14:

Perfil sísmico en el margen continental de Chile mostrando el registro de la anomalía conocida como «Bottom Simulating Reflector» (BSR) (en rojo y verde).

(Perfil sísmico, línea 6 ENAP. Adaptado de Díaz-Naveas, 1999).



de América, denominado «Deep Towed Acoustic Geophysical System» (DTAGS) (Figura 5.13).

En total se cartografiaron 26 líneas sísmicas, de longitud entre los 1.3 km la más corta y de 37.7 km la más extensa, cubriendo un total de 386.6 km. A partir de varios supuestos fundados científicamente, se estimó un volumen de hidratos de gas entre los 32° y los 40° S de unos 100 km³, los que multiplicados por el factor de amplificación de 164 (a temperatura y presión estándar) ascienden a 16400 km³, lo que constituye una reserva energética capaz de servir los requerimientos del país a largo plazo. Asimismo, se estimó que, en dicha franja latitudinal, la capa de hidrato de gas tiene un espesor de 130 m y que el área susceptible de contener hidratos de gas es de 9660 km². El proyecto contó con el apoyo de la institucionalidad científica y política.

En el año 2018 se inició el proyecto denominado «A first estimation of gas hydrates offshore Patagonia, Chile», con el cometido de estudiar tres nuevas áreas de interés frente a la zona costera

de Chile. Dichas zonas comprenden entre el río Itata y Arauco; Valdivia y Chiloé y, finalmente, entre Coyhaique y la Patagonia Chilena. Los investigadores estiman que en la primera de estas zonas la presencia de este recurso alcanzaría un volumen total de roca de 15 %, en la segunda estos valores serían del orden del 20 % y en la última entre 8 % y 20 % del volumen total de roca.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

DÍAZ-NAVEAS, J. (1999) Sediment Subduction and Accretion at the Chilean Convergent Margin Between 35' and 40° S. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

EICO (2009). *Evaluación del potencial de energía de corrientes de marea y oleaje entre las IV y X regiones de Chile*. Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso.

GARCÍA, R. & P. WINCKLER (2009). Generación de energía por corrientes de marea en Chile. Una aplicación al caso de Melinka. En: *Anales del Instituto de Ingenieros* Vol. 121, N° 3: 87-102.

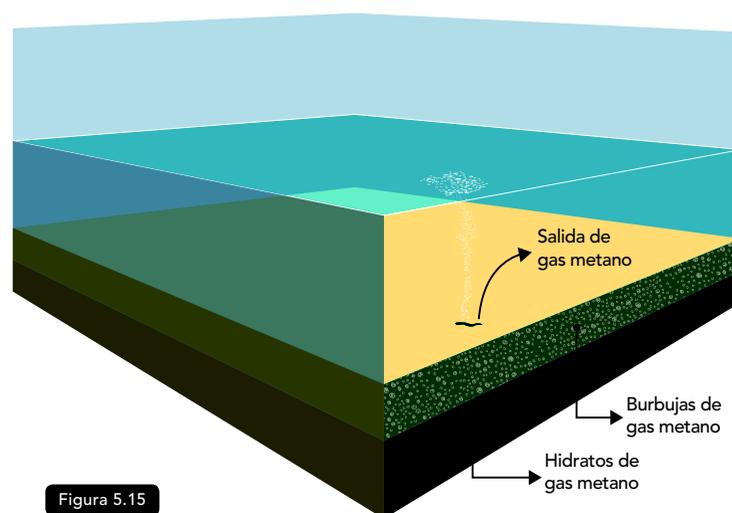
GUERRA, M., R. CIENFUEGOS, J. THOMSON & L. SUÁREZ (2017). Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile. *International journal of marine energy*, 20, 1-16.

PNUMA (2014). *Decisión 2. Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible*. XIX Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. Los Cabos (México): 14 de marzo de 2014. 4p.

Figura 5.15:

Capas de hidratos de metano en el fondo marino.

(Ilustración: Ricardo Aliaga/SHOA).


Figura 5.15

EL ORDENAMIENTO JURÍDICO Y GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA

Páginas 144 - 171



Figura 6.1

Figura 6.1:

Carelpamu, ubicado en la Región de Los Lagos, posee una actividad económica basada principalmente en la extracción de recursos marinos.

(Foto: H. Horta/Armada).

6.1 PRINCIPIOS GENERALES

A lo largo de nuestra existencia como nación, distintas han sido las iniciativas consideradas para regular la protección del medio marino y su zona costera, incluyendo su ecosistema, el cual es comprendido como: «[el] complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional» (CDB, art. 2°).¹

Según ha sido expresado por el «Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile»

(Universidad de Chile, 2016): «[...] el borde costero marino es un sistema natural, altamente complejo, caracterizado por múltiples recursos geográficos, muy relevantes para el ser humano, siendo el punto de congruencia de tres componentes fundamentales de la Biosfera; el mar, la tierra y la atmósfera» (p. 283).²

Además, las zonas costeras han sido por mucho tiempo gran fuente de riquezas y atractivos para los países que las poseen. Son espacios geográficos generalmente muy poblados, en los cuales se han efectuado actividades tradicionales desde los inicios de

la civilización humana. En la actualidad, con el desarrollo de nuevas actividades industriales y turísticas, los espacios costeros son objeto de una creciente ocupación humana, por lo cual están directamente amenazados si no se toman los resguardos necesarios.

Del mismo modo, el ordenamiento jurídico y la gestión de la zona costera ha sido compleja, debido a que en el manejo de un espacio tan singular han concurrido un elevado número de administraciones sectoriales, de la pesca, de la defensa, del medio ambiente, de las obras públicas, de la minería, del urbanismo, de la industria, de la agricultura, entre otras. También, han actuado en ella, todas las escalas administrativas competentes, sean estas locales, metropolitana, provincial, regional, nacional y supranacional.

Dada las características particulares de este entorno geográfico, se requiere de algunos principios básicos para su manejo apropiado. El primer principio es que la zona costera es un sistema único de recursos donde los usos de la tierra y el mar se deben manejar y planificar, teniendo como meta la conservación de la propiedad común de ellos.

¹ Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), del cual Chile es Estado parte, conforme con el Decreto Supremo N°1963, publicado en el Diario Oficial de fecha 6 de mayo de 1995. Disponible en <http://bcn.cl/1v4me>

² Véase <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168049> (o escanee el código QR de esta página).

Informe País:

Estado del medio ambiente en Chile. Comparación 1999-2015.





Figura 6.2

Figura 6.2:

Puerto de refugio de Maullín. Recinto que se compone de un muelle y dársena para las embarcaciones, además de una explanada.

(Foto: P. Winckler).

Un segundo principio es que los programas de manejo de la zona costera deben considerar la prevención de riesgos naturales y la conservación de los recursos naturales, utilizando formas especiales de la evaluación económica, de los beneficios sociales y de participación ciudadana.

Por último, se ha requerido una ordenación integrada del sistema costero, el cual ha debido considerar la fragilidad de los ecosistemas presentes, bajo una «visión ecológica».

6.2 NORMATIVA INTERNACIONAL EN RESGUARDO DEL MEDIO MARINO Y COSTERO

El resguardo de las zonas costeras ha estado íntimamente ligado a los procesos regulatorios asociados al control de la contaminación marina, al alero del Derecho Ambiental Marítimo. La preocupación por la protección y preservación de los ecosistemas marinos es en la actualidad un problema de orden mundial, dado que se reconoce que más de las dos terceras partes del planeta están cubiertas por océanos y que estos constituyen el principal factor que modela el comportamiento de procesos como el cambio climático y la regulación de la temperatura de la Tierra. Además, la preservación del medio ambiente, especialmente en el medio marino, desemboca en cuestiones de valores y, por ende, de elección. Entraña así, en último término, un problema cultural, cuya solución debe buscarse en el campo de la educación ambiental (Valenzuela, 1974).

Sin embargo, la historia ha evidenciado que los problemas relacionados con la preservación del medio marino no han

logrado ser solucionados en el solo campo de la educación. Al margen de las múltiples cuestiones de orden científico y técnico que encierra el gran número de procesos involucrados en este medio, existe un nivel de solución que debe ser asumido en el campo del Derecho, ya que solo la fuerza coactiva de este puede ser capaz de imponer un orden de conductas que logre coincidir los intereses particulares de personas naturales y jurídicas, con su conservación de este patrimonio ambiental (Valenzuela, 1976).

La historia ha demostrado que la preservación del medio y de sus recursos marinos y costeros ha representado una norma imperativa del Derecho Internacional (lo que, también, es conocida, en su terminología técnica como *jus cogens*). Esto explica que en la actualidad esté incluido como norma obligatoria en los convenios, acuerdos y declaraciones internacionales, así como en las

disposiciones constitucionales y en las leyes especiales sobre preservación del medio ambiente marino.

Muchos han sido los autores que —si bien es cierto señalan que los orígenes de la problemática ambiental se remontan a la Roma antigua— suelen aceptar que esta solo se reconoce en la década de los setenta (Amaya, 2001). Sin embargo, la preocupación internacional sobre los aspectos en materia de protección del medio marino ya se venía discutiendo antes de la aparición del llamado «Derecho del Medio Ambiente», o simplemente, «Derecho Ambiental», en los setenta. El elemento precursor, en este sentido, fue la contaminación originada por hidrocarburos, lo cual era admitido antes de la Primera Guerra Mundial como resultado de la expansión del transporte marítimo desde comienzos del siglo XX.



Figura 6.3:

Puerto de Iquique, ubicado en la región de Tarapacá, en la costa norte de Chile y frente al océano Pacífico. Esta ubicación privilegiada, lo convierte en la entrada y salida natural del cono central de Sudamérica, desde y hacia los mercados internacionales.

(Foto: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias).

6.2.1 Las primeras normas destinadas a la protección del medio marino

Los primeros que intentaron obtener un acuerdo internacional para combatir la contaminación por hidrocarburos fueron los Estados Unidos de América (EE.UU.) y, posteriormente, la Liga de Naciones. Así, en 1926, la Conferencia Marítima Internacional, desarrollada en Washington D.C., decidió adoptar el «Primer Convenio Internacional Relativo a la Contaminación por Petróleo». Sin embargo, las soluciones que dicho instrumento aportaba no prosperaron en un acuerdo definitivo, por lo que este tratado fracasó al no ser ratificado por ninguna nación.

En los años veinte y treinta del siglo XX, varias naciones introdujeron sus propias medidas e impusieron multas para evitar las descargas de hidrocarburos a sus aguas territoriales, pero en ningún caso estas se internacionalizaron. En tal sentido, fue el Reino Unido el que lideró el desarrollo de varios acuerdos que prosperaron a nivel internacional y que tuvieron relación con la seguridad marítima y la prevención de la contaminación. Ejemplos de ello son el «Convenio Internacional sobre Seguridad de la Vida Humana en el Mar», de 1920 y 1948; el «Convenio Internacional sobre Líneas de Carga», de 1920, y el «Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación de las Aguas del Mar por Hidrocarburo», de 1954 (el cual fue posteriormente enmendado en 1962 y en 1969 (OILPOL 54/69).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el problema de la contaminación generada por los derrames de hidrocarburos fue muy recurrente, en particular en las costas del océano Atlántico, debido a los buques que eran hundidos o dañados por la acción de la guerra. Una vez concluida esta, las Naciones Unidas reconocieron la necesidad de crear una agencia dedicada exclusivamente a temas marítimos. Así, en 1948 se convocó a la Conferencia Marítima de la Naciones Unidas en Ginebra, donde se aprobó la «Convención sobre la Organización Marítima Internacional (OMI)». A través de este acuerdo, que entró en vigor en 1958, se creó oficialmente la OMI, que estableció como sus objetivos principales:

- servir de mecanismo de cooperación entre los gobiernos, en el campo de los aspectos técnicos de las actividades derivadas del transporte marítimo internacional;
- promover la adopción de convenios internacionales que establezcan los más altos estándares prácticos en materias de seguridad marítima, eficiencia de la navegación y prevención y control de la contaminación marina por buques.

El acuerdo también trata los aspectos legales derivados de dichas temáticas.

A la contaminación originada por las consecuencias de las dos Guerras Mundiales, se sumó las observadas por las operaciones ordinarias que llevaban a cabo los buques-tanque, lo cual condujo a que a mediados del siglo XX se desencadenara una creciente y justificada inquietud a lo largo de la mayor parte de los países costeros de Europa. En aquella época, era común que los buques-tanque, que navegaban sin carga, vertieran directamente al mar sus residuos líquidos, originados por el lavado de los estanques y el lastre de agua de mar, el cual se empleaba con el fin de otorgarle una mayor estiba a la nave y que, al estar en contacto permanente con los residuos procedentes de los estanques de combustible, los contaminaban y consecuentemente, causaba un mayor daño sobre los ecosistemas marinos.

El primer paso importante en materia del control internacional de esta contaminación se dio en 1954, cuando una conferencia internacional, realizada en Londres (Inglaterra), decidió adoptar el «Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación de las Aguas del Mar por Hidrocarburos», conocido como OILPOL/54. La principal ventaja del Convenio fue generar un área de protección especial para aquellas aguas marinas cercanas a las zonas costeras, frente a las acciones de contaminación derivadas del vertimiento de hidrocarburos. Dicho objetivo se logró a través del establecimiento de «zonas prohibidas», las cuales se extendían desde una distancia mínima de 50 millas náuticas de la costa más cercana, o a 100 millas náuticas para los casos del mar Mediterráneo, mar Rojo, Australia, entre otros, en cuya área estaba prohibida la descarga de hidrocarburos o mezclas oleosas (sustancias con un contenido de hidrocarburos igual o superior a 100 partes por millón).

Mientras tanto, en Sudamérica se llevaban a cabo diversas conferencias en materia de Derecho Ambiental Marítimo, entre las cuales se destacó la realizada en Santiago de Chile, el 18 de agosto de 1952, donde se logró suscribir el primer acuerdo regional, que permitió a los Estados contratantes declarar su Zona Económica Exclusiva de 200 millas náuticas («Declaración de Santiago»).

Además, en la misma ocasión, se creó la «Comisión Permanente del Pacífico Sur» (CPPS), organismo intergubernamental con personalidad jurídica de derecho internacional, destinado a coordinar, fortalecer y cooperar en investigaciones, adoptar acciones y participar en la creación de políticas regionales para desarrollo del derecho del mar, la protección del medio marino y sus recursos. La CPPS fue ratificada por Ecuador, Perú y Chile, el 18 de agosto de 1952. Posteriormente, Colombia se adhirió a dicho sistema, en virtud del convenio de incorporación suscrito en Quito (Ecuador) el 9 de agosto de 1979. Los primeros esfuerzos de la CPPS, se remontan a las reuniones ordinarias sostenidas en Paracas (Perú), durante los años 1966 y 1968, donde se adoptaron los acuerdos XII y IV, respectivamente.

En febrero de 1957, la Asamblea General de las Naciones Unidas, a través de su Resolución 1105 (XI), convocó a una Conferencia internacional de plenipotenciarios sobre el Derecho del Mar, la cual se efectuó en Ginebra,

(Suiza). Fruto de esta reunión, se suscribieron cuatro convenciones, entre las cuales se destacan la «Convención sobre Alta Mar y la Convención sobre Plataforma Continental» (Ferrero, 1987).

La «Convención sobre Alta Mar» permitió ampliar el concepto de fuente generadora de contaminación marina, manejado en aquella época. De esta forma, ya no solo se hablaría de las fuentes procedentes de los hidrocarburos, sino que ahora se incluía, también, aquellas provenientes de desperdicios radiactivos y de la explotación y exploración del subsuelo marino. Se dispuso que era obligación de los Estados contratantes prevenir la contaminación de las aguas jurisdiccionales de otros países, producto de derrames de hidrocarburos o de sustancias radiactivas que se hubieran originado en su propio mar territorial; así como también, aquellas procedentes de las operaciones de sus buques y/o tuberías en alta mar, por la operación de instalaciones y estructuras localizadas en la plataforma continental.

Figura 6.4:

Ejemplo de diversos usos de la zona costera de la isla grande de Chiloé, Región de Los Lagos.

(Foto: Armada).



Figura 6.4



Figura 6.5

Figura 6.5:

El Tratado Antártico comprende un conjunto de principios y objetivos a partir de los cuales comenzó a edificarse un sistema jurídico-político para administrar la cooperación internacional y la investigación científica en la Antártica.

(Foto: Armada).

A su vez, la «Convención sobre Plataforma Continental» permitió ampliar las garantías reconocidas para los Estados costeros, al señalar que «un Estado ribereño podrá ejercer derechos de soberanía sobre la plataforma continental a los efectos de su exploración y de la explotación de sus recursos naturales;»³ aclarando que, dichos derechos, son exclusivos de los Estados costeros e independientes a su ocupación real o ficticia. Asimismo, la Convención potenció el interés de los Estados ribereños para proteger sus recursos vivos, fuera de su mar territorial, para lo cual incluyó la capacidad de declarar zonas de seguridad que solo el Estado ribereño podría establecer alrededor de las áreas de explotación o explotación, protegiéndose de este modo a los recursos vivos de mar contra posibles «agentes nocivos».

La primera «Convención sobre Derechos del Mar», Ginebra (1958), y aquella que se efectuó en 1960 tuvieron una mayor trascendencia de la que se esperaba originalmente. En tal sentido, con el propósito de evitar la contaminación marina originada por actividades de radiactividad (artículo 25° de la Convención de Alta Mar), sirvió de base para que se incluyera en el artículo V del «Tratado Antártico», firmado en Washington D.C. (EE. UU.) el 1° de diciembre de 1959, en el que se prohíbe efectuar explosiones nucleares y eliminar este tipo de desechos en la Antártica; y, posteriormente, en la «Convención de Moscú sobre Prohibición de Ensayos Nucleares» de 1963, la cual estableció la prohibición de realizar explosiones que contaminen más allá de sus fronteras (Uribe, 1989).

Mientras tanto, en 1957 y bajo el auspicio del Gobierno de Bélgica, se firmaba el primer convenio intergubernamental en materia de indemnizaciones y responsabilidades legales por derrames de hidrocarburos, provenientes de buques en alta mar («Convenio Internacional relacionado con la Limitación de la Responsabilidad Legal de los Armadores de Buques en Alta Mar», de 1957), el cual sentó las bases de la responsabilidad civil por la contaminación del mar por hidrocarburos y los sistemas que garantizarían la indemnización en el campo internacional.

Después de la creación de la OMI y mediante una serie de preparativos que comenzaron con la Conferencia de Copenhague de 1959, se celebró la «Conferencia Internacional de Londres» de 1962, la cual permitió enmendar el contenido del Convenio OILPOL/54, e incluir importantes aspectos en materias de definiciones, intercambio de información y procedimientos legales por contravenciones. Luego, con la firma del «Convenio Europeo sobre Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos» de 1967, entre Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suiza, se consolidó en esta región la preocupación de que «la preservación del medio ambiente exige el control de las fuentes de contaminación más allá del territorio nacional y del mar territorial».

En 1969, la OMI decidió enmendar el Convenio OILPOL/54 (OILPOL/54/69), perfeccionando las medidas que había establecido a las operaciones de los buques-tanque, a través de la introducción del sistema llamado «carga sobre residuos» e

³ <https://www.dipublico.org/10533/convencion-de-ginebra-sobre-la-plataforma-continental-de-29-de-abril-de-1958/>

incluyendo la prohibición absoluta para que las naves efectuaran descargas de hidrocarburos.

Un aporte importante de la enmienda de 1969 al Convenio OILPOL/54, lo constituyó la exigencia para que toda nave lleve a bordo un Libro Registro de Hidrocarburos. En el cual se deben anotar operaciones tales como la carga de lastre (lastrado), descarga de lastre (deslastrado), limpieza de estanques de combustibles, descarga de sentina (mezclas oleosas), carga de combustible (rancho de combustible) y carga de lubricantes, entre otras. A esta exigencia, se sumó la obligación que los Estados firmantes estipularan procedimientos de control y cumplimiento de las exigencias señaladas en este Convenio. El Convenio OILPOL /54/69 entró en vigor el 20 de diciembre de 1978, y unos 70 Estados fueron partes de él.

6.2.2 La determinación de la responsabilidad por la contaminación marina

El accidente del buque-tanque «Torrey Canyon», ocurrido el 18 de marzo de 1967 en el sudoeste de Inglaterra, evidenció la existencia de vacíos legales en los esquemas internacionales, en particular, en materias de responsabilidad civil e indemnización por daños producidos por la contaminación marina. Este hecho provocó una serie de reacciones en el seno del Comité Jurídico de la OMI, que culminaron con que, en 1969, se convocara en Bruselas, a la más importante conferencia internacional sobre esta materia, de la cual nacieron los siguientes acuerdos:

- El «Convenio internacional relativo a la intervención en Alta Mar en casos de accidente que causen una contaminación por hidrocarburos» (Intervention Convention 69), el cual permite que los Estados partes puedan adoptar acciones tendientes a prevenir, mitigar o eliminar todo peligro grave o inminente contra su litoral o intereses conexos, debido a la amenaza de contaminación de sus aguas marinas por la acción de hidrocarburos. Sin embargo, esta intervención solo puede ser ejercida cuando la acción contaminante haya sido originada por un accidente marítimo u otro acto que esté relacionado con este y de cuyos hechos puedan desprenderse consecuencias de gran magnitud.
- El «Convenio internacional sobre responsabilidad civil por daños causados por la contaminación de las aguas del mar por hidrocarburos» (Convenio CLC/69), que representó un cambio significativo para el tradicional sistema de responsabilidad vigente a la fecha y que se basaba en la necesidad de probar culpa o negligencia de un supuesto hecho de contaminación marina debido que, a través de él, se estableció un nuevo sistema de responsabilidad estricta y definida del propietario del buque.

Con la consagración de una responsabilidad objetiva o del riesgo creado, el Convenio CLC/69 permitió que quien sufriera el daño derivado de contaminación por hidrocarburos persistentes desde cualquier tipo de buque, no tuviera la obligación de probar la culpa, negligencia o dolo del agente (propietario

del buque), ya que solo basta establecer que exista un derrame o descarga accidental de este tipo de sustancias, en el territorio marítimo de algún Estado parte, para que se configure la responsabilidad civil. De esta manera, esta culpa fue reemplazada por la reparación efectiva y por ello se comenzó a hablar de una responsabilidad sin culpa o responsabilidad por riesgo creado (en vez de la responsabilidad subjetiva o basada en la prueba de dicha culpa).

Sin embargo, este carácter objetivo limitó el accionar del convenio, al circunscribir la responsabilidad civil solo a la acción de descarga de hidrocarburos persistentes (crudos, *full oil*, aceite diésel y aceites lubricantes, etc.), dejando fuera aquellos considerados como no persistentes (kerosene, gasolina y aceite diésel liviano, entre otros). Asimismo, estipuló su aplicabilidad solo a determinados tipos de buques, excluyendo a las naves de guerra, de pasajeros o que transporten carga seca o efectúen un viaje con lastre.

Asociado a la naturaleza de un sistema de responsabilidad objetiva, el Convenio CLC/69 incluyó una serie de

causales de exoneración de responsabilidad, basado en circunstancias que fueron consideradas fuera del alcance operacional del propietario de la nave que produjo la contaminación, entre las cuales se pueden mencionar:

- Consecuencias de un acto de guerra, hostilidad, insurrección o de un fenómeno natural de carácter excepcional, inevitable e irresistible.
- Provocado por una acción u omisión intencional de un tercero.
- Debido a una negligencia y/u otro acto lesivo de cualquier gobierno o autoridad responsable del mantenimiento de luces u otras ayudas a la navegación en el ejercicio de estas funciones (faros y balizas).
- El «Acuerdo voluntario de los armadores de buques tanque sobre responsabilidad por contaminación por hidrocarburos» (acuerdo TOVALOP/69), el cual fue concebido como una medida provisoria, hasta que fuera suscrita y entrara en vigor

Figura 6.6:

Toma de muestras de mar para la detección de contaminación por hidrocarburos persistentes.

(Foto: SHOA).



Figura 6.6



Figura 6.7

Figura 6.7:

Acciones de la autoridad marítima frente al derrame de hidrocarburos en el mar.

(Foto: Directemar).

un Tratado Internacional sobre Responsabilidad Civil. Desde el punto de vista operativo, el acuerdo TOVALOP/69 contempló un campo de aplicación más amplio que el CLC/69, e incluso cubre indemnizaciones para aquellos casos que exonera el CLC/69, como aquellos derrames de hidrocarburos procedentes de naves sin cargas. Además, posee la capacidad de ser modificado libremente a voluntad de cualquiera de sus miembros. Sin embargo, el hecho de que represente solo un acuerdo internacional entre particulares, impide que los Estados puedan imponer instrumentos legales destinados a obligar el cumplimiento de los compromisos legales establecidos en él.

Regionalmente, durante el año 1969, se firmó el «Acuerdo

de cooperación para combatir la contaminación del Mar del Norte por hidrocarburos» (acuerdo de Bond/69), en la ciudad de Bond (Francia), el cual entró en vigor el mismo año e incluyó los conceptos que se habían establecido en los Convenios CLC/69 e Intervention/69.

Con el transcurrir de los años, los dueños de las empresas navieras y aquellas compañías que transportaban petróleo en buques-tanque volvieron a discutir los alcances del acuerdo TOVALOP/69, lo cual propició para que en 1971 se firmara otro acuerdo o contrato voluntario de carácter interino entre ellos, denominado «Contract Regarding an Interim Supplement to Tanker Liability for Oil Pollution» o CRISTAL/71. El cual representó un fondo adicional al propuesto por el acuerdo TOVALOP/69.

Tal como se ha comentado, hasta los comienzos de la década de los setenta, la contaminación marina por otras sustancias distintas a los hidrocarburos, no había atraído la atención internacional, a pesar de que sus consecuencias sobre los ecosistemas marinos y litorales eran bastante conocidas e investigadas. Sin embargo, la lucha por la preservación del medio marino internacional, ya estaba inserta en las decisiones intergubernamentales desde hacía bastante tiempo y, con ello, la comunidad internacional había formado una conciencia de los efectos que provocaba el vertimiento al mar de las sustancias diferentes a los hidrocarburos.

Fue así que, en diciembre de 1970, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó la Declaración de Principios que Regulan los Fondos Marinos y Oceánicos y su Subsuelo fuera de los Límites de la Jurisdicción Nacional, en la que se nombró como «Patrimonio Común de la Humanidad» a los fondos marinos y oceánicos y sus subsuelos, ubicados fuera de las jurisdicciones nacionales, incluyendo en ella todos los recursos existentes. Y, obligó a los Estados miembros a proteger y conservar los recursos naturales, prevenir daños que se pudieran ocasionar sobre la flora y fauna marina, impedir la contaminación, impurificación, perturbación del equilibrio ecológico y otros riesgos que pudieran afectar estos ecosistemas marinos.

Dichos principios representaron una guía que aún es aplicada en el actual régimen internacional de dicha zona. Además, consagró el derecho de los Estados costeros a imponer medidas tendientes a prevenir, mitigar o eliminar cualquier tipo de peligro grave e inminentes que pudiera afectar a sus costas e

intereses conexos, derivados de la contaminación originada en zonas fuera de los límites jurisdiccionales o, también, de otros efectos peligrosos que pudieran generarse producto de actividades realizadas en ella.

De aquellos vacíos dejados por el «Convenio sobre Responsabilidad Civil» de 1969 (CLC/69) nació, en 1971, el «Convenio internacional sobre la constitución de un fondo internacional de indemnizaciones de daños causados por la contaminación de hidrocarburos», el cual creó a un organismo intergubernamental que recibió el mismo nombre (Fondo Internacional de Indemnizaciones de Daños Causados por la Contaminación de Hidrocarburos). Este organismo, creado en 1978, permitió garantizar una adecuada indemnización a las víctimas de perjuicios por contaminación del mar y los ambientes costeros que, en virtud del Convenio sobre Responsabilidad Civil de 1969 (CLC/69), no hubieran podido obtener el resarcimiento total o parcial de sus daños. Además, estableció la posibilidad de exonerar parcialmente de los gravámenes financieros adicionales impuestos por el citado CLC/69, a aquellos armadores cuyas naves den cumplimiento con las normas de seguridad y prevención de la contaminación especificada en ciertos convenios internacionales.

Posteriormente, en 1976, se suscribió el Protocolo correspondiente al Convenio internacional sobre la constitución de un fondo de indemnizaciones de daños causados por contaminación de hidrocarburos, de 1971, el cual permitió modificar las

cuantías de los daños señalados por el Convenio de 1971.

Ese mismo año, en Bruselas (Bélgica), se firmó el «Convenio internacional relativo a la responsabilidad civil en la esfera del transporte marítimo de materiales nucleares» y, con ello, se permitió reconocer que el transporte de este tipo de material era susceptible de poner en peligro la salud del mar y las zonas costeras, demostrando, a la vez, la resistencia que existía en la industria de seguros marítimos para aceptar las disposiciones de responsabilidad en esta área. Además, a través de este instrumento, se intentó resolver las dificultades de la aplicación simultánea, tanto a los operadores de las instalaciones nucleares de origen como a aquellos donde se transportaban estos productos, de los diversos convenios relativos a

la responsabilidad nacida de accidentes nucleares.

Asimismo, en 1975, en la ciudad de Ramsar (Irán) se desarrolló la «Convención relativa a los Humedales de importancia Internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas», referida como «Convención sobre los Humedales» o la «Convención Ramsar», la que es, quizás, el primer tratado moderno de carácter intergubernamental sobre conservación y uso racional de los recursos naturales. Una de las motivaciones originales para el establecimiento de este Convenio fue la preocupación que tomó auge a principios de la década de los sesenta acerca de la seria disminución de las poblaciones de aves acuáticas y sus hábitats. Sin perjuicio de ello, con el transcurrir de los años, dicha Convención ha amplia-



Figura 6.8:

Palafitos en Castro en la isla grande de Chiloé, Región de Los Lagos.

(Foto: Armada).

Figura 6.8

do su preocupación original a todos los aspectos referidos al uso racional y conservación de los humedales, considerando en su definición a los humedales marinos (costas rocosas y arrecifes de coral), humedales estuarinos (deltas, marismas de marea y pantanos de manglar), humedales lacustres, asociados a ríos y arroyos, y los palustres (en el que se incluyen las ciénagas y los pantanos). La Convención Ramsar entró en vigor en 1975 y en noviembre de 1996 contaba con 96 Partes Contratantes repartidas en el mundo (Davis et al., 1996).

6.2.3 El reconocimiento de la protección de la biodiversidad marina

En junio de 1972, el impacto de la deterioración del medio ambiente condujo a que las Naciones Unidas convocaran a su «Conferencia sobre el Medio Humano», que se celebró en Estocolmo (Suecia) entre el 5 y el 16 de junio del mismo año. En ella, por primera vez, todos los aspectos ambientales fueron analizados en extenso en una reunión internacional, lográndose adoptar una «Declaración del Medio Humano y su Plan de Acción Mundial» (Declaración de Estocolmo 1972). En su

principio, se consagra expresamente el derecho a un ambiente sano, al proclamar que:

El hombre tiene derecho fundamental a la libertad, la igualdad y el disfrute de condiciones de vida adecuadas en un medio ambiente de calidad tal que le permita llevar una vida digna y gozar de bienestar, y tiene la solemne obligación de proteger y mejorar el medio ambiente para las generaciones presentes y futuras (Principio 1º).⁴

Seis meses más tarde, la Asamblea General de la Naciones Unidas aprobaba las Resoluciones N° 2994 y N° 2997, las cuales resaltaron la importancia de la Convención de Estocolmo y remitió el Plan de Acción de la Administración de esta, al recién creado Consejo de Administración y la Secretaría del Medio Ambiente, el cual es la base del actual «Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente» (PNUMA).

Durante el mismo año, se firmó el «Convenio sobre prevención de la contaminación marina por vertimientos desde buques y aeronaves» (Oslo Dumping Convention, 1972), el cual impuso estrictas normas a las prácticas de vertimientos en el Atlántico



Figura 6.9

Figura 6.9:

En agosto de 1974 varó en el estrecho de Magallanes el supertanque Metula. El derrame de petróleo crudo que transportaba constituyó uno de los mayores siniestros que ha afectado dicha zona.

(Foto: SHOA).

⁴ Disponible en www.ordenjuridico.gob.mx/Tratlnt/Derechos%20Humanos/INST%2005.pdf

Figura 6.10:

El 15 de septiembre de 1975, el buque mercante Northern Breeze encalló en los farellones de Quintero (Región de Valparaíso) y derramó más de 20 toneladas de petróleo crudo causando una alta mortalidad de aves marinas, cuyo hábitat se vio seriamente contaminado.

(Foto: SHOA).



Figura 6.10

Noreste, el océano Ártico y el mar del Norte, y se constituyó en rigor en el primer instrumento internacional sobre vertimientos de diferentes sustancias, que influyó a la postre sobre todos los acuerdos.

A fines de 1972, la Conferencia de Estocolmo había conducido directamente al desarrollo de otra conferencia internacional, en la cual se logró adoptar uno de los convenios más importantes que actualmente se emplean para prevenir la contaminación marina por vertimiento de desechos: «Convenio sobre prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias» (London Convention 1972 o LC/72). Este tratado entró en vigor en 1975 y permitió extender lo establecido inicialmente por la Convención de Oslo a escala internacional; es decir, limitó toda evacuación deliberada en el mar de diversos tipos de desechos generados en tierra, separando en tres categorías dichos desechos.

Un año después de adoptada la Convención de Londres y bajo el auspicio de la Organización Marítima Internacional (OMI), se firmaron dos acuerdos de importancia mundial para el control de la contaminación marina: el «Protocolo relativo a la intervención en Alta Mar en casos de contaminación del mar por sustancias distintas de los hidrocarburos» y el «Convenio internacional para prevenir la contaminación del mar por buques» (Convenio MARPOL/73). Este representó la última y definitiva enmienda que sufrió el Convenio OILPOL/54 y el primer acuerdo que permitió reglamentar la operación de vertimiento asociado con la normal operación de los buques. Además de reforzar las reglamentaciones anteriores, el Convenio MARPOL 73 introdujo cinco anexos con medidas concretas para evitar la contaminación debido a hidrocarburos, por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel, a raíz de sustancias perjudiciales transportadas por bultos, por vertimiento de aguas sucias y por basuras generadas a bordo, respectivamente. El Convenio MARPOL 73 fue modificado posteriormente en 1978 (MARPOL 73/78) para mejorar las medidas tendientes a evitar la contaminación por hidrocarburos

y, además, permitió que los Estados contratantes pudieran diferir la implementación del Anexo II, el cual contiene requerimientos para el control de más de 250 sustancias diferentes transportadas a granel, hasta un plazo de tres años posteriores a la entrada en vigor del protocolo.

Para fines de 1973, se llevó a cabo una nueva Conferencia sobre el Derecho del Mar, denominada «UNCLOS III», con el propósito de concebir un renovado régimen legal para los recursos del lecho marino. Sin embargo, durante su desarrollo, la organización de la Conferencia decidió cambiar la proyección de su objetivo, lo que concluyó finalmente en la necesidad de efectuar una completa revisión del Derecho del Mar. Sin perjuicio de ello, el UNCLOS III representó mucho más que un debate sobre el derecho del mar; fue la instancia que permitió un cambio radical para establecer una equidad para todos los usos que se estaba dando al océano. Como resultado de ello, la actividad naviera, que hasta entonces era considerada como el principal factor de

explotación de este sistema, perdió su hegemonía y pasó a ser uno de los muchos usos del océano.

En 1974, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) dio inicio al Programa de Mares Regionales, que actualmente suscriben más de 120 Estados ribereños bajo instrumentos internacionales propios para cada región. Posteriormente, entre los años 1974 y 1978, este Programa logró la adopción de un importante número de medidas tendientes a prevenir la contaminación del mar del Norte, entre los que se destaca el «Convenio sobre la protección del medio ambiente entre Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia» (Convenio de Estocolmo, 1974), el cual fue ampliado posteriormente al área del mar Báltico a través del «Convenio de Helsinki», 1974.

En 1975, la CPPS realizó la «Encuesta Internacional sobre Contaminación Marina en el Pacífico Sudeste», la cual sentó las bases de la «Reunión internacional de trabajo sobre la contaminación marina

en el Pacífico Sudeste», que se efectuó posteriormente en 1978 en Santiago de Chile y en el que se definieron las bases técnicas y legales del actual Plan de Acción del Pacífico Sudeste.

Ya en el año 1976 y con la participación de casi todos los Estados ribereños del mar Mediterráneo, se adoptó el «Convenio para la protección del mar Mediterráneo contra la contaminación», el cual incluyó protocolos sobre vertimientos y medidas de emergencia en casos de contaminación por hidrocarburos y otras sustancias. Estos convenios regionales, administrados por el PNUMA, obligan en cierta manera a que todos los Estados ribereños incluyan en su legislación nacional acciones decisivas en materia de penalización para aquellos que contaminen el mar y una serie de disposiciones de prevención.

Tal como venía ocurriendo en otras regiones del mundo; en 1979, el PNUMA aprobó un proyecto sobre el «Desarrollo de un Plan de Acción del Pacífico Sudeste», el cual

fue incluido posteriormente en el Programa de Mares Regionales del Plan Global del PNUMA. Este proyecto permitió que, en noviembre de 1981, se celebrara en Lima (Perú) una Conferencia Plenipotenciaria de los Estados miembros de la CPPS, en el cual se incluyó a Panamá, adoptándose el anhelado Plan de Acción y sus tres anexos:

- «Convenio para la protección del medio marino y la zona costera del Pacífico Sudeste», el cual destaca la necesidad de proteger y conservar los ecosistemas marinos y costeros de esta región contra todo tipo de contaminación proveniente de diversas fuentes, incluyendo la erosión de zonas costeras, la descarga de sustancias tóxicas, perjudiciales y nocivas, y la contaminación derivada de la operación de buques.
- «Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate contra la contaminación del Pacífico Sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas

en casos de emergencias», modificado posteriormente en 1983, que desarrolla los mecanismos para la cooperación regional en casos de derrames, la descripción del plan nacional de contingencias y programas de entrenamiento para mantener la más alta eficiencia de los principios generales señalados en la convención que le dio origen a este acuerdo.

- Dispositivos institucionales y financieros para la ejecución del «Plan de acción en la región del Pacífico Sudeste».

Mientras tanto, en el seno de las Naciones Unidas, se llevaba a cabo una negociación con el propósito de adoptar la «Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar», la cual, al cabo de nueve años (1982), fue aprobada con votación favorable de la gran mayoría de los Estados miembros. La Convención sobre el Derecho del Mar, significa un desarrollo progresivo del derecho internacional al delimitar el mar en cinco espacios claramente definidos, reconociendo como zonas de jurisdicción nacional (Figura 6.11) el Mar Territorial de 12 millas náuticas, la Plataforma Continental y la Zona Económica Exclusiva de 200 millas náuticas. A estas se agregan el alta Mar y la Zona Internacional de los Fondos Marinos (Carrillo, 1992).

Comparada con las Convención efectuada en Ginebra, en 1958, la Convención sobre el Derecho del Mar de 1982, innova en el Derecho Internacional del Mar al proveer un marco jurídico comprehensivo para el fomento y explotación racional de los océanos y sus recursos (Beyerlin, 1995). Así, esta convención destina 13 artículos a la conservación y manejo de los recursos marinos, incluyendo la conservación de especies, protección de hábitats y manejo de recursos vivos. Además, impone la obligación a los Estados para que protejan y preserven el medio marino, al establecer el deber de no transferir los daños o peligros de un área a otra o transformar un tipo de contaminación en otra y prohibir que se apliquen tecnologías que permitan la introducción de especies extrañas al medio marino, las cuales se traduzcan en cambios significativos a la diversidad biológi-

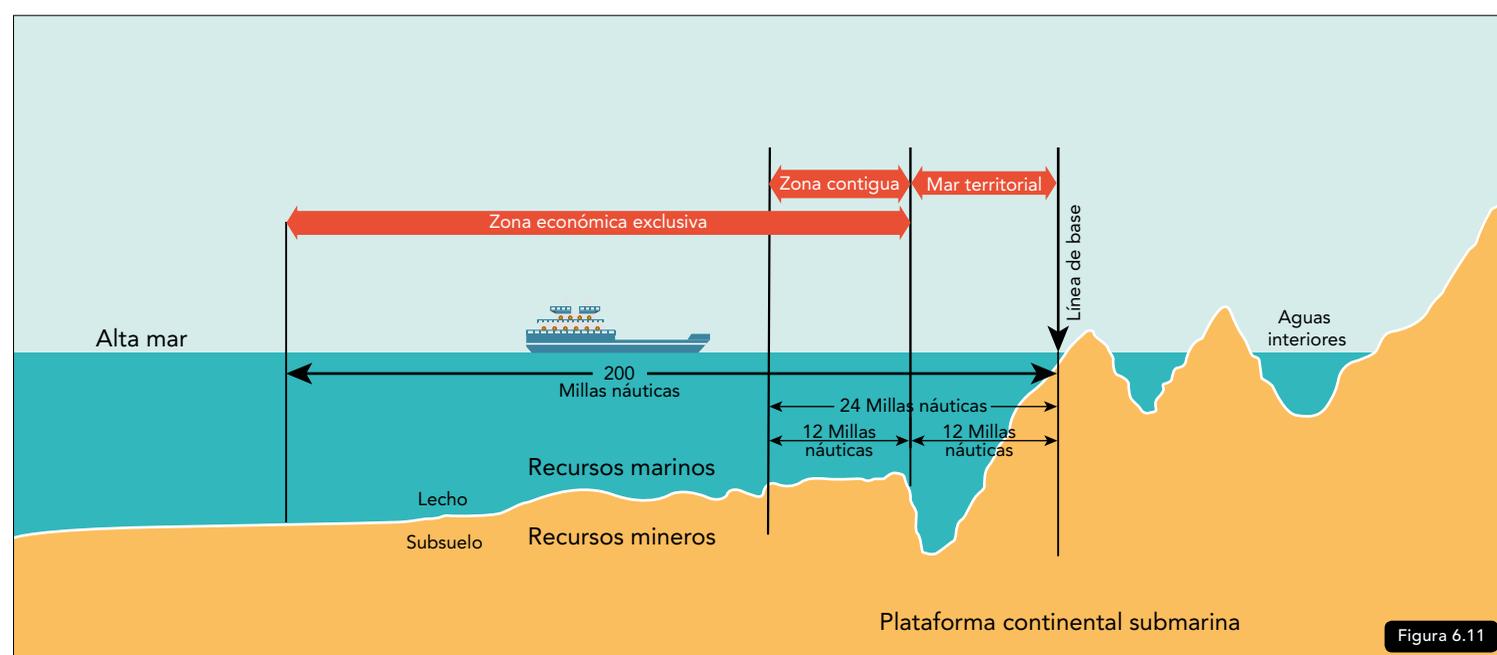


Figura 6.11:

La Convención sobre el Derecho del Mar significó un desarrollo progresivo del derecho internacional que delimitó los espacios marítimos de las naciones.

(Elaboración propia).



Figura 6.12

Figura 6.12:

Balsas jaula de uso en la acuicultura, cuyo uso intensivo, tiene un alto costo en los ecosistemas, lo que exige una fuerte regulación en materia de impacto medioambiental.

(Foto: P. Winckler).

Convenio de Basilea, 1989.



ca de estos. Además, se incluyen obligaciones respecto a la contaminación por fuentes terrestres, actividades en el lecho del mar bajo áreas sujetas a las jurisdicciones nacionales, por desarrollo de recursos en las profundidades del lecho marino, por vertimiento de embarcaciones, por contaminación de embarcaciones y por contaminación proveniente de la atmósfera o a través de ella.

Una de las consecuencias inmediatas de la Convención sobre los Derechos del Mar de 1982 fue la aprobación del «Protocolo para la protección del Pacífico Sudeste contra la contaminación proveniente de fuentes terrestres», firmado en Quito (Ecuador), el 22 de julio de 1983. Entre los temas tratados por este convenio se encuentran las fuentes de contaminación, las obligaciones generales, prácticas y procedimientos, cooperaciones entre las partes, los programas de vigilancia ambiental, el intercambio de información, la cooperación científica y técnica y las medidas de sanción que serán impuestas a los transgresores.

En 1989, los estados miembros de la CPPS suscribieron el «Protocolo para la Protección del Pacífico Sudeste contra la Contaminación Radiactiva», en Paipa (Colombia), el cual entró en vigencia en 1994. Este instrumento fue concebido a raíz de la creciente preocupación regional para prohibir los vertimientos y/o enterramiento de desechos radiactivos u otras sustancias en el mar y/o en el lecho marino. En este se establece la prohibición para verter este tipo de desechos y obliga a los Estados a adoptar medidas para que las actividades relacionadas con la radiactividad que se desarrollen bajo su jurisdicción, se realicen de manera tal que no causen perjuicios.

Además, en 1989, la comunidad internacional adoptó el «Convenio internacional para el control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación»⁵ (Convenio de Basilea, 1989). Este tratado, a juicio del PNUMA, representa el primer paso en la definición de medidas de alcance global para reducir y controlar de una forma estricta el movimiento de desechos peligrosos y para asegurar que su disposición se realice de una forma ambiental, incluyendo el medio marino (CPPS, 1992).⁶

Después de veinte años de la celebración de la Conferencia de Estocolmo (1972), las Naciones Unidas vuelve a realizar otra conferencia, ahora en Río de Janeiro (Brasil), con un objetivo diferente al de Estocolmo, orientado ahora al mejoramiento del ambiente humano. Así, en junio de 1992, se celebró la «Conferencia de las Naciones Unidas sobre

medio ambiente y desarrollo» (UNCED) o «Cumbre de la Tierra», en la que participaron representantes de 178 Estados. Esta Conferencia se destacó por la trascendencia de las materias ambientales y de desarrollo, lo cual permitió la suscripción de cinco documentos principales (Quarrie, 1992):

- la Declaración de Principios de Río;
- la Convención sobre Cambio Climático;
- la Convención sobre Biodiversidad;
- la «Agenda 21»; y
- un grupo de principios sobre bosques (Gabaldón, 1992).

En materia de prevención de la contaminación marina, la UNCED alcanzó una amplia

⁵ Disponible en www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-s.pdf (o escanee el código QR de la página).

⁶ Véase Informe de la Reunión de Expertos legales para analizar el borrador del Protocolo sobre el Control en el Pacífico Sudeste de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Quito (Ecuador).

convergencia de criterios respecto a la identificación de los problemas que aquejan a los océanos y áreas costeras, así como de los principios que guiarán en el futuro una acción conjunta de los Estados e instituciones para enfrentar dichos desafíos. Son muchos los estudiosos que señalan que la UNCED dio un impulso político adicional a la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, acelerando el proceso que determinó su entrada en vigor el 16 de noviembre de 1994 (Artigas, 1994).

Por otro lado, la UNCED enfatiza la interdependencia existente entre las variables terrestres y marinas, destacando la necesidad de lidiar con las fuentes terrestres de contaminación marina dentro de un contexto de manejo integrado de las costas. En este contexto, esta Convención dio paso al desarrollo de distintos foros de discusión sobre asuntos costeros y oceánicos, tales como las problemáticas del manejo integrado de costas, islas y sus fuentes terrestres de contaminación, y el fortalecimiento de arreglos regionales para enfatizar la adecuada administración de las zonas costeras y oceánicas.

Tanto la Declaración de Principios de Río como los demás acuerdos surgidos de la UNCED, no constituyen en sí documentos vinculantes. Sin embargo, los Estados manifiestan la intención de formar parte del consenso internacional que se mueve en la dirección de una sociedad más sostenible (Cicin-Sain & Knecht, 1993).

Burke (1993) fue enfático al señalar que en la «Agenda 21» se destacan dos lineamientos que son muy importantes para tener en cuenta en relación con el Plan de Acción para el

Pacífico Sudeste (CPPS) y sus diversos convenios:

- La búsqueda de aproximaciones integrales a los aspectos del medio marino y su prevención contra la contaminación.
- La promoción de acciones precautorias para el manejo marítimo y costero.

Al comparar los acuerdos del CPPS con los principios enumerados en la Declaración de Río, se puede observar que las principales acciones de los Estados, organizaciones y otras entidades señaladas en dichos convenios, tratan sobre relaciones de cooperación e integración. Así, en la Declaración de Río se hace hincapié en la integración y la cooperación que debe existir a todo nivel entre los Estados para conservar, proteger y restaurar la integridad del medio ambiente (Keating, 1993). Además, en la «Agenda 21» se enfatiza la importancia de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, de 1982, que provee la

base normativa sostenible del medio marino y pesquero y sus recursos vivos.

Respecto a las recomendaciones de la UNCED para los Estados insulares en desarrollo, en abril de 1974, la Asamblea General de las ONU acordó efectuar una conferencia global sobre desarrollo sostenible de los Estados-isla, que sucedieron a dos conferencias regionales efectuadas durante 1973, en Vanuatu, para los océanos Índico y Pacífico, y en Trinidad y Tobago, para el océano Atlántico, mar Caribe y el mar Mediterráneo.

Otras de las consecuencias directas de la UNCED fue la «Convención para la protección del medio marino en el Atlántico Noreste», París (1992), el cual amplió el espectro de aplicaciones que habían sido establecidas en la Convención para la Prevención de la Contaminación Marina por Fuentes Terrestres o Convenio de París de 1974, adoptando el principio precautorio, el principio de «quien contamina paga» y los conceptos de las mejores técnicas a disposiciones y mejores prácticas ambientales, incluyendo la tecnología limpia (Hilf, 1995).

En la misma época, en Helsinki, se desarrollaba la «Convención para la protección del medio marino en el mar Báltico», la cual incorpora los «principios de precaución», el de mejor práctica ambiental y mejor tecnología disponible, y el de «quien contamina paga». Además, incluye una serie de obligaciones, de las cuales se destaca el deber de los Estados contratantes para efectuar los mejores esfuerzos para asegurar que la Implementación de la Convención no produzca contaminación transfronteriza en áreas fuera del mar Báltico.

Dos años más tarde, en 1994, los dignatarios del continente se dieron cita en la «Cumbre de las Américas», realizada en Miami, Florida, con el objeto de reconocer la necesidad de alcanzar un progreso real en el fortalecimiento de la democracia, fomentar el desarrollo, lograr la integración económica y



Figura 6.13:

Balneario Municipal de Antofagasta (Región de Antofagasta). Playa artificial ubicada al sur de la ciudad que ofrece múltiples servicios turísticos.

el libre comercio, mejorar la vida de los pueblos y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras a través del Plan de acción de la Cumbre de las Américas (Centro Peruano de Estudios Internacionales, 1994).

6.3 DEFINICIONES RELEVANTES PARA LA GESTIÓN DE LA COSTA

La «zona costera» es aquella franja de ancho variable, que resulta del contacto interactivo entre la naturaleza y las actividades humanas que se desarrollan en ámbitos que comparten la existencia o la influencia del mar. Su conocimiento, gestión y normativa son imprescindibles para establecer su mejor uso, logrando así mejorar la calidad de vida de las respectivas poblaciones.

El extraordinario auge que ha tenido el uso de la zona costera ha captado el interés por la formulación de modelos orientados a su ordenación y gestión. De hecho, gran parte del sistema de las Naciones Unidas (FAO⁷, UNESCO⁸ y UNEP⁹), el Banco Mundial y otras instituciones de la importancia de la OECD¹⁰ y la Unión Europea, dedican notables esfuerzos a su investigación y divulgación. Del mismo modo, organizaciones no gubernamentales (ONG) contribuyen de forma permanente con esta temática. Solo por citar algunas, la IUCN¹¹, la EUCC¹², la CEN¹³ se destacan por sus programas e iniciativas vinculadas a las áreas costeras. En consecuencia, se cuenta con el aval de instituciones gubernamentales y ONG, que proporcionan un marco conceptual, métodos, técnicas, instrumentos y estrategias para la protección de la zona costera. Algunas particularidades de la zona costera se enumeran a continuación:

- Desde el punto de vista físico-natural, la zona costera es un área que alberga medios de distinta naturaleza (litosfera, hidrosfera salada y atmósfera), que interactúan en forma muy dinámica y compleja generando cambios biológicos, geomorfológicos y químicos en diferentes escalas temporales y espaciales. Ello es particularmente cierto en áreas marinas de alta productividad y gran diversidad biológica, las cuales son muy vulnerables.
- Desde el punto de vista de su gestión y ordenamiento, la zona costera es un espacio escaso y por lo mismo muy deseado debido, entre otros, a la existencia de recursos naturales, clima benigno, fertilidad en los suelos, convergencia de usos y actividades, concentración de los asentamientos humanos e infraestructuras y valor paisajístico.

- Desde el punto de vista de los aspectos jurídicos y administrativos, es preciso destacar el carácter público de la mayoría de las zonas costeras del mundo, como asimismo la convergencia de numerosos organismos públicos que actúan en ella, tanto en lo referido a las escalas nacionales, regionales como sectoriales. De allí la diversidad en las fórmulas para su administración y gestión.

A partir de estas consideraciones, se han definido tres subsistemas bien diferenciados que coexisten en la zona costera: el físico-natural, el de su gestión y ordenamiento y el jurídico-administrativo. Aun cuando cada uno presenta posibilidades analíticas en diferentes niveles, es importante mantener una visión de conjunto. De esta forma, cada segmento o unidad litoral presenta un estado muy definido y diferenciado, que deviene de la conjugación de las opciones que los tres subsistemas permiten. Así, el físico-natural puede oscilar entre diversos grados de conservación/degradación; el de gestión y ordenamiento entre unos niveles concretos del desarrollo; y el jurídico-administrativo entre su adecuación/inadecuación a las necesidades del sistema litoral en su conjunto.

Una primera complejidad que aparece al momento de estudiar la zona costera es,

precisamente, su definición y el establecimiento de sus límites. La bibliografía especializada presenta numerosas definiciones y áreas geográficas de cobertura. La mayoría de los autores coinciden, a pesar de esta complejidad, en el hecho de que el litoral es una zona de contacto y de transición entre la hidrosfera salada, la litosfera y la atmósfera en lo que a los fenómenos físico-naturales y actividades humanas se refiere. Aparece entonces de forma nítida el reconocimiento de un principio básico: la interacción entre medios diferenciados que albergan fenómenos naturales y humanos de distinto alcance.

Algunas de las definiciones de zona costera más reconocidas son:

- *Aquella parte de la tierra afectada por su proximidad al mar y aquella parte del océano afectada por su proximidad a la tierra* (U. S. Commission on Marine Science Engineering and Resources, 1969).
- *Franja de mar aledaña a la línea de costa y una zona terrestre -no exactamente definida- hasta la cual las acciones e interacciones de ambos medios, el terrestre y el marino, son notables* (Álvarez & Álvarez, 1984).

⁷ Food and Agricultural Organization.

⁸ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

⁹ United Nations Environment Programme.

¹⁰ Organization for Economic Cooperation and Development.

¹¹ International Union for Conservation of Nature and Natural Resources.

¹² European Union for Coastal Conservation.

¹³ Coastwatch-European Network.

- *Interfase entre la tierra y el mar que se extiende hacia la parte continental y marítima dependiendo de los objetivos y necesidades* (Clark, 1996).
- *Área geográficamente delimitada. Su carácter distintivo proviene a partir de la suma de las interacciones de los ambientes costeros correspondientes a los sistemas estructurales natural y antrópico* (Awosika & Boromtharanat, 1993).
- *Banda relativamente estrecha de agua y tierra a lo largo del borde marino, que queda definida por unidades naturales y actividades humanas* (Pappas et al., 1994).
- *Área de intensa actividad de intercambio dentro y entre procesos físicos, biológicos, sociales, culturales y económicos* (UNEP, 1995).
- *Zona de interfase dinámica que implica el encuentro de la atmósfera, la tierra y el mar* (Viles & Spencer, 1995).

Algo similar ocurre en lo que a la terminología técnica se refiere. Así, por ejemplo, la expresión «costa», predomina sobre la expresión «litoral», lo que evidencia la influencia que ha ejercido y ejerce el aparato científico de Estados Unidos y Canadá, así como los textos editados en inglés por organismos internacionales. En español, la sinonimia entre costa y litoral, explica que ambos términos se utilicen indistintamente. Cabe, sin embargo, resaltar un matiz interesante que se observa en ciertos estudios. Mientras que «costa» se vincula con preferencia a una franja relativamente estrecha situada a un lado y otro del contacto tierra mar, el término «li-

toral» se asocia a superficies más amplias, sobre todo en la dirección continental. En cualquier caso, se puede afirmar, de forma genérica, que «zona costera», «litoral» y «área litoral» pretenden significar lo mismo en el contexto de la planificación y gestión de ella.

Otras definiciones también importantes para la búsqueda de consensos entre especialistas y el público en general son las siguientes:

- **Aguas oceánicas** (*ocean waters*): Es la parte marina más amplia y suele estar relacionada con las 200 millas náuticas de la Zona Económica Exclusiva. También son utilizadas referencias batimétricas como la isóbata 200 m. Se asocia, cuando es posible, a la parte oceánica de la plataforma continental. Es considerada un área de vital importancia para ciertos recursos naturales.
- **Aguas litorales** (*coastal waters*): Es una zona de enorme trascendencia para determinados ecosistemas marinos y fases vegetativas de algunas especies de valor comercial o crucial en la cadena trófica. También para el control de la calidad de las aguas. Aunque países como la República Popular China definen su anchura en 3 millas náuticas desde la línea de las más bajas mareas, es usual identificarla con las 12 millas náuticas del Mar Territorial y las Aguas Interiores.
- **Espacio intermareal** (*Intertidal area*): Es el área de acción de las mareas y comprende las zonas de manglares, marismas y estuarios, donde existen ecosistemas o biotopos de vi-

tal importancia. Su rango depende de la marea, del viento y de la topografía de la zona, entre otros, y varía entre unos pocos metros y algunos kilómetros. Una característica singular que le suele acompañar es su naturaleza pública.

- **Borde litoral** (*coastline*): Es el contacto entre la tierra y el mar. Tiene sobre todo un valor georreferencial, pues a partir de su definición se determinan diferentes zonas. La línea de pleamar viva equinoccial se utiliza con frecuencia para su delimitación.
- **Frente litoral** (*ocean front* o *shorelands area*): Es la parte terrestre entre el borde litoral y las tierras litorales que varía usualmente, entre 20 y 200 m. Siendo una franja relativamente estrecha, aparece delimitada por la distancia desde la cual se puede ver el mar, la existencia de una vía de comunicación o de determinados ecosistemas o una distancia arbitraria que frecuentemente aparece en las legislaciones nacionales o textos constitucionales. Juega un papel muy destacado para el acceso y propiedad públicos, para la seguridad respecto de amenazas naturales y para la protección de hábitats sensibles. Incluso, cuando no tiene carácter público, las limitaciones de la propiedad privada y sus servidumbres también confieren a dicha zona condiciones muy especiales.



Figura 6.14:

Lancha de pesca industrial entrando en la bahía de San Vicente, Región del Biobío. Estas lanchas pescan entre el Mar Territorial y la Zona Económica Exclusiva.

(Foto: P. Winckler).

- **Tierras litorales** (*coastal uplands*): Constituyen, desde un punto de vista cualitativo, la parte terrestre litoral por excelencia. Coincide con la que podría denominarse **llanura costera**, cuyos límites pueden definirse a partir de sistemas y estructuras falladas, rupturas de pendiente, topografía accidentada, llanuras de piedemonte o de sierras litorales. En varios países la cifra de los 5 km es muy utilizada. Buena parte de las necesidades humanas se satisfacen en dicha zona.
- **Tierras continentales** (*inland*): Se trata de una superficie relativamente amplia en la que se desarrollan actividades que pueden incidir en el litoral. Así, es posible observar como en

algunos planes y programas de gestión litoral son incorporadas, entre ellas, las cuencas hidrográficas y las tierras de agricultura intensiva. La razón estriba en la transferencia de costes ambientales entre dicha área y la propiamente litoral. Los vertidos urbanos o industriales sin depurar, la contaminación difusa ocasionada por la utilización de fertilizantes, plaguicidas o fungicidas, son claros ejemplos.

6.4 LA GESTIÓN DE LA COSTA

El objetivo de la gestión y el ordenamiento de la zona costera consisten en administrar el conjunto de los recursos terrestres y acuáticos de un territorio. Sus límites deben extenderse tan lejos hacia alta mar y al interior de las tierras como lo exija la realización de los objetivos de dicha gestión.

El manejo o administración de las zonas costeras constituye una disciplina relativamente nueva. Por consiguiente, no ha habido acuerdo general acerca de uso apropiado o significado de términos y frases comunes. Algunos términos se usan indistintamente en la literatura para describir la actividad de manejo de una región, área, uso o recurso costero. Esto incluye conceptos tales como manejo costero, manejo de recursos costeros, manejo de área costera, manejo y planeamiento de área costera, manejo de zonas costeras, manejo integrado de zona costera, manejo integrado de recursos costeros y manejo de recursos de zonas costeras. Para Sorensen *et al.* (1992), en general, estos términos no están cuidadosamente definidos o diferenciados el uno del otro, ni están bien definidos los «recursos» o «ambientes que se maneja o administran».

6.4.1 Particularidades del territorio costero

Para llevar a cabo una gestión exitosa, se debe tener en consideración un conjunto de aspectos que normalmente se presentan al momento de emprenderla.

- Con muy pocas excepciones, las estructuras político-administrativas y los órganos establecidos para asegurar el funcionamiento de la sociedad, no están coordinados como sería deseable. En algunos casos son incluso incompatibles en materia de gestión costera. Conviene pues, como primera tarea, integrar a los diversos órganos administrativos de gestión de manera que se administren en conjunto todos los recursos.
- Un segundo aspecto tiene que ver con materias de orden jurídico. Sucede a menudo que las competencias de las autoridades locales se detienen en el espacio de playa descubierta con la marea baja. Para intervenir más allá de

este límite, resulta necesario integrar, dentro del proceso de gestión, a la autoridad regional o nacional competente, dotándola además de herramientas legales y de una infraestructura técnica. Lo mismo ocurre con otras actividades que se desarrollan en aguas nacionales o territoriales, ya se trate del tráfico marítimo, perforaciones en el mar, explotación minera o explotación energética.

- Existen ámbitos que se rigen por acuerdos internacionales, cuya aplicación y control requieren de la intervención de las autoridades nacionales. La prevención de la contaminación marina, la inmersión de desechos radioactivos en el mar y las convenciones relativas a los diferentes mares, constituyen ejemplos de ello. Aunque estas actividades estén situadas lejos de la costa, pueden producir efectos incluso en las aguas costeras y en el litoral. Por este motivo, resulta importante tenerlas en cuenta en las iniciativas de gestión de la zona costera.

Figura 6.15:

Terminal marítimo de Interacid Chile, dedicado al comercio de ácido sulfúrico, Mejillones, Región de Antofagasta.

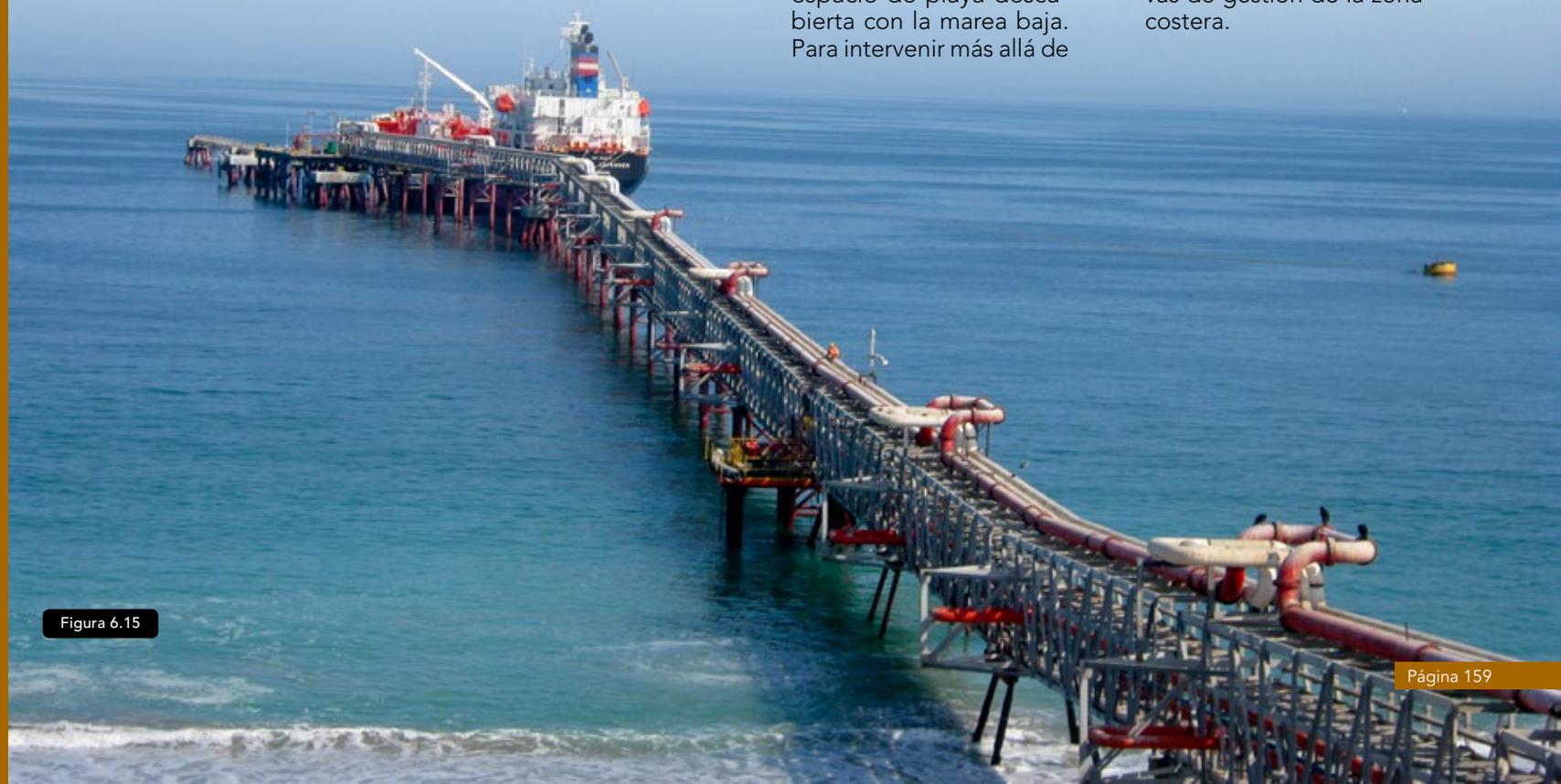


Figura 6.15

• Por último, están aquellos aspectos relacionados con la influencia de las actividades terrestres en los recursos del mar. Existe sin duda alguna un nexo entre la gestión costera y los recursos biológicos en toda la franja marítima expuesta a la contaminación. Por consiguiente, la gestión de los recursos biológicos en las aguas costeras debe formar parte integrante de la gestión de zonas costeras.

primera, es que si se quiere asegurar una gestión eficaz que cubra la mayor parte de las relaciones economía-medio ambiente, importa definir los límites de la zona costera de manera muy amplia; y la segunda, es que resulta indispensable asegurar un buen nivel de integración entre las diferentes unidades administrativas locales y regionales o nacionales que deban intervenir en la gestión. En consecuencia, la intervención de los diferentes niveles sectoriales de la Administración Pública hace necesario un reparto de las responsabilidades y, por lo

tanto, de la concurrencia administrativa en relación con ciertas competencias. Algunos apuntes de los conceptos administración y gestión de espacios litorales (Gubbay, 1992) hacen énfasis en tales cuestiones:

- [...] el interés de la Gestión del Espacio Litoral suele girar en torno a la resolución de los conflictos generados entre los diferentes usos y la asignación de los más apropiados a los recursos costeros (Sorensen et al., 1984).
- [...] el primer objetivo de la gestión del espacio litoral es proporcionar una serie de directrices a los responsables de las tomas de decisiones en el sentido de que la demanda de las numerosas actividades encuentre acomodo sin perturbarse unas a otras, al tiempo que se respetan el equilibrio del sistema natural y el uso y disfrute de los miembros de la comunidad (Report of House Representatives Standing Committee on the Management of the Coastal Zone in Australia).

De lo anterior, se hacen resaltar dos conclusiones: la

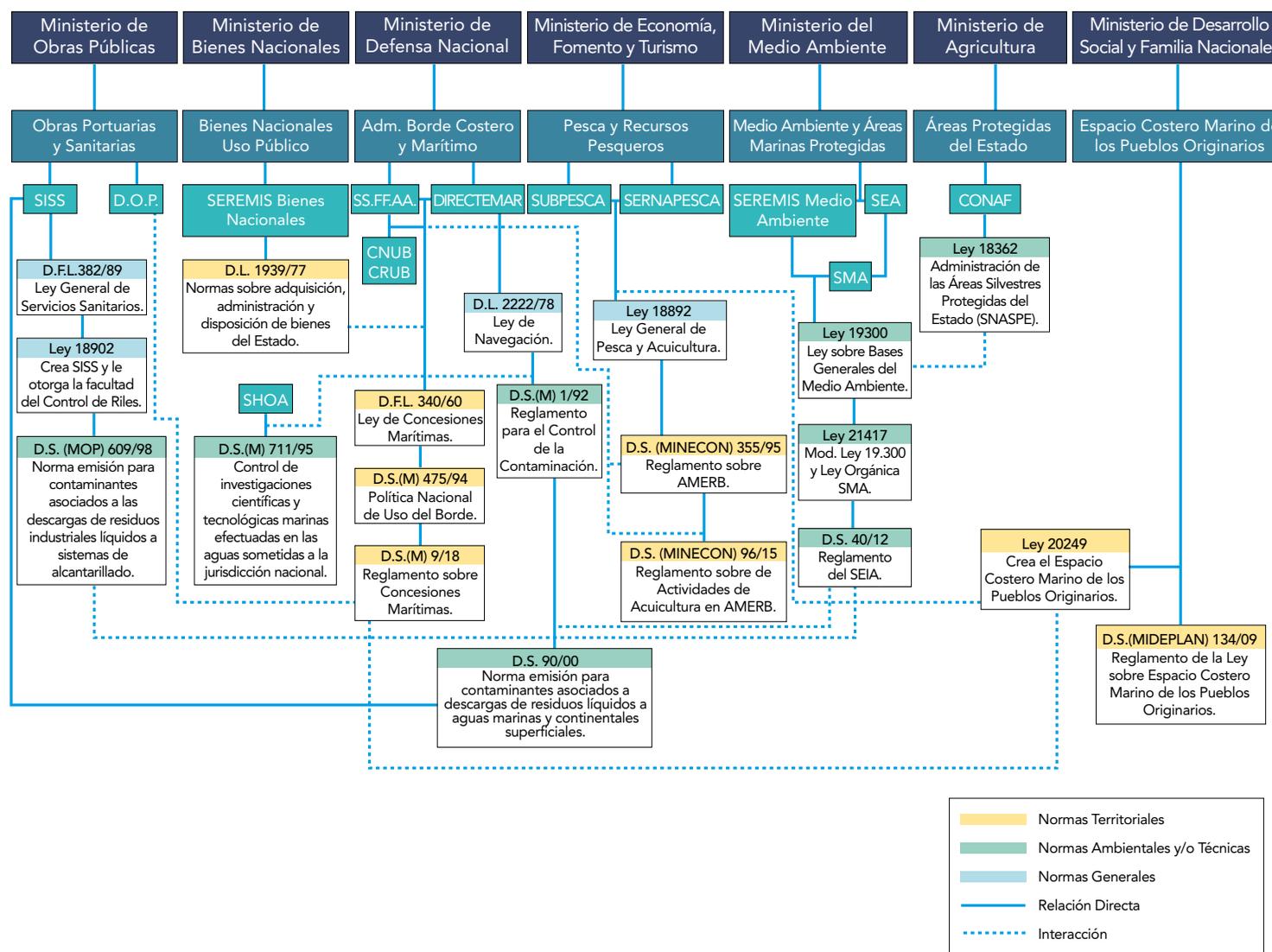


Figura 6.16

Figura 6.16:

Estructura del marco legal que regula el uso del borde costero en Chile, de acuerdo con el «Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile 2012» (Adaptación de M. Herrera).

- [...] *La gestión del espacio litoral coordina las acciones de varios sectores económicos para asegurar que el avance de uno de ellos no repercuta negativamente en otros* (Al Gain et al., 1987).
- [...] *proceso dinámico en el cual es desplegada y desarrollada la coordinación estratégica para la distribución de los recursos medioambientales, socioculturales e institucionales que permitan alcanzar la conservación y el uso múltiple sostenido de la zona costera* (Coastal Area Management & Planning Network, 1989).

La noción de «Gestión del Espacio Litoral», se complementa con lo expresado por Hoozemans (1992), cuando afirma que esta tiene como tareas «su planificación, diseño y construcción de infraestructuras, regulación, control, funcionamiento y mantenimiento». Esta amplia visión se entiende mejor al considerar que la primera meta de la gestión es conseguir los bienes y servicios necesarios de acuerdo con los objetivos marcados.

Objetivos tan genéricos conducen a una considerable gama de posibilidades en la administración y gestión de la zona costera. Estas pueden traducirse en una normativa que proporcione el marco legal, un aparato político que asigne los recursos y especifique los objetivos y un cuerpo técnico de la Administración Pública, cuya función sea ejecutar las políticas diseñadas. En resumen, puede afirmarse que la naturaleza compleja de la zona costera, desde los puntos de vista físico y humano, explica su complejidad administrativa y, en consecuencia, las dificultades para su gestión.

Los inconvenientes surgidos para la gestión y manejo de un espacio tan singular provienen, en parte, por el elevado número de administraciones sectoriales (pesca, defensa, medio ambiente, obras públicas, minería, urbanismo, industria, agricultura) y de todas las escalas administrativas competentes, sean estas locales, metropolitana, provincial, regional, nacional y supranacional. Los distintos enfoques, perspectivas, intereses y posibilidades de cada administración hacen realmente difícil a) coordinar la aplicación de normativas; b) definir objetivos, criterios, estrategias y medidas de intervención; y c) asignar medios técnicos y recursos financieros. Tales razones explican el hecho de que el espacio litoral, a pesar de haber sido tratado intensamente en foros internacionales, sigue degradándose y permanezca a la fecha en muchos países, sin un sistema que permita su correcta gestión.

Conforme fue considerado en el «Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile 2012» (Universidad de Chile, 2013), el marco legal que regula el uso del borde costero en Chile (Figura 6.16) está constituido por una serie de Ministerios que participan, en mayor o menor medida, en la construcción de la estructura jurídica y política de esta área medioambiental, entre los cuales se pueden considerar, entre otros, al Ministerio de Bienes Nacionales, al Ministerio de Obras Públicas, al Ministerio de Defensa Nacional, al Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, al Ministerio de Agricultura y al Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

¹⁴ Véase página 53.

6.4.2 Estrategias de manejo y gestión de la zona costera

Para Sorensen et al. (1992)¹⁴, casi todas las naciones en desarrollo han utilizado dos o más de las siguientes estrategias de manejo costero:

- Planeamiento económico nacional;
- Planeamiento sectorial amplio de usos o recursos costeros;
- Mares regionales;
- Planeamiento y regulación del uso del suelo a nivel nacional o provincial (estatal);
- Planes de área especial o planes regionales;
- Exclusión o restricción litoral;
- Protección de área crítica;
- Evaluación de impactos ambientales de propuesta de desarrollo costero;
- Lineamientos, guías y regulaciones obligatorias;

- Programas de adquisición;
- Atlas costero y bancos de datos.

Para los antes citados autores, las referidas estrategias no son mutuamente excluyentes, sino que se apoyan unas con otras, tal como Francia, país que utiliza el planeamiento nacional o estatal de uso de suelo junto con campañas de adquisición de áreas naturales como estrategias principales.

Para Sorensen et al. (1992), las antes indicadas estrategias deben ser complementadas por el planeamiento económico nacional, la participación en el Programa de Mares Regionales (Chile se encuentra inserto en el Programa de Mares Regionales que es llevado a cabo por CPPS), el planeamiento de áreas especiales, la exclusión litoral y la protección de áreas críticas. Estados Unidos de América, por ejemplo, utiliza casi todas las estrategias en varios grados, con la excepción del planeamiento económico nacional y el programa de mares regionales.



Figura 6.17

Figura 6.17:

Parte del área portuaria de la ciudad de Puerto Montt, Región de Los Lagos.

(Foto:H. Horta/Armada).



Figura 6.18

Figura 6.18:

Puerto de Tomé, Región del Biobío.

(Foto: Nello Rolleri).

De esta forma, el planeamiento económico nacional implica metas prescriptivas para cada sector de la economía, afectando la asignación de trabajo, la inversión de capital y el uso de suelo. Su objetivo principal es establecer un plan de largo plazo (por lo general a 5 años), con el propósito de establecer metas de producción en los sectores más importantes de la economía. De esta forma, la producción, como rasgo central de un plan económico, es usada para especificar el tamaño de la fuerza laboral, el tipo y la calidad de tierra necesaria para una

eventual industria particular, y la cantidad de capital de inversión necesario para implementar el plan.

De acuerdo con Sorensen *et al.* (1992), estos planes económicos nacionales crean certidumbre sobre el frente costero y los terrenos adyacentes, necesarios para el desarrollo dentro de un período definido de tiempo, lo que evita propuestas y demandas aleatorias sobre los recursos costeros, y fomentan además un mayor tiempo para alcanzar la integración con otros sectores y evitar impactos negativos.

6.4.3 Actores relevantes en la gestión de la zona costera

Tal como fue expuesto en los capítulos anteriores, muchos son los actores sectoriales que participan en el manejo y gestión de la zona costera. Algunos de ellos que juegan un rol fundamental en la gestión de la zona costera en Chile, se presentan a continuación.

6.4.3.1 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

El Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) fueron creados a partir de la Ley N°20417, publicada en el Diario Oficial de fecha 20 de enero de 2010, la cual modificó la Ley N°19300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

Además, esta normativa permitió incorporar en el inciso segundo del artículo 4° de la **Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente** (Ley N°19300), el deber de la institucionalidad de propender a la conservación de los ecosistemas naturales, incluyendo el marino, al establecer:

Los órganos del Estado, en el ejercicio de sus competencias ambientales y en la aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, deberán propender por la adecuada conservación, desarrollo y fortalecimiento de la identidad, idiomas, instituciones y tradiciones sociales y culturales de los pueblos, comunidades y personas indígenas, de conformidad con lo señalado en la ley y en los convenios internacionales ratificados por Chile y que se encuentren vigentes.¹⁵

6.4.3.2 SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (SEIA)

En cuanto a la evaluación de los proyectos o actividades en el borde costero que son sometidos al SEIA, la Ley N°19300 (modificada por la ley N°20417) solicita la opinión del Gobierno Regional, el Municipio respectivo y la **Autoridad Marítima** competente, sobre la compatibilidad territorial del proyecto.

Las competencias del Ministerio del Medio Ambiente se pueden dividir en tres ámbitos:

- Políticas y regulaciones ambientales generales, incluyendo aquellas vinculadas a cuentas ambientales, biodiversidad y áreas protegidas.
- Políticas y regulaciones para la sustentabilidad.
- Políticas y regulaciones en materia de riesgo y medio ambiente.

El Ministerio aborda materias centrales para la gestión ambiental como la regulación ambiental, la información y economía ambiental, la educación, participación y gestión local, los recursos naturales y biodiversidad el cambio climático, el cumplimiento de convenios internacionales y, finalmente, la planificación y gestión.

6.4.3.3 SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE (SMA)

A la SMA le corresponde de forma exclusiva ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) de los proyectos que se han aprobado ambientalmente, incluyendo aquellos que operan en el medio marino o en su borde costero. Además, le compete ejecutar, organizar y coordinar las medidas de los Planes de Prevención y/o de Descontaminación Ambiental, del contenido de las Normas de Calidad Ambiental y Normas de Emisión,

¹⁵ Disponible en <http://bcn.cl/2asa8> (o escanee código QR de esta página).

¹⁶ Disponible en <http://bcn.cl/1v0ev>

y de los Planes de Manejo, cuando corresponda, y de todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la Ley. Para desarrollar estas labores, la SMA puede utilizar tres modalidades de fiscalización:

- a través de una modalidad directa, es decir, mediante sus propios funcionarios;
- a través de las facultades que poseen los distintos órganos de la administración del Estado con competencia ambiental;
- mediante la acción de terceros, que están debidamente acreditados y autorizados por la SMA, tales como, entidades técnicas de fiscalización y entidades técnicas de certificación.

Asimismo, la SMA posee la rectoría técnica de la actividad de fiscalización ambiental, por cuanto debe establecer los criterios de fiscalización que

deberán adoptar todos los organismos sectoriales que cumplan funciones de fiscalización ambiental para efectos de llevar a cabo sus labores.

6.4.3.4 DIRECCIÓN GENERAL DEL TERRITORIO MARÍTIMO Y DE MARINA MERCANTE (DIRECTEMAR)

Otro organismo que posee competencias en la gestión de los ecosistemas marinos, incluyendo el borde costero, es la Directemar. Este organismo, perteneciente a la Armada de Chile, encuentra sus fundamentos jurídicos para proteger los ecosistemas marinos y el borde costero a partir de lo dispuesto en la **Ley de Navegación**¹⁶, que señala:

Artículo 5°. - La autoridad marítima corresponderá a la Dirección y, como tal, aplicará y fiscalizará el cumplimiento de esta ley, de los convenios internacionales y de las normas legales o reglamentarias relacionadas con sus funcio-

Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, 1994.



Figura 6.19:

La Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático (Dirinmar) está orientada a resguardar los ambientes y ecosistemas acuáticos, conformados por el mar, los ríos y los lagos de jurisdicción nacional, protegiéndolos de los efectos de la contaminación y de otros impactos ambientales, fiscalizando el cumplimiento de las normas legales de carácter nacional e internacional. (Foto: Directemar).



Figura 6.19

nes, con la preservación de la ecología en el mar y con la navegación en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional. La Dirección tendrá la representación oficial del Estado en asuntos o reuniones internacionales relativos a las materias profesionales y técnicas de que trata esta ley.

Esta misma Ley establece un principio general en materia de contaminación acuática, cuya disposición ya era norma exigida desde el año 1941, conforme se consagró en el siguiente artículo, hoy derogado, del Reglamento General de Orden, Seguridad y Disciplina de las Naves y Litoral de la República, y cuyo texto señalaba:

Se prohíbe arrojar lastre, escombros, basuras, derramar petróleo y sus derivados o residuos de los mismos, aguas de relaves de minerales u otras materias orgánicas nocivas o peligrosas de cualquier especie, en los puertos o en las aguas jurisdiccionales de la República, sin el consentimiento previo de la Autoridad Marítima respectiva, quien designará en todo caso, el lugar o forma como se procederá a efectuar alguna de dichas operaciones [Artículo 185].

A dicha disposición, la Ley de Navegación, en cambio, quiso replantear de una manera más profunda el enfoque tradicional, agregándole el carácter absoluto a la citada prohibición. Además, permitió especificar las actividades que serían sometidas a ella y los cuerpos de agua sujetos a su tutela, señalando:

Se prohíbe absolutamente arrojar lastre, escombros, basuras, derramar petróleo o sus derivados o residuos, aguas

de relaves de minerales u otras materias nocivas o peligrosas, de cualquier especie, que ocasionen daños o perjuicios en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, en puertos, ríos y lagos [Artículo 142°].

Cabe hacer presente, que este mismo principio general es reproducido fidedignamente en el «Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática»¹⁷. Además, como cuerpo normativo de la Ley de Navegación, el Reglamento incorpora otras prohibiciones que se inspiraron en aquel dispuesto en el artículo 142°, como: i) la prohibición de transporte marítimo de sustancias nocivas o peligrosas que puedan ocasionar daños o perjuicios a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional; ii) la prohibición de efectuar descargas de aguas sucias a toda nave o artefacto naval; y iii) la prohibición de intro-

ducir o descargar directa o indirectamente a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional de cualquier materia, energía o sustancias nocivas o peligrosas desde fuentes terrestres. Este último representa uno de los permisos ambientales sectoriales que otorga la Autoridad Marítima a las actividades o proyectos sometidos al SEIA.

6.4.3.5 AUTORIDAD MARÍTIMA

Orgánicamente, la Autoridad Marítima ejerce sus competencias ambientales a través de sus órganos operativos, los cuales son las Gobernaciones Marítimas y las Capitanías de Puerto, las cuales se encuentran distribuidas desde Arica hasta el Territorio Chileno Antártico.

Desde el punto de vista operativo, la Autoridad Marítima y Medio Ambiente Acuático Nacional supervisa las actividades que se encuentran bajo su jurisdicción, mediante su Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático (Dirinmar), en donde se administran y se evalúan aquellos proyectos u operaciones que pueden afectar la calidad del medio acuático, incluyendo sus ecosistemas marinos y dulceacuícolas continentales, así como también, las concesiones marítimas otorgadas por el Ministerio de Defensa Nacional y las autorizaciones transitorias de ocupación del borde costero. Directemar posee jurisdicción sobre aquellos ríos y lagos que son navegables por embarcaciones que posean sobre 100 toneladas de registro grueso.



Figura 6.20

Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática, 1992.



Figura 6.20:

Jaulas balsa para cultivo de salmones.

(Foto: Armada).

¹⁷ Disponible en <http://bcn.cl/1vdzj> (o escanee código QR de esta página).

6.4.3.6 SUBSECRETARÍA DE PESCA Y ACUICULTURA (SUBPESCA)

La Subpesca posee amplias atribuciones jurídicas destinadas a regular y administrar la actividad pesquera y de acuicultura nacional, a través de políticas, normas y medidas de administración, de acuerdo con un enfoque precautorio y ecosistémico que promueva la conservación y sustentabilidad de los recursos hidrobiológicos para el desarrollo productivo nacional. La Subpesca, que se encuentra bajo la supervisión del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, posee una amplia función reguladora de las actividades que inciden en los recursos hidrobiológicos, incluyendo, entre otras, las actividades pesqueras extractivas y de transformación, la acuicultura y cualquier proyecto que pueda afectar el ecosistema en donde se encuentren las especies y recursos hidrobiológicos.

6.4.3.7 SERVICIO NACIONAL DE PESCA Y ACUICULTURA (SERNAPESCA)

Sernapesca es la institución dependiente del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, cuya misión es fiscalizar el cumplimiento de las normas pesqueras y de acuicultura, proveer servicios para facilitar su correcta ejecución y realizar una gestión sanitaria eficaz, con el fin de contribuir a la sustentabilidad del sector y a la protección de los recursos hidrobiológicos y su medio ambiente. De esta forma, Sernapesca es el órgano fiscalizador de las normas pesqueras y de protección de los recursos hidrobiológicos. Sernapesca y Subpesca fueron creadas por D.L. N°2442, del 29 de diciembre de 1978, la cual modificó radicalmente la institucionalidad pública pesquera que existía hasta dicha fecha.

Posteriormente, como respuesta a las modificaciones de la Ley General de Pesca y Acuicultura, Sernapesca debió reestructurar su organización, con el objeto de hacer frente a los nuevos desafíos ambientales y las exigencias de un comercio internacional dinámico y globalizado. Actualmente, contribuye a la sustentabilidad del sector y a la protección de los recursos hidrobiológicos y su medio ambiente, a través de una fiscalización integral y gestión sanitaria que influye en el comportamiento sectorial promoviendo el cumplimiento de las normas. De esta forma, Sernapesca fiscaliza la pesca extractiva (artesanal e industrial), la pesca recreativa, la acuicultura y el comercio exterior de recursos hidrobiológicos; asimismo, efectúa difusión de las normas pesqueras y de acuicultura, de la vigilancia epidemiológica de manera oficial y de la vigilancia ambiental cuando se vean afectados los recursos hidrobiológicos; y apoya a la Subpesca en la gestión normativa.

6.4.3.8 SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SISS)

La SISS es otro organismo de la administración del Estado que tiene competencias en la gestión ambiental del borde costero y de los ecosistemas marinos. Esta institución, la cual es

funcionalmente descentralizada, con personalidad jurídica y patrimonio propio, está sujeta a la supervigilancia del Presidente de la República, a través del Ministerio de Obras Públicas. Sus funciones sustantivas, se enfocan al control de las empresas concesionarias sanitarias y, por consiguiente, en la gestión de los Residuos Industriales Líquidos (RILes).

La SISS posee competencias para proponer normas técnicas relativas al diseño, construcción y explotación de las descargas de los residuos industriales líquidos y velar por el cumplimiento por parte de los entes fiscalizadores. Asimismo, vela por el cumplimiento de disposiciones legales y reglamentarias, normas técnicas, instrucciones, órdenes y resoluciones que dicte relativas a la prestación de servicios sanitarios y descargas de los referidos residuos líquidos, entre otros, a los cuerpos de agua marinos.

Entre los cuerpos normativos, por cuyo cumplimiento a la SISS se le encomienda velar, destaca especialmente la Ley N°3133 de 1916, sobre Neutralización de los residuos provenientes de establecimientos industriales y sus reglamentos. Al respecto, es jurídicamente correcto afirmar que la citada Ley N° 3133, constituye el cuerpo normativo más antiguo en Chile (Herrera, 2002), que regula este tipo de materia y que se mantuvo en ejercicio durante casi un siglo (hasta 1982), en cuyo artículo 1° dispone:

Los establecimientos industriales, sean mineros, metalúrgicos, fabriles o de cualquiera otra especie, no podrán vaciar en los acueductos, cauces artificiales o naturales, que conduzcan aguas o en vertientes,

*lagos, lagunas o depósitos, los residuos líquidos de su funcionamiento, que contengan sustancias nocivas a la bebida o al riego, sin previa neutralización o depuración de tales residuos por medio de un sistema adecuado.*¹⁸

6.5 ASPECTOS DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL

El ordenamiento de la zona costera debe considerar criterios coincidentes con las necesidades y objetivos de cualquier espacio, como por ejemplo compatibilizar los distintos intereses sociales y económicos de la población costera en relación con disponibilidades de los recursos y la conservación del espacio natural. Los criterios a tener en cuenta en todo proceso de planificación, se centran fundamentalmente en el concepto de «compatibilidad». En efecto, los conflictos surgidos nacen:

- de la falta de espacio terrestre y marítimo para determinar dos o más usos o actividades;
- de los intereses entre los propios habitantes del litoral o entre los de estos y los de otras regiones;
- de los intereses de pocos individuos y de un colectivo mayor; y
- de la atención puesta para hacer compatible naturaleza y posibilidades de desarrollo económico.

Estos criterios constituyen los puntos de partida de una batería de objetivos, entre los que se consideran como fun-

¹⁸ Disponible en <http://bcn.cl/1vnnv>

damentales: la conservación de ciertos espacios naturales, el fomento del desarrollo económico sostenido de la población, la localización adecuada de los distintos usos y actividades, la delimitación y protección del espacio público litoral y la coordinación funcional y de administración de los diferentes usos y actividades.

Lo anterior, no tienen por qué producirse de forma aislada, lo cual aparece recogido por diversos autores que tratan sobre los objetivos que deben primar en la ordenación de la zona costera o en el diseño del aparato normativo correspondiente. De hecho, la «Carta Europea del Litoral» del año 1981, establece una serie de objetivos en función de una estrategia global que pretende armonizar las exigencias del desarrollo y los imperativos de la protección a través

de la ordenación. Sus recomendaciones plantean entre otros aspectos:

- Desarrollar una economía litoral competitiva y selectiva.
- Proteger y desarrollar las peculiaridades de cada zona litoral.
- Organizar el espacio litoral.
- Administrar el espacio litoral.
- Prevenir riesgos naturales.
- Controlar el turismo.
- Informar ampliamente a los usuarios.
- Desarrollar la investigación científica.

- Armonizar el derecho.
- Desarrollar la cooperación internacional.

Desde el punto de vista normativo nacional y conforme fue señalado en el «Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile 2012» (Universidad de Chile, 2013) varias son las normas que regulan el uso del borde costero, algunas de larga data como el DFL N° 340, «Ley sobre Concesiones Marinas», promulgado en abril de 1960. Sin embargo, este tema junto con el desarrollo acelerado del país en las últimas décadas, se ha transformado en algo complejo, tanto en sus aspectos políticos como legales. Por eso en los últimos años ha sido necesario hacer varios esfuerzos para producir un ordenamiento de los procedimientos y facilitar la participación ciudadana.

Como resultado de este esfuerzo se ha generado una «Política Nacional de Uso del Borde Costero del Litoral de la República» (PNUBC), promulgada por Decreto Supremo (M) N°475, del 14 de diciembre de 1994. Esta política, mantiene una serie de principios que hacen considerar la actividad en torno al borde costero como Política de Estado, Nacional, Multidisciplinaria y Sistémica.

Asimismo, el mismo «Informe País 2012» afirma que las principales normas legales que regulan el uso del borde costero son los siguientes:

- El Decreto Supremo (D.S.) N°609, de 24 de enero de 1979, del Ministerio de Tierras y Colonización, el cual fija las normas para establecer los deslindes de los bienes nacionales de uso público que constituyen los cauces de ríos, lagos y esteros.



Figura 6.21

Figura 6.21:

Puerto de Guayacán, donde la Compañía de Aceros del Pacífico CAP exporta hierro. En el primer plano la caleta de Guayacán, donde subsisten pescadores y buzos mariscadores. Esta imagen es un ejemplo de usos antagonistas en la costa.

(Foto: P. Winckler).

- El D.S. N°660 del 14 de junio de 1988, del Ministerio de Defensa Nacional, el cual sustituye Reglamento sobre Concesiones Marítimas, fijado por el D.S. (M) N°223 de 1968.
 - La Ley N°18362, publicada en el Diario Oficial de fecha 27 de diciembre de 1984, la cual creó el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado.
 - La Ley N°18892, Ley General de Pesca y Acuicultura.
 - El D.S.(M) N°475 DE 1994, el cual establece la Política Nacional de uso del borde costero del litoral de la República y crea la Comisión Nacional respectiva.
 - La Orden Ministerial N°2, del Ministerio de Defensa Nacional, del 15 de enero de 1998, la cual instruye sobre prohibición de ingreso y tránsito de vehículos en toda la costa del litoral de la República, sus playas, terrenos de playa, en ríos y lagos y demás bienes nacionales de competencia del indicado Ministerio.
 - Los D.S. N°11 y N°12, ambos del Ministerio de Defensa Nacional, del 15 de diciembre de 1998, los cuales fijan las nóminas oficiales de ríos y lagos navegables por buques de más de cien toneladas de registro grueso.
 - La Ley N°9931, publicada en el Diario Oficial de fecha 18 de marzo de 2004, la cual establece beneficios a concesionarios y ocupantes del Borde Costero de la Isla Robinson Crusoe de la comuna de Juan Fernández.
 - El D.S. N°240, del Ministerio de Defensa Nacional, publicado en el Diario Oficial de fecha 24 de octubre de 1998, el cual fija la Nómina Oficial de Caletas de Pescadores Artesanales, cuyo texto fue modificado por el D.S. N°337 de 2005, del mismo Ministerio.
 - La Ley N°20062, publicado en el Diario Oficial de fecha 29 de octubre de 2005, la cual regulariza la situación de los ocupantes irregulares del borde costero de los sectores que indica, e introduce modificaciones al Decreto Ley N°1939 de 1977.
 - La Ley N°20249, publicado en el Diario Oficial de fecha 18 de febrero de 2008, el cual crea el Espacio Costero Marino de los Pueblos Originarios.
- No obstante lo expuesto precedentemente, el listado antes señalado no consideró los siguientes alcances normativos:
- Que, el D.S. N°660, del 14 de junio de 1988, del Ministerio de Defensa Nacional, fue sustituido por el D.S. N°2, del 3 de enero de 2005, modificado luego por el D.S. N°213, del 12 de julio de 2006, y actualmente rige el Reglamento que fue promulgado por el D.S. N°9, del 17 de marzo del 2018, todos provenientes del Ministerio de Defensa Nacional.
 - Que, la Ley N°18362, la cual creó el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, fue modificada por la Ley N°20417, que modificó a su vez la Ley N°19300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, estableciendo que «La administración y supervisión del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado corresponderá al Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas».
 - Que, la misma Ley N°20417, también modificó la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA), en términos que le transfirió al Ministerio del Medio Ambiente la facultad de declarar los Parques y Reservas Marinos, el cual originalmente estaba bajo competencia del Ministerio de Economía, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.
 - Tampoco el referido «Informe País 2012» consideró a la Resolución Exenta N°311, del 8 de octubre de 1999, del Ministerio de Educación, el cual Declara Monumento Histórico, toda traza de existencia humana que se encuentre en el fondo de ríos y lagos y en los fondos marinos que existen bajo las aguas interiores y mar territorial de la República de Chile, por más de cincuenta años.

Existen además otros instrumentos jurídicos que participan en la gestión ambiental del borde costero, tales como:

- La «Constitución Política de la República», que asegura a todas las personas



Figura 6.22

Figura 6.22:

Caleta Estanquilla, Región de Los Ríos. La obra de abrigo protege a los botes del intenso oleaje en esta localidad.

(Foto: P. Winckler).

el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación; disponiendo para ello, como deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. Asimismo, faculta a la ley para establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente.

- La «Ley N°19300, sobre Base Generales del Medio Ambiente», modificada por la Ley N°20417, la que estableció las regulaciones básicas en dos de los principales elementos de la gestión ambiental: los instrumentos de la política ambiental nacional y el modelo de nuestra actual institucionalidad ambiental. De esta forma, determinó que los instrumentos de política regulados por esta Ley, fundamentalmente, son:
 - el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental;
 - las normas de calidad ambiental;
 - las normas de emisión;
 - las materias que dicen relación con planes de prevención y de descontaminación.

En lo concerniente al modelo de institucionalidad, la ley define al funcionamiento del Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente.

La ley, además, modificó una serie de otras normas legales como la «Ley General de Pesca y Acuicultura», la Ley N°17288 sobre Monumentos Nacionales, el Decreto Ley N° 1939 sobre Adquisición, Administración y Disposición de Bienes del Estado, la Ley N°18695 Orgánica Constitucional de Municipalidades, el Decreto con Fuerza de Ley N°294, que establecía las funciones y estructura del Ministerio de Agricultura, en la siguiente oración «la conservación, protección y acrecentamiento de los recursos naturales renovables» por «la protección de los recursos naturales renovables del ámbito silvo-agropecuario, sin perjuicio de las atribuciones del Ministerio del Medio Ambiente», entre otros.

- En asociación a esta Ley se encuentra el «Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental», publicado en el Diario Oficial de fecha 12 de agosto de 2013, el cual obliga a los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, listados en su artículo 3°, a ingresar al referido SEIA, con el objeto de que analice su eventual impacto al medio ambiente.
- La «Ley de Navegación», promulgada por el Decreto Ley N°2222, en cuyo artículo 5° consagró las facultades ambientales y de protección de la ecología del mar de la Directemar, al expresar:

La autoridad marítima corresponderá a la Dirección y, como tal, aplicará y fiscalizará el cumplimiento de esta ley, de los convenios internacionales y de las normas legales o reglamentarias relacionadas con sus funciones, con la preservación de la ecología en el mar y con la navegación en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional.
- El Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática, promulgado con fecha 6 de enero de 1992, establece las condiciones para que las fuentes que se instalen en el borde costero, actúen sin ocasionar contaminación de las aguas.



Figura 6.23

Figura 6.23:

Bahía Cumberland, Archipiélago de Juan de Fernández, Región de Valparaíso. Debido al tsunami del 27 de febrero de 2010, aproximadamente 160 casas fueron arrasadas.

(Foto: P. Winckler).

Asociados al «Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática», se encuentran las siguientes Directivas y Circulares de la Directemar, que regulan las materias de gestión ambiental en el medio ambiente marino:

- La Circular DGTM A-53/004 del 3 de diciembre 2012, que modificó los procedimientos y requerimientos necesarios para determinar el ancho de la Zona de Protección Litoral (ZPL) para aquellos proyectos que consideran descargar residuos industriales líquidos a cuerpos de agua marinos mediante emisarios submarinos.
- La Circular DGTM A-51/002 del 24 de enero de 2012, el cual modificó los procedimientos y recomendaciones a seguir para la adopción de medidas preventivas objeto reducir al mínimo los riesgos de introducción de organismos acuáticos perjudiciales y agentes patógenos por los buques que ingresan a los puertos nacionales.
- La Circular DGTM A-52/002 del 09 de marzo de 2007, el cual establece procedimientos para dar cumplimiento a normas de prevención de la contaminación por hidrocarburos y otras sustancias nocivas desde buques que operen en la zona antártica, conforme con el Convenio MARPOL 73/78.
- La Circular DGTM A-51/004, del 13 de diciembre de 2007, que dispuso las exigencias técnicas ambientales de las prescripciones operativas para la aprobación de sistemas de tratamiento de aguas sucias en buques y artefactos navales, que lo requieran de conformidad con lo dispuesto en Título II, Capítulo 5°, del Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática.
- La Circular DGTM A-53/002, del 27 de enero de 2007, que establece el procedimiento para la confección y presentación de Planes de Emergencia para combatir la contaminación ante derrames de hidrocarburos y material mínimo de respuesta, para naves que enarbolan el pabellón chileno.
- La Circular DGTM A-53/003, del 27 de enero de 2007, que establece el procedimiento para la confección y presentación de Planes de Contingencia de respuesta, contra la contaminación de las aguas por hidrocarburos u otras sustancias nocivas líquidas contaminantes o, que sean susceptibles de contaminar, material mínimo de respuesta y lineamientos para empresas dedicadas a las tareas de contención, recuperación, limpieza y disposición final de los residuos recuperados.
- La Circular DGTM A-51/004, del 24 de septiembre de 2003, que dispone de los procedimientos a seguir por las Gobernaciones Marítimas y Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático, para el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la Ley, respecto de la tramitación de los informes de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) o Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) al interior de la Autoridad Marítima, sin y con SEIA electrónico.
- Las Directrices para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima, publicadas por la Directemar, mediante la Dirinmar, en el mes de noviembre de 2015.

Figura 6.24:

Le corresponde a Directemar fiscalizar las actividades que se desarrollan en el ámbito marítimo de jurisdicción nacional, cautelando el cumplimiento de las leyes y acuerdos internacionales.

(Foto: SHOA).



Figura 6.24



Figura 6.25

Figura 6.25:

Muelle Vergara, en Viña del Mar, Región de Valparaíso.

(Foto: P. Winckler).

Cabe mencionar que el «Reglamento sobre Concesiones Marítimas», cuya modificación entró en vigencia el 1° de septiembre de 2015, establece nuevas definiciones a aquellos términos de usos cotidianos en el ámbito costero.¹⁹ El cuerpo normativo ha permitido además vincular el proceso administrativo sectorial de otorgamiento o modificación del uso territorial del área costera con el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, establecido en el ya individualizado Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA). El otorgamiento del uso territorial se efectúa mediante permisos o autorizaciones de carácter transitorios, otorgados por la Directemar, o mediante concesiones marítimas, mayores o menores, otorgadas por el Ministerio de Defensa Nacional, a través de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas.

En definitiva, para algunos investigadores (Andrade *et al.*, 2008), el borde costero, tal como está concebido en la legislación chilena, tiene una extensión muy reducida, sujeta a regulación específica, lo que no permite abarcar de una manera adecuada la planificación de lo que se debería considerar una zona costera. Para estos estudiosos, su adecuada delimitación debiera incorporar criterios ambientales y funcionales y no solo administrativos, lo cual permitiría determinar para cada tramo del litoral, la extensión más adecuada para un manejo más satisfactorio.

De esta forma, la institucionalidad para el uso del borde costero, no obedece a una política que permita su regulación permanente e integral, ya que por ahora parece obedecer más a la finalidad, no despreciable pero restringida, de realizar una gestión eficiente y sustentable de un ámbito territorialmente reducido, conforme con los criterios recomendados, pero no obligatorios para los agentes involucrados. Este enfoque restringido de planificación costera, se adapta a la regulación sectorial del uso de recursos del litoral, pero no es suficiente a la escala necesaria para el ordenamiento territorial de la zona costera, puesto que la regulación existente debe considerar en su planificación del borde costero, adaptaciones a los requerimientos ambientales y de conservación de los ecosistemas marinos.

¹⁹ Tales como atracadero, chaza, dársena, muelle mecanizado, muelle semimecanizado, puerto, terminal o recinto portuario, rampa, rampa de conectividad, rejera, rompeolas, entre otras.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

AL GAIN, A., J. CLARK, & T. CHIFFINGS (1987). A coastal management program for the Saudi Arabian Red Sea coast. *In Coastal Zone '87* (pp. 1673-1681). ASCE.

ÁLVAREZ, J. A. & S. M. ÁLVAREZ (1984). *Conceptos básicos de manejo costero*. Instituto de Publicaciones Navales, Buenos Aires.

AMAYA, O. D. (2001). *Lecturas sobre Derecho del Medio Ambiente*. Tomo II. *Colombia. 2001. Lecturas Sobre Derecho del Medio Ambiente Tomo II*, Universidad Externado de Colombia.

ANDRADE, B., F. ARENAS & R. GUIJÓN (2008). Revisión crítica del marco institucional y legal chileno de ordenamiento territorial: el caso de la zona costera. *Revista de Geografía Norte Grande*, (41), 23-48.

ARTIGAS, C. (1994). *El Desarrollo Sustentable de las Zonas Costeras y Marinas: de la Parte XII de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar al Capítulo 17 del Programa 21*, en la II Reunión Internacional de Expertos Legales sobre América Latina y la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. Comisión Permanente del Pacífico Sur: Lima.

AWOSIKA, L., S. BOROMTHARANAT *et al.* (1993) Management Arrangements for the Development and Implementation of Coastal Zone Management Programmes. *World Coast Conference*, Noordwijk, Proceedings 1:107-180.

BEYERLIN, U. (1995). New developments in the protection of the marine environment: Potential effects of the Rio process. *Heidelberg Journal of International Law*, editado por Verlag W. Kohlhammer.

BURKE, W.T. (1993). UNCED and the Oceans, *Marine Policy*. Vol. 17 N° 6.

- CARRILLO, J. (1992). *Curso de Derecho Internacional Público. Introducción a su Estructura, Dinámica y Funciones*. Ed. Tecnos: Madrid.
- CENTRO PERUANO DE ESTUDIOS INTERNACIONALES (1994). El Sistema Internacional en sus Textos. Tomo III. Lima. *Plan de Acción de la Cumbre de las Américas*. Análisis Internacional 8: 126-143.
- CICIN-SAIN, B., & R. W. KNECHT (1993). Implications of the Earth Summit and Coastal Governance. *Ocean Development and International Law*, Vol. 24, N° 4.
- CLARK, J. R. (1996): *Coastal Zone Management Handbook*. Lewis Publishers, London.
- COMISIÓN PERMANENTE DEL PACÍFICO SUR - CPPS (1992). Informe de la Reunión de Expertos legales para analizar el Borrador del Protocolo sobre el Control en el pacífico Sudeste de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos peligrosos y su Eliminación. Quito, Ecuador, 26-28 octubre de 1992.
- DAVIS, T.J., D. BLASCO & M. CARBONELL (1996). *Manual de la Convención de RAMSAR*. Edit. Por la Oficina de la Convención de RAMSAR. Ministerios de Medio Ambiente, España.
- FERRERO, E. (1987). *Evolución del Derecho del Mar. Panorama sobre el Derecho del Mar. Marina de Guerra del Perú*. Lima.
- GABALDÓN, A. (1992). *Perspectivas de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Desarrollo*. El Perú, el Medio Ambiente y el Desarrollo. Editado por Eduardo Ferrero Costa. Centro Peruano de Estudios Internacionales: Lima.
- GUBBAY, S. (1992) Marine protected areas. *Mar. Cons.*, 3 : 6-8.
- HERRERA, M. (2002) El Problema de los Residuos Líquidos Urbanos en Chile: Aspectos Jurídicos y Científico-Técnicos que Influyen en su Solución y Control. En Libro de *Resumen de las VI Jornadas de Derecho del Medio Ambiente*. Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia.
- HILF, J. (1995). The Convention for the Protection of Marine Environment of the North East Atlantic - New Approaches to an Old Problem? *Heidelberg Journal of International Law*. Editado por Verlag. W. Kohlhammer.
- HOOZEMANS, F. M. (1992). Introduction to the coastal system. *Delf Netherlands*, 12: 76-189.
- KEATING, M. (1993). *The Earth Summit's Agenda for Change a Plain Language Version of Agenda 21 and the other Rio Agreements*. Center for Our Common Future: New York.
- MINISTERIO DE BIENES NACIONALES DE CHILE (1997). *Las playas para todos los chilenos. Manual para la fijación de los accesos*. Santiago de Chile: Ministerio de Bienes Nacionales de Chile.
- PAPPAS, E.; POST, J., & C. LUNDIN (1994) *Coastal Zone Management and Environmental Assessment*. E.A. Sourcebook Update.
- QUARRIE, J. (Ed). (1992). *Earth Summit 1992. The United Nations Conference on Environment and Development, Río de Janeiro 1992*. The Regency Press Corporation: London.
- SORENSEN, J. C., S.T. MC CREARY & A. BRANDANI (1992). *Costas: arreglos institucionales para manejar ambientes y recursos costeros*. United State Agency for International development. International Coastal Resources Center. University of Rhode Island: 185 pp.
- SORENSEN, O., M. B COULTER-MACKIE, S. PUCHALSKI, & S. DALES (1984). *In vivo and in vitro models of demyelinating disease*. IX. Progression of JHM virus infection in the central nervous system of the rat during overt and asymptomatic phases, *Virology* 137:347-357.
- SORENSEN, R. N. (1978). *Basic Coastal Engineering*. New York, Wiley and Sons. 227 pp.
- UNEP (1995) *Guidelines for Integrated Management of Coastal and Marine Areas. With Special Reference to the Mediterranean Basin*. UNEP, Regional.
- UNITED STATES. COMMISSION ON MARINE SCIENCE, ENGINEERING, AND RESOURCES (1969). Panel reports of the Commission on Marine Science, Engineering and Resources. Washington: U.S. G.P.O.
- UNIVERSIDAD DE CHILE (2013). *Informe País: Estado del medio ambiente en Chile 2012*. Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/123564>
- UNIVERSIDAD DE CHILE (2016). *Informe País: Estado del medio ambiente en Chile. Comparación 1999-2015*. Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168049>
- URIBE, C. (1989). *Regulación jurídica de la Protección del Medio Ambiente Marino contra la Contaminación*. Lima.
- VALENZUELA, A. (1974). *Ecología y Educación* (reflexiones sobre la necesidad de inspirar las labores educacionales en la perspectiva ecológica del Informe Fauré de la UNESCO).
- VALENZUELA, R. (1976). *Contaminación Marina y Derecho Nacional*. Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- VILES, H. & T. SPENCER (1995). *Coastal Problems, Geomorphology, Ecology and Society at the Coast*. E. Arnold, Londres: 350 pp.



Vista aérea de la Región de
Los Lagos.

(Foto: H. Horta/Armada).

PALABRAS FINALES

Desde la perspectiva de un investigador en ciencias del mar, con especial dedicación a las zonas litorales, costeras y a las actividades de pesca artesanal, no puedo sino que agradecer a mis amigos y colegas Esteban Morales, Patricio Winckler y Mario Herrera por la realización de este importante libro.

El libro es una ventana abierta, acogedora, atractiva y educativa para interiorizarse, aprender y maravillarse sobre las costas de nuestro multifacético país marítimo.

Ciertamente, la obra se presta para reforzar y afinar el concepto, ya desarrollado en otro espacio, de que «Chile es Mar». El litoral, la zona costera y el mar abierto están dinámicamente entrelazados. En Chile nos faltaba un libro como este, en que con tanto conocimiento disciplinario e interdisciplinario, elegancia, excelsas ilustraciones y fotografías se relevaban, con profundidad y al mismo tiempo con amenidad, las policromáticas costas de Chile. Ello, con diversas perspectivas, en que resaltan la geográfica y geológica, la ingeniería oceánica, la crisis climática y aquella sobre el ordenamiento jurídico y la gestión costera.

«Las Costas de Chile» es un libro que invita a conocer, respetar y usar racionalmente la franja litoral y costera; zonas particularmente sensibles a los impactos naturales, antropogénicos y a la crisis climática en que estamos insertos. No se puede racionalmente usar, cuidar y conservar aquello que no se conoce o a lo que somos ciegos.

El libro nos abre los ojos sobre nuestras costas. Mantengámoslos abiertos pues de ellas dependen muchos millones de chilenos y son sin dudas un gran reservorio de biodiversidad, riqueza alimentaria, recreación y bienestar humano. Usemos esos ojos, ahora abiertos, para ilustrar y comunicar a la sociedad nacional, y en especial a los estudiantes de diferentes niveles, las bondades, oportunidades y desafíos que nos presentan nuestras costas.

Quizás algún día, no lejano, también podamos usar los conocimientos y hallazgos que contiene este libro (y otros) para mostrarle a la sociedad en vivo, y en particular a los niños chilenos, formas diferentes de conocer, admirar y respetar nuestros riquísimos ambientes marinos: un programa de construcción de acuarios marinos para Chile es una idea a explorar.

JUAN CARLOS CASTILLA

Profesor titular, Pontificia Universidad Católica de Chile
Premio Nacional de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas, 2010

GLOSARIO

Páginas 174 - 185

ABLACIÓN: Erosión que experimenta un relieve a raíz de la potencia de procesos físicos o químicos (ablación continental). La ablación glaciaria, en cambio, se caracteriza por describir la pérdida de masa que sufren los glaciares a causa de fusiones, sublimaciones o quiebres de témpanos (*icebergs*).

ABRASIÓN: Acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material. La abrasión marina es el desgaste causado a una roca por la acción mecánica del agua cargada por partículas procedentes de los detritos. La abrasión es también una actividad de hielo glacial, olas y viento.

ACANTILADO: Forma de la costa, desprovista de vegetación, de paredes casi verticales originada por el trabajo erosivo del mar. La acción de las olas puede causar, si la naturaleza de las rocas que forman el acantilado lo permite, socavamiento y posteriores derrumbes provocando el retroceso del acantilado.

ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO: Resultado provocado por las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera procedentes de las actividades humanas. El dióxido de carbono atmosférico es absorbido por los océanos, desencadenando una reacción química y como resultado genera un descenso del pH del agua de mar.

ACRECIÓN: Crecimiento de las masas continentales por adición de terrenos, llamada acreción continental. Este material puede ser sedimento, arcos volcánicos, montañas submarinas u otras características ígneas. Por este proceso las partículas clásticas traídas por las olas y/o corrientes costeras se depositan en la zona de interfase agua-tierra originando el avance de un territorio a expensas de la superficie ácuea. Se da en mares, ríos y lagos. Puede ser natural o artificial. Esto último puede ser de tipo directo, es decir, por relleno premeditado; o indirecto, por la interferencia de rompeolas, muelles, islas artificiales, dragados, etc.

ACUÍFERO: Cuerpo de roca permeable a través del cual se mueve el agua subterránea. Acumulación en forma de cuña de arena, grava o guijarros en las zonas de playa baja y ante costa.

ADAPTACIÓN: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos.

ALBEDO: Fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto, frecuentemente expresada en términos porcentuales. El albedo de los suelos puede adoptar valores altos, como en las superficies cubiertas de nieve, o bajos, como en las super-

ficies cubiertas de vegetación y los océanos. La Tierra refleja parte de la radiación que recibe del Sol a través de tres actores principales: la atmósfera, las nubes y la superficie terrestre. La radiación reflejada por la superficie de la Tierra es el albedo terrestre. Así pues, podemos definir el efecto albedo como el porcentaje de radiación solar que es devuelto a la atmósfera tras chocar con la superficie terrestre.

ALBUFERA (LAGUNA MARGINAL): Laguna separada del mar por una barra o barrera. Relacionada genéticamente con la dinámica costera. Puede tener una comunicación restringida con el mar; la salinidad de sus aguas abarca un amplio rango, desde dulce hasta hipersalina.

ALTURA SIGNIFICATIVA DEL OLEAJE: Media aritmética de la altura del tercio de olas más altas registradas en un período de 20 a 30 minutos. Su valor se aproxima a la altura de las olas que percibe visualmente un observador experimentado, puesto que este pone inconscientemente más atención a las olas mayores.

AMENAZA: Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

AMERB: Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos.

ANTEPLAYA: Cara inclinada de una playa situada en la zona de subida y bajada de la ola.

ANTROPOGÉNICO (ANTROPÓGENO/ANTRÓPICO): Resultante de la actividad de los seres humanos o producto de esta.

APS: Anticiclón del Pacífico Sur. Es una gran área de la atmósfera en la que el aire desciende y rota en el sentido contrario a las agujas del reloj y juega un rol fundamental en el clima de Chile.

AR: *Assesment Report* (Informe de Evaluación). Documentos elaborados por expertos del IPCC, que dan cuenta de los últimos avances de la ciencia sobre el cambio climático. Desde 1990, se han elaborado cinco AR. El último fue publicado entre los años 2013 y 2014.

ARCILLA: Fracción granulométrica de un sedimento cuyos componentes son todos menores de 1/256 mm en tamaño. Como material sedimentario se halla compuesto en forma predominante por silicatos de aluminio hidroxilados con estructura atómica planar.

ARCHIPIÉLAGO: Grupos de islas, separadas entre sí por escasa distancia.

ARENA: Fracción granulométrica de un sedimento cuyos componentes están comprendidos entre 1/16 y 2 mm de tamaño. Se subdivide en muy fina (1/16-1/8 mm); fina (1/8-1/4 mm); mediana (1/4-1/2 mm); gruesa 1/2-1 mm) y muy gruesa (1-2 mm). El componente predominante es el cuarzo, pero bien puede ser otro material como el feldepasto, magnetita, glauconita, etc.

ARENISCA: Sedimento resultante de la consolidación de arena cuarzosa (predominancia del cuarzo entre 50 % y 99 %) cementada por arcilla, cal, etc., se forma en desiertos y costas presentándose en todas las formaciones geológicas.

ÁRIDO: Conjunto de fragmentos de materiales suficientemente duros (roca en la mayor parte de los casos) de tamaño inferior generalmente a 15 cm, que se emplean en la fabricación de hormigón.

ARRECIFE: Elevación de carácter rocoso o coralino que puede emerger o no del nivel del mar.

ARRECIFE ARTIFICIAL: Estructuras que se sumergen a una determinada profundidad con el propósito de fomentar y proteger los ecosistemas marinos, además de la degradación que provoca la actividad humana.

ATOLÓN: Arrecife de coral ordenado en la forma más o menos anular, cerrada o abierta que circunda una laguna de poca profundidad; en su interior suele haber pequeñas islas o escarpes que reciben el nombre de semiatolones.

AUTORIDAD MARÍTIMA: El Director General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (autoridad superior), los Gobernadores Marítimos y los Capitanes de Puerto constituyen la Autoridad Marítima para los efectos del ejercicio de ella. Tratándose de los Alcaldes de Mar, han de atenerse a las atribuciones específicas que les delega el Director General [D S(M) N°9/2018, art. 1, N°4].

BANCO DE ARENA: Banco formado por arena y clastos.

BANCO: En los mares, ríos, etc., acumulación considerable de distintos materiales (arena, limo, conchas, restos vegetales, etc.) que se halla a poca distancia de la superficie constituyendo zonas de peligro para la navegación. Generalmente, tienen gran extensión y son más largos que anchos.

BARLOVENTO: Sector desde donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado.

BARRA: Una ondulación o sucesión de ondulaciones de arena o de otros materiales, específicamente una acumulación de materiales que se extiende a través de la desembocadura de un río o de la bocatoma de un puerto y que puede obstruir la navegación.

BASALTO: Roca ígnea extrusiva (volcánica); se presenta en coladas de lava, diques laminares, volcanes de escudo o conos de cenizas.

BATIMETRÍA: Medida y cálculo de las profundidades de los cuerpos de agua, especialmente los mares.

BENTOS: Conjunto de organismos que viven en los fondos acuáticos.

BERMA: Acumulación en forma de loma baja sobre la playa sumergida, de perfil asimétrico, con pendiente mayor hacia el lado del mar. Escalón de playa.

BORDE COSTERO: Franja del territorio que comprende la costa marina, fluvial y lacustre y el mar territorial de la República, que se encuentra sujeto al control, fiscalización y supervigilancia del Ministerio de Defensa Nacional, Subsecretaría para las Fuerzas Armadas. Se entenderá por mar territorial aquel que se encuentra definido en el artículo 593 del Código Civil [DS(M) N°9/2018, art. 1, N°5].

BRAZA: Unidad de medida de profundidad usada en cartografía náutica, equivalente a 1829 m.

BUZAMIENTO: Inclinación de un filón o de una capa de terreno.

CABO: Porción de la costa que en forma de lengua o punta penetra en el mar. Es menos extenso que la península y mayor que la punta.

CALADO: Altura de la sección transversal sumergida de un flotador medida desde la quilla.

CALENTAMIENTO GLOBAL: Denota el aumento gradual, observado o proyectado, de la temperatura global en superficie, como una de las consecuencias del forzamiento radiativo provocado por las emisiones antropógenas.

CAMBIO CLIMÁTICO: Variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como «cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables». La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad del clima atribuible a causas naturales. Véase también detección y atribución.

CANAL MARINO: En el mar, parte estrecha y alargada que separa dos sectores emergidos (p. ej., islas) y que sirve de comunicación entre dos cuerpos de agua, los cuales por la conformación de su fondo hacen difícil desembarcar en las costas adyacentes.

CANTO RODADO: Clasto de dimensiones mayores que las de las arenas que por desgaste durante el transporte alcanza una forma predominantemente esférica o redondeada.

CAÑÓN SUBMARINO: Valle o zanja de perfil en V, de laderas escarpadas que zigzaguea a través de la plataforma continental y/o talud continental, en el fondo del cual tiene una pendiente continua. Posee tributarios y parece cañón terrestre de río no afectado por glaciación: p. ej., cañón submarino Biobío, cañón submarino Toltén. Valle submarino angosto y en forma de V excavado en el talud continental, cuya génesis se suele atribuir a erosión por corrientes de turbidez.

CASQUETE POLAR: Es la gran masa de hielo que cubre terrenos, islas y mares en altas latitudes, tanto en el Ártico como en la Antártida.

CAVERNA: Cavidad grande, techada, que se encuentra en cualquier tipo de roca.

CAYO: Isla rasa, arenosa, baja, anegadiza y cubierta en parte por mangles (arbusto propio de las regiones tropicales) muy común en el mar de las Antillas y el golfo de México.

CIENO: Fango. Depósito abisal fino, formado principalmente por restos de organismos pelágicos y con muy escaso material arcilloso. Son depósitos recientes. Los más comunes son los integrados por globigerinas, coccolitos, pterópodos, diatomeas y radiolarios.

CLIMA: Descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medios y variabilidad de cantidades, como la temperatura, la precipitación, el viento y la presión atmosférica.

CLIMATOLOGÍA: Ciencia de la Tierra que estudia el clima y sus variaciones a lo largo del tiempo.

CMNUCC: La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ofrece una estructura para canalizar los esfuerzos intergubernamentales dirigidos a resolver el desafío del cambio climático.

COLMATACIÓN: Relleno de una cuenca sedimentaria con materiales detríticos arrastrados y depositados por el agua.

COMBUSTIBLES FÓSILES: Son una serie de sustancias y gases formados a partir de restos descompuestos de animales y plantas, que se generan en ciertas capas del suelo, y que se usa como un tipo de energía no renovable.

CONCESIÓN DE ACUICULTURA: Acto administrativo mediante el cual el Ministerio de Defensa Nacional otorga a una

persona derechos de uso y goce sobre determinados bienes nacionales, situados dentro de las áreas fijadas como apropiadas para el ejercicio de la acuicultura, para fines de cultivo de especies hidrobiológicas y que se rigen por las disposiciones de la Ley General de Pesca y Acuicultura y su Reglamento [DS(M) N°9/2018, art. 1, N°11].

CONCESIÓN MARÍTIMA: Acto administrativo mediante el cual el Ministerio de Defensa Nacional o el Director, según corresponda, otorgan a una persona derechos de uso y goce, sobre bienes nacionales de uso público o bienes fiscales cuyo control, fiscalización y supervigilancia corresponden al Ministerio, para el desarrollo de un determinado proyecto o actividad [DS(M) N°9/2018, art. 1, N°12].

CONGLOMERADO: Roca sedimentaria clástica que contiene numerosos cantos rodados o partículas más grandes.

CONTRACORRIENTE: Corriente que lleva la dirección opuesta a la corriente general.

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LA REPÚBLICA: Ley fundamental del ordenamiento jurídico, que se encarga de organizar al Estado y su forma de gobierno. También, fija las atribuciones y los límites del ejercicio de los tres poderes públicos. Además, establece los deberes y garantías a cada persona.

CORAL: Secreción sólida de pólipos coralinos, con predominancia de carbonato de calcio que forma arrecifes o grupos de formas semejantes a árboles o masas globulares.

CORDÓN LITORAL: Acumulación de arena, limo, cantos rodados, valvas, etc., dispuesta paralelamente a la costa, originada por mareas, corrientes marinas, que se forma principalmente en costas bajas y que no se destruye por las aguas que ya han perdido su impulso original dadas las características de la costa; a veces puede dar origen a lagunas entre el cordón y la costa, llamadas restingas. La presencia de desembocaduras de ríos cercanos favorece la edificación de los cordones litorales.

CORDÓN: Elevación larga en un fondo oceánico profundo; sus faldeos son de topografía irregular y tienen pendientes más pronunciadas que las de un domo.

CORRIENTE DE FLUJO: Movimiento de una corriente hacia la costa o hacia arriba.

CORRIENTE DE MAREA: El término se aplica exclusivamente a las corrientes periódicas producidas por las mareas. Por lo demás son débiles en altamar, pero pueden adquirir cerca de la costa velocidades suficientes para arrastrar materiales del fondo removidos por las olas.

CORRIENTE LITORAL: Corriente en la zona de rompientes desencadenada por el acercamiento oblicuo de olas, que discurre paralela a la línea de costa.

CORRIENTE MIXTA: Tipo de corriente de marea caracterizada por una marcada diferencia entre los dos flujos y los reflujos que generalmente ocurren cada día de marea.

COSTA: Línea más o menos sinuosa que delimita el encuentro de las aguas con la tierra. Zona en la que los procesos costeros funcionan o ejercen una marcada influencia.

CUADRATURA: Posición de la Luna cuando su longitud celeste difiere 90° a 270° de la longitud del Sol. Las fases correspondientes se denominan crecientes o menguantes. Los rangos de marea durante la cuadratura son las mínimas del mes.

CUENCA MARINA: Depresión en el fondo oceánico, profunda, de forma más o menos equidistante pero no necesariamente de gran tamaño.

CUENCA: Territorio rodeado por alturas.

DÁRSENA: Porción de agua abrigada que resulta de la construcción de un molo o rompeolas, o por la excavación de la costa del litoral o ribera [DS(M) N°9/2018, art. 1, N°13].

DECRETO CON FUERZA DE LEY (DFL): Norma dictada por el Presidente de la República sobre materias propias de la ley, en virtud de una autorización que le confiere el Congreso Nacional para ello, la que no puede exceder de un año y debe expresar las materias sobre las cuales versa la delegación. Asimismo, el Presidente de la República está autorizado para dictar DFL para fijar el texto refundido, coordinado y sintetizado de las leyes cuando sea conveniente para su mejor ejecución.

DECRETO LEY: Normas dictadas por el Presidente de la República o por quien detenta el poder nacional sobre materias propias de Ley, sin autorización alguna del Congreso Nacional. Por lo general, durante períodos de anormalidad constitucional.

DECRETO SUPREMO: Es una orden escrita que dicta el Presidente de la República o un Ministro, por orden del Presidente de la República, sobre asuntos propios de su competencia [Ley N°19.880, art.3°, inc.4°].

DEFLEXIÓN: Deformación que registra un elemento a partir de la aplicación de una fuerza.

DELTA: Depósito aluvial que se forma en la boca de los grandes ríos y que constituye una forma más o menos triangular similar a la letra griega delta mayúscula. Depósito de sedimentos construido por un río que penetra en un cuerpo de agua estable y formado por la carga fluvial.

DELTA MARINO: El formado en la costa del océano; es el antónimo de continental.

DELTAICO: Se dice de los depósitos de sedimentos propios de los ambientes de sedimentación de los deltas.

DEPÓSITO LITORAL: Aquellos sedimentos formados en la costa por la influencia del trabajo activo de las olas, caracterizados

por marcas de oleaje entrecruzadas y una extremadamente rápida variación lateral.

DEPRESIÓN: Concavidad larga y bastante ancha con costados de suave pendiente.

DERIVA COSTERA: El movimiento neto de los sedimentos, paralelo a la costa generado por las olas y las corrientes de olas inducidas.

DERIVA LITORAL: Transporte de sedimentos paralelo a la línea de costa por la acción combinada de deriva de playa y transporte de corriente litoral.

DIQUE: Cuerpo plutónico tabular que tiene superficies de contacto discordantes.

DOLO: Elemento artificial que mitiga la acción del oleaje en zonas costeras (Ver Tetrápodo).

DOP: Dirección de Obras Portuarias, organismo dependiente del Ministerio de Obras Públicas que le corresponde la supervigilancia, fiscalización y aprobación de los estudios, proyectos, construcciones, mejoramientos y ampliaciones de toda obra portuaria, marítima, fluvial o lacustre y del dragado de los puertos y de las vías de navegación que se efectúen por los órganos de la Administración del Estado, por entidades en que este tenga participación o por particulares [DFL N° 850 de 1997].

DRAGA: Máquina que se emplea para ahondar y limpiar los puertos, ríos, canales y extraer de ellos fango, piedras, arena, etc.

DRIVERS: Variables que generan un impacto.

DUNA: Elevación o loma de arena fina que, originada por el viento se forma en playas y desiertos, en áreas libres de vegetación. Su eje es perpendicular a la dirección general del viento teniendo la falda de barlovento pendiente suave y la de sotavento pendiente más marcada. El continuo arrastre de la arena de una falda a la otra produce el desplazamiento gradual de la duna en la dirección del viento.

DUQUE DE ALBA O DOLFIN: Estructura exenta, generalmente constituida por un grupo de pilotes encepados, un cajón de hormigón armado o un recinto de tablestacas, cuyas funciones principales podrán ser: resistir el impacto de un buque atracando, resistir el tiro de amarras, servir de guía durante una maniobra del buque y/o servir de protección de otra estructura ante el impacto de buques.

ECOSONDA: Aparato electrónico, transmisor y receptor de sonidos de alta frecuencia, que permite medir las profundidades de las bahías, mares y océanos.

EDAFOLÓGICO: Relativo a la edafología; a los suelos, desde el punto de vista agrícola y del desarrollo de las plantas.

EMERSIÓN COSTERA: La exposición de una franja de fondo del mar como nuevo terreno superficial por levantamiento cor-

tical (levantamiento epirogénico tectónico) o por un descenso eustático del nivel del mar.

EÓLICO: Debido a la acción del viento: Sedimento originado por deposición eólica, caracterizada por una buena selección granulométrica, pronunciada redondez de los granos, estratificación diagonal cruzada; frecuentemente en material arenoso.

EPICENTRO: Superficie del terreno situada directamente encima del foco de un terremoto.

EQUILIBRIO DINÁMICO: Dos reacciones opuestas ocurren a la misma velocidad.

EROSIÓN MARINA: Destrucción que sufren las costas merced a la acción mecánica de las olas; esta acción se ve complementada por el material clástico transportado por las olas.

EROSIÓN TECTÓNICA: Remoción de masas rocosas del borde inferior de una placa litosférica por el arrastre hacia abajo ejercido por una placa de subducción que se desliza bajo aquella.

ESCALA DE WENTWORTH: Sistema de grados de tamaño de las partículas para sedimentos detríticos cuyos grados se nombran y definen en función de una escala logarítmica.

ESCARPADO: Se dice de la parte de la costa, o costado de un banco que desciende en forma muy empinada hacia las profundidades; también se dice del cabo o promontorio muy abrupto que se interna en el mar.

ESCOLLERA: Conjunto de escollos agrupados que en general forman una alineación más o menos recta o una curva muy amplia. Rompeolas.

ESCOLLO: Elevación rocosa que se halla a flor de agua y que no se ve sobre la superficie del agua.

ESPIGÓN: Estructura para la protección de la costa, construida generalmente de forma perpendicular a la costa y destinada para retrasar el transporte litoral.

ESTADO DE MAR: Intervalo de tiempo durante el cual es posible asumir que las propiedades estadísticas del oleaje son estacionarias. Esta definición supone que, debido a la inercia del fenómeno, existe un equilibrio entre las fuerzas generadoras y restauradoras que intervienen en los procesos de generación y propagación del oleaje.

ESTOA: Es el momento en que la velocidad de la corriente de marea está cerca de cero. También se dice que es el momento en que la corriente cambia de dirección y su velocidad es nula.

ESTRATIFICACIÓN: El arreglo en capas de las partículas que constituyen un cuerpo de roca.

ESTUARIO: Cuerpo de agua en una entrante de la costa en que las aguas saladas marinas se ponen en contacto con aguas

dulces fluviales. Este proceso está controlado por la acción de las mareas. Estuarial es proceso o forma relativas a un estuario.

EUSTATISMO: Variaciones del nivel global del mar. Los cambios producidos en el nivel del mar pueden ser el resultado del movimiento de las placas tectónicas que alteran el volumen de las cuencas oceánicas o cuando los cambios climáticos afectan el volumen de agua almacenada en los glaciares y en los casquetes glaciares. El eustatismo afecta las posiciones de las líneas de costa y los procesos de sedimentación, de manera que la interpretación del eustatismo es un aspecto importante de la estratigrafía secuencial.

EXPOSICIÓN: La presencia de personas, medios de subsistencia, especies, ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura, activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.

FALLA: Dislocación o fractura en la corteza terrestre por la cual se deslizan en sentido más o menos vertical los estratos o bloques que formaban originalmente una unidad; pueden ser verticales o normales, inversas o anormales, inclinadas, de arrastre, monoclinal, etc.

FANGO: Depósito resultante de la mezcla de partículas de limo, arcilla y otras sustancias con agua. También se aplica el término colectivamente para definir los depósitos marinos constituidos por un alto porcentaje de sustancia arcillosa con partículas de minerales y rocas.

FASE: Etapa en el proceso de un hecho geológico cualquiera.

FIORDO: Entrada en la costa motivada por hundimiento (erosión glacial) de un valle fluvial. Es una entrada profunda, ramificada, de paredes acantiladas. Bahía oceánica profunda y angosta que rellena en parte un surco glacial.

FONDO: Superficie sólida debajo del agua del mar, lago, etc. También se aplica a la parte más interior y resguardada de un puerto.

FORZAMIENTO RADIATIVO: La potencia de los elementos impulsores se cuantifica como forzamiento radiativo en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m^2), como figura en anteriores evaluaciones del IPCC. El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo de energía causado por un elemento impulsor y se calcula en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera.

GARGANTA: Parte estrecha de un canal; entrada de un puerto. Parte baja, parecida en forma a una montura, que se encuentra entre dos alturas de una dorsal o entre montes submarinos contiguos.

GAS DE EFECTO INVERNADERO (GEI): Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la

propia atmósfera y por las nubes. Los principales son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

GEOSINCLINAL: Depresión de la corteza terrestre que se hunde paulatinamente y en la que se acumulan sedimentos.

GLACIACIÓN: La alteración de una superficie de la Tierra por el movimiento masivo sobre la misma del casquete glacial.

GLACIAR: Cuerpo de hielo consistente principalmente de nieve recristalizada, que fluye sobre la superficie de la Tierra.

GLACIOEUSTATISMO: Considera las variaciones que experimenta el volumen total del agua en las cuencas oceánicas, debidas a cambios climáticos de largo período, asociados a la alternancia de las glaciaciones e interglaciaciones.

GNEISS: Roca de grano grueso foliada, que se parte siguiendo superficies irregulares y que comúnmente contiene capas alterantes, de minerales claros y de minerales oscuros.

GOLFO: Seno en la costa, más o menos amplio, con profundidades considerables que lo hacen apto para albergar embarcaciones grandes. Sus costas son altas.

GRADIENTE GEOTÉRMICO: La cantidad en que se incrementa la temperatura hacia el interior de la Tierra.

GRANITO: Roca ígnea intrusiva que consiste principalmente en cuarzo, feldespato potásico y feldespato plagioclasa sólida, con proporciones menores de biotita y hornablenda; una roca ígnea félsica que se presenta en plutones.

GRANULOMETRÍA: Gradación de los distintos tamaños de piedras o grano que constituyen un árido o un polvo, y, en general, la de los elementos de un agregado.

GRAVA: Sedimento no consolidado formado por clastos de dimensiones mayores que los de la arena (4 mm) y menores que los de los aglomerados (256 mm).

GRAVEDAD: Atracción gravitacional de la Tierra sobre cualquier masa pequeña cerca de la superficie terrestre. En el uso geofísico, es la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre.

GUIJARRO: Clasto entre 16 y 64 mm de diámetro, más o menos redondeado por el transporte fluvial, marino, glacial o eólico. Son casi siempre fragmentos de rocas, aunque a veces estas son monominerálicas. El agregado de guijarros constituye la grava o conglomerado mediano. Se encuentra en las playas y fondos cercanos a la costa.

HIDROSFERA: Conjunto de las aguas de la tierra. Todo el dominio acuático de la zona superficial de la Tierra, que comprende los océanos, las aguas superficiales de las tierras emergidas, el agua subterránea y el agua contenida en la atmósfera.

HUMEDALES: Ecosistemas acuáticos constituidos de una zona inundada permanente o intermitentemente.

IMPACTO: Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos, incluidas las crecidas, las sequías y la elevación del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos denominados impactos físicos.

INTEMPERISMO: La alteración química y el rompimiento mecánico de los materiales rocosos durante la exposición al aire, a la humedad y a la materia orgánica.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Está compuesto por centenares de científicos y expertos que contribuyen de manera voluntaria, escribiendo informes para dar cuenta de los últimos avances de la ciencia del cambio climático y generando la mejor información técnica posible, para apoyar la toma de decisiones de los países.

ISLA: Cuerpo de tierra rodeado por agua, de extensión menor que un continente.

ISLOTE: Isla pequeña y despoblada.

ISÓBATA: Línea que une, en los mares, lagos, etc., los puntos de igual profundidad de las aguas.

ISTMO: Lengua de tierra que une dos continentes o una península con un continente.

LAGUNA MARGINAL: Ver Albufera.

LEY: Es la declaración de la voluntad soberana, que manifestada en la forma prescrita por la constitución manda, prohíbe o permite [art. 1° Código Civil de Chile].

LIMO: Mezcla de tierra y agua que se produce en el suelo por las lluvias, inundaciones, etc.

LÍNEA DE LA PLAYA: Aquella que, de acuerdo con el artículo 594 del Código Civil, señala el deslinde superior de la playa de mar hasta donde llegan las olas en las más altas mareas [DS(M) N°9/2018, art. 1, N°25].

LÍNEA DE LA PLAYA OFICIAL: Aquella fijada por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante

(DIRECTEMAR), pudiendo solicitar para su determinación, un informe técnico al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). En el caso de que sea necesario modificar una línea de playa oficial, debido a la alteración de la realidad geográfica del sector, la Dirección elevará los antecedentes al Ministerio de Defensa Nacional, a través de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas, para que disponga que se realicen las modificaciones pertinentes [DS(M) N°9/2018, art. 1, N° 26].

LÍNEA DE LAS AGUAS MÁXIMAS EN RÍOS Y LAGOS: Nivel hasta donde llegan las aguas en los ríos o lagos, en sus crecientes normales de invierno y verano. Para su determinación se basará en lo definido por el Ministerio de Bienes Nacionales, conforme con los procedimientos establecidos en el DS N° 609 de 1978, de esa Secretaría de Estado, o en su defecto, a las instrucciones impartidas por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante [DS (M) N° 9/2018, art. 1, N° 27].

LÍNEA DE MÁS BAJA MAREA: Línea que representa el nivel mínimo alcanzado por una marea vaciante en el período de sicigias y cuando la luna se encuentra a su menor distancia de la tierra [DS (M) N° 9/2018, art. 1, N° 28].

LÍNEA DEL LÍMITE DE TERRENO DE PLAYA: Línea que fija el límite superior de los terrenos de propiedad del Fisco sometidos al control, fiscalización y supervigilancia del Ministerio, ubicada a una distancia de hasta 80 metros, medida desde la línea de la playa de la costa del litoral o desde la línea de aguas máximas en los ríos o lagos, sin considerar para estos efectos los rellenos artificiales hechos sobre la playa o fondos de mar, río o lago [DS (M) N° 9/2018, art. 1, N° 29].

LÍNEA DE RELLENO: Trazado referencial que determina el deslinde de un relleno artificial respecto a la playa y/o fondo de mar, río o lago [DS (M) N° 9/2018, art. 1, N° 30].

LITORAL: Región adyacente a la costa que está sometida a los procesos litorales o las influencias de la costa. No se debe definir el litoral como línea de contacto entre el relieve terrestre y las aguas oceánicas por causa de movimientos rítmicos del agua de mar, corrientes marinas, etc., que ocasiona una variación del nivel de las aguas oceánicas. También se dice del ambiente de sedimentación propio de la faja costera abarcada por las mareas, y de la roca en él formada.

LITOSFERA: Nombre dado a la parte sólida exterior de la tierra (superficie terrestre y subsuelo marino) en oposición a la parte líquida (hidrosfera) y gaseosa (atmósfera).

LITOLÓGÍA: Parte de la Geología que estudia las características de las rocas en formación geológica.

LONGITUD DE ONDA: Distancia entre dos crestas o dos senos consecutivos de una ola, una curva de marea, etc.

LODO: Sedimento arcilloso muy fino.

LLANURA COSTERA: Superficie llana, de poca pendiente desarrollada a lo largo de una costa de playas, compuesta por sedimentos marinos, fluviales, fluviomarinos o de todos estos depósitos juntos.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

MANGLAR: Terreno en la zona tropical que cubre de agua las zonas someras formando muchas islas bajas, donde crecen los árboles que viven en el agua salada.

MAREA ASTRONÓMICA: Marea debida a las atracciones gravitatoria de la luna, el sol y demás cuerpos astrales. Su intensidad está en íntima relación con la posición relativa que el sol y la luna tienen respecto a la tierra.

MAREA DE CUADRATURA: Marea que se produce cuando la Luna esta en cuarto menguante o creciente.

MAREA DE PERIGEIO: Se produce cuando la Luna se encuentra a su menor distancia de la Tierra. El rango aumenta a medida que disminuye la distancia Luna-Tierra

MAREA DE SICIGIAS: Marea que se produce durante la Luna llena o nueva. El rango de la marea tiende a aumentar en esta época, pero por lo general con un retardo que se conoce con el nombre de Edad de la Desigualdad de la Fase.

MAREA ECUATORIAL: Tiene lugar semi-mensualmente cuando la Luna esta sobre el ecuador. En ese momento es mínimo la tendencia de la Luna a producir una desigualdad diurna de la marea.

MAREA EQUINOCCIAL: Se produce cuando el sol está en los equinoccios.

MAREA METEOROLÓGICA: Aumento episódico de la altura del mar en un determinado lugar causado por condiciones meteorológicas extremas (presión atmosférica baja y/o vientos fuertes). Se define como la diferencia entre el nivel de la marea alcanzado y el esperado en un lugar y momento dados.

MAREA ORDINARIA: Es la marea normal de un lugar. Corresponde a la más frecuente.

MAREAS: Movimientos periódicos y alternantes de ascenso y descenso de las aguas del mar producidos por las acciones atractivas del Sol y la Luna.

MAREJADA: Oleaje ocasionado, generalmente por una tormenta lejana.

MAREMOTO: Movimiento intenso que se produce en las aguas del mar como consecuencia de un terremoto que afecta al fondo submarino. Terremoto submarino (Ver Tsunami).

MAREÓGRAFO: Instrumento para registrar y medir las oscilaciones de las mareas.

MAREOMOTRIZ, ENERGÍA: Es la energía renovable obtenida de las mareas.

MARGEN: Orilla, costa, ribera.

MARGEN CONTINENTAL: Bajo este nombre se suele agrupar la plataforma continental y el talud continental.

MÁRGENES CONTINENTALES: Topográficamente, una de las tres grandes divisiones de las cuencas oceánicas, que son zonas directamente adyacentes al continente e incluyen la plataforma continental, el talud continental y la elevación continental. Tectónicamente, es faja marginal de corteza y litosfera continentales que está en contacto con corteza y litosfera oceánicas, con o sin borde de placa activo presente en el contacto.

MARISMA: Terreno bajo, pantanoso, que es inundado por las aguas del mar, ya sea por las mareas o bien como resultado del encuentro de las aguas del mar con las de los ríos en su desembocadura.

MATRIZ: Las pequeñas partículas de un sedimento o roca sedimentaria, que ocupan los espacios entre las partículas mayores que forman el esqueleto.

MAREA DE APOGEO: Es la que se produce cuando la Luna se encuentra en mayor distancia de la Tierra. El rango disminuye a medida que aumenta la distancia Luna-Tierra.

METEORITO: Partícula de materia sólida proveniente del espacio exterior y que ha impactado al suelo atravesando la atmósfera.

MITIGACIÓN: Intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero.

MODELOS CLIMATOLÓGICOS GLOBALES: Los modelos climáticos son sistemas de ecuaciones diferenciales basados en las leyes básicas de la física, la dinámica de fluidos y la química, que se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático y las proyecciones del clima futuro.

MOLO: Muro o terraplén que internándose desde la costa o ribera aguas adentro, sirve para la defensa o abrigo de cierto espacio de agua y que también puede ser utilizado para la movilización de carga o de pasajeros. Se considerará como muelle o atracadero, según sea apto para el atraque de embarcaciones mayores (muelle) o menores (atracadero).

MONTE ABISAL: Elevación de poco relieve, muy corriente en el fondo oceánico, usualmente se encuentran en las planicies abisales y en cuencas aisladas por dorsales o fosas. Su altura media sobre el lecho marino es de 100 a 200 metros. Cerca del 85 % del fondo del océano Pacífico y 50 % del fondo del océano Atlántico están cubiertos por montes abisales.

MONTE SUBMARINO: Accidente submarino prominente aislado, cónico o a modo de pico, que se alza sobre una llanura

abisal; generalmente identificado como volcán submarino extinguido o guyot.

MOP: Ministerio de Obras Públicas. Secretaría del Estado encargada del planeamiento, estudio, proyección, construcción, ampliación, reparación, conservación y explotación de las obras públicas fiscales y el organismo coordinador de los planes de ejecución de las obras que realicen los Servicios que lo constituyen.

NIVEL DE REDUCCIÓN DE SONDA: Plano al cual están referidas las sondas o profundidades de una localidad. Cada país adopta el nivel de reducción de sondas de acuerdo con el régimen de marea de sus costas.

NIVEL MEDIO DE LA MAREA: Plano equidistante entre la altura media de las pleamares y la altura de las bajamares durante un largo período de observaciones. Tiende a confundirse con el nivel medio del mar, pero no coinciden.

NIVEL MEDIO DEL MAR: Esta expresión se define como la superficie de marea nula o la superficie de equilibrio del agua de mar ya depurada de los efectos meteorológicos o ajenos a la marea misma. Este nivel se ha adoptado como plano fundamental o de origen de las nivelaciones geodésicas y desde el cual se cuentan las alturas topográficas.

OBSIDIANA: Roca volcánica de grano vítreo del grupo ácido.

OLEAJE: Oscilación vertical del agua durante un período relativamente corto y de gran velocidad relativa.

OMM: Organización Meteorológica Mundial.

ONDA: Movimiento oscilatorio en una extensión de agua que se manifiesta por una subida y bajada de la marea.

OROGRAFÍA: Parte de la geografía física que se encarga del estudio, descripción y representación del relieve terrestre. Conjunto de montes de una zona, región, país, etc.

OSCILACIÓN: Término que se aplica a los cambios de nivel del mar. En geología, movimiento secular de ascenso y descenso.

OZONO, CAPA DE: La estratosfera contiene una capa en que la concentración de ozono es máxima, denominada capa de ozono. Esta capa abarca aproximadamente desde los 12 km hasta los 40 km por encima de la superficie terrestre. La concentración de ozono alcanza un valor máximo entre los 20 km y los 25 km aproximadamente. Esta capa ha sido mermada por efecto de las emisiones humanas de compuestos de cloro y de bromo. Todos los años, durante la primavera del hemisferio sur, la capa de ozono acusa una disminución muy pronunciada sobre la Antártica, causada por diversos compuestos de cloro y bromo de origen antropógeno, en función de las condiciones meteorológicas existentes en esa región. Este fenómeno se denomina agujero de ozono.

PELIGRO: Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia física de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. En el presente informe, el término peligro se refiere generalmente a sucesos o tendencias físicas relacionados con el clima o los impactos físicos de este.

PERFIL: Sucesión de estratos, formaciones, horizontes, etc., en dirección normal a la estratificación.

PERÍODO MEDIO DEL OLEAJE: Parámetro estadístico definido como el promedio de los períodos asociados al 50 % de las olas más altas de un registro.

PERÍODO MEDIO DE RETORNO: Período de tiempo promedio en que el valor de una variable es igualada o superada una sola vez.

PILOTE: Madero rollizo, barra de hierro cañería de acero o pilar de hormigón armados que se hincan en el terreno para soportar los bases de una construcción.

PLACER: Depósito de arena o grava que contiene partículas de un mineral pesado valioso. Por extensión banco de arena o piedra en el fondo del mar llano y de bastante extensión.

PLANCTON: Nombre colectivo que se da a un conjunto de organismos, vegetales y animales, que se hallan flotando a la deriva en los grandes cuerpos de agua.

PLANICIE LITORAL: Zona comprendida entre la lengua de agua en marea baja y los 200 m de profundidad.

PLATAFORMA CONTINENTAL: Zona que se extiende desde la línea de inmersión permanente hasta la profundidad cercana a los 200 metros mar adentro. El límite oceánico estaría dado por el talud continental. Se forma con la plataforma de abrasión y la terraza continental. Planicie continental.

PLATAFORMA COSTERA: Plano frente al acantilado de una costa, con suave inclinación hacia el mar, originado por la rompiente simultáneamente con el retroceso del acantilado. Es de extensión menor que la plataforma de abrasión y no debe confundirse con ella.

PLATAFORMA DE ABRASIÓN: Plataforma originada por el trabajo prolongado del mar sobre la costa; junto con la terraza continental forma la plataforma continental. En el uso general se confunde con la plataforma litoral, situada próxima a la costa y de extensión menor. Planicie de abrasión.

PLAYA ARTIFICIAL: Obra constructiva que permite la mantención de las arenas para generar espacios urbanos recreativos.

PLAYA SUMERGIDA: Zona de ruptura, inclinada hacia el mar que se desarrolla a partir del nivel de bajamar de sicigias. Debería ser considerada como la parte superior límite de la plataforma continental. Playa submarina.

PLAYA: Superficie llana formada por acumulación de arena en la zona litoral o costera de un cuerpo de agua. Su límite inferior estaría dado, para algunos por el nivel de bajamar y para otros por un punto por debajo de este nivel. El límite superior estaría dado por el límite efectivo de la acción del oleaje en dirección a la tierra.

PLEAMAR: Nivel máximo alcanzado por una marea creciente. Este nivel puede ser efecto exclusivo de mareas periódicas o pueden sumarse a estas los efectos de condiciones meteorológicas prevalentes.

PUERTO: Lugar en la costa, defendido de los vientos y dispuesto para la seguridad de las naves y para las operaciones de tráfico y armamento. Localidad o barrio en que está situado. También, puerto, terminal marítimo o recinto portuario es un área litoral delimitada por condiciones físicas o artificiales que permite la instalación de infraestructura destinada a la entrada, salida, atraque, desatraque, amarre, desamarre y permanencia de naves, y a la realización de operaciones de movilización y almacenamiento de carga, a la prestación de servicios a las naves, cargas, pasajeros o tripulantes, actividades pesqueras, de transporte marítimo, deportes náuticos, turismo, remolque y construcción o reparación de naves [DS (M) N° 9/2018, art. 1, N° 44].

PUNTO ANFIDRÓMICO: Punto de rango cero de la marea observada o de un componente de marea.

RAMSAR: La Convención sobre los Humedales, llamada la Convención de Ramsar, es el tratado intergubernamental que ofrece el marco para la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. La Convención se adoptó en la ciudad iraní de Ramsar en 1971 y entró en vigor en 1975.

RANGO DE MAREA: Es la diferencia en altura entre una pleamar y una bajamar consecutiva.

RATIFICACIÓN: También «aceptación», «aprobación» o «adhesión», según sea el caso, comprende al acto internacional así denominado por el cual un Estado hace constar en el ámbito internacional su consentimiento en obligarse por un tratado [Convención de Viena sobre el derecho de los tratados, 1969].

RCP: En el V Informe IPCC se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Estas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m². Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6); dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5). Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI frente a los escenarios de emisión utilizados en el IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) (denominados SRES, por sus siglas en inglés) que no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendientes a mitigar las emisiones.

RCP 8.5: (Ver RPC) Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores $>8.5 \text{ W/m}^2$ en el año 2100 y sigue aumentando durante un lapso (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100 y las concentraciones sean constantes después de 2250).

RÉGIMEN DE MAREAS: Forma característica de la curva de marea con referencia a la relación entre la onda diurna y la semidiurna. Las mareas se clasifican en diurnas semidiurnas y mixtas, no habiendo límites bien definidos que permitan separar los grupos.

RELIEVE SUBMARINO: Configuración que presenta el suelo submarino.

RESACA: Corriente hacia el mar y cerca del fondo de una playa inclinada. Es ocasionada por el regreso de las aguas llevadas hacia tierra por las olas o los vientos.

RESILIENCIA: Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un fenómeno, tendencia o perturbación peligrosa respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conserven al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

RÍA: Forma costera producida por el avance del mar sobre un sistema fluvial que puede llegar a anegarlo en toda su longitud.

RIESGO: Consecuencias eventuales en situaciones en que algo de valor está en peligro y el desenlace es incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos o tendencias peligrosas multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales fenómenos o tendencias.

RIFT: Accidente superficial largo y angosto, al modo de trinchera, producido durante la tracción separadora (extensión) de la corteza como en el caso de expansión del fondo oceánico.

RIPIO: Acumulación de fragmentos rocosos redondeados por efecto del transporte por las aguas. Agregado grueso de aristas redondas que entra en la preparación de hormigones.

ROCA: Agregado natural de minerales en estado sólido; suele ser dura y consistir en una o más variedades minerales.

ROCAS METAMÓRFICAS: Rocas alteradas en su estructura física y en su composición química (mineral) mientras se encuentran en estado sólido (sin fusión) por acción de calor, presión, esfuerzo de cizallamiento o infusión o pérdida de elementos (metasomatismo), alteración que tiene lugar a una profundidad considerable bajo la superficie terrestre.

ROMPEOLAS: Muro o terraplén que, internándose desde la costa o ribera de aguas adentro, sirve exclusivamente para la defensa o abrigo de cierto espacio de agua [DS (M) N°9/2018, art. 1, N°48].

RUNDOWN: Límite inferior que alcanza el oleaje.

RUNUP: Límite superior que alcanza el oleaje.

SALTACIÓN: Saltos, impactos y rebotes de granos de arena esféricos transportados sobre una superficie de arena o guijarros por el viento.

SECUESTRO (de carbono): Incorporación (esto es, la adición de una sustancia de interés a un reservorio) de sustancias que contienen carbono, en particular, dióxido de carbono (CO_2), en reservorios terrestres o marinos. El secuestro biológico consiste, en particular, en la remoción directa de CO_2 de la atmósfera mediante el cambio de uso del suelo, la forestación, la reforestación, la renovación de la vegetación, el almacenamiento de carbono en vertederos, y otras prácticas que aumentan el contenido de carbono en el ámbito de la agricultura (gestión de tierras agrícola y gestión de pastos).

SEDIMENTACIÓN: Deposición de material bajo forma sólida en condiciones físico-químicas normales de la superficie terrestre. La sedimentación puede realizarse en medio aéreo o acuoso, comprendiendo la destrucción de rocas preexistentes y posteriormente su transporte, depósito y diagénesis. Sedimento orgánico marino, abisal, que según su constitución recibe distintas designaciones; de globigerinas, de diatomeas, etc.

SEDIMENTO: Agregado no consolidado formado por medio de uno o más procesos fundamentales de la sedimentación. Por su origen pueden ser endógenos o químicos, exógenos o clásticos. Por su composición pueden ser silíceos, arcillosos, feldespáticos, orgánicos, etc. Su ambiente es continental (fluvial, lacustre, glacial, eólico) o marino (nerítico, batial, abisal).

SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Es el organismo oficial, técnico y permanente del Estado, en todo lo que se refiere a hidrografía; levantamiento hidrográfico marítimo, fluvial y lacustre; cartografía náutica, elaboración y publicación de cartas de navegación de aguas nacionales; oceanografía, planificación y coordinación de todas las actividades oceanográficas nacionales relacionadas con investigaciones físico-químicas, mareas, corrientes y maremotos; geografía náutica, navegación, astronomía, señales horarias oficiales, aerofotogrametría aplicada a la carta náutica.

SISMICIDAD: Estudio de los sismos en términos de la frecuencia y posición espacial en algún período de tiempo para una localidad o región específica.

SOBREPASO: Agua de mar que pasa por sobre una defensa costera.

SOCAVACIÓN: Excavación por debajo de una cosa que puede provocar destrucción o debilitamiento. En la infraestructura costera, proceso provocado por la acción del oleaje.

SOTAVENTO: Parte opuesta a aquella donde sopla el viento con respecto a un objeto o lugar específico.

SUBDUCCIÓN: Descenso del borde doblado hacia debajo de una placa litosférica en la astenosfera de manera que pasa bajo el borde de la placa adyacente a lo largo de un borde de placa activa.

SUMIDERO: Todo proceso, actividad o mecanismo que remueve de la atmosfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, o un precursor de cualquiera de ellos.

SWELL: Mar de fondo.

TABLESTACAS: Elementos de gran longitud en relación con su ancho que se hincan yuxtapuestos ya sea encajados o abrochados, para formar una pared continua. Pueden ser de madera, hormigón o acero, con secciones planas o de otra forma como I, H, U o Z.

TALUD CONTINENTAL: Declive que desciende desde el filo inferior de la plataforma continental hacia las profundidades mayores. En la parte del margen continental que está entre la plataforma continental y el talud oceánico (o la fosa oceánica). Se caracteriza por su relativamente fuerte pendiente. Franja empinadamente descendiente de fondo marino situada entre la plataforma continental y la elevación continental.

TALUD: Acumulación de fragmentos, detritos de falda, que no llega a constituir un cono de deyección.

TERRAZA: Superficie relativamente plana, horizontal, o levemente inclinada, a veces estrecha y extensa, limitada por dos flancos escarpados, uno ascendente y otro descendente. Pueden ser terrazas de erosión (fluviales, lacustre, etc.) o terrazas de agradación (continental, edificada por las olas, etc.).

TERREMOTO SUBMARINO: Movimiento sísmico que tiene lugar en el fondo de los océanos o en sus proximidades y que provoca el desplazamiento de las olas con fuerza extraordinaria haciéndose sentir sus efectos sobre las costas.

TERREMOTO: Un temblor o sacudida del suelo producido por el paso de ondas sísmicas.

TERRENO DE PLAYA: Faja de terreno de propiedad del Fisco sometida al control, fiscalización y supervigilancia del Ministerio, de hasta 80 metros de ancho, medida desde la línea de la playa de la costa del litoral y desde la ribera en los ríos o lagos. Para los efectos de determinar la medida señalada, no se considerarán los rellenos artificiales hechos sobre la playa o fondos de mar, río o lago [DS (M) N°9/2018, art. 1, N° 53].

TERRENO DE PLAYA ARTIFICIAL: Faja de terreno de propiedad del Fisco sometida al control, fiscalización y supervigilancia del Ministerio, medida desde la línea de playa hasta la línea de relleno [DS (M) N°9/2018, art. 1, N° 54].

TETRÁPODO: Estructura de hormigón con forma de tetraedro estilizado, que, gracias a su capacidad de intrincarse con figuras análogas y a su estabilidad geométrica, al reposar siempre sobre tres pies en un equilibrio muy estable, ha sido empleado

en obras civiles (particularmente en la construcción de rompeolas) y militares (para bloquear el paso de tropas o civiles, en ocasiones reforzado con alambre de espino).

TÓMBOLO: Barra o espiga simple, doble o triple, por la cual una isla queda unida a la tierra firme. Distinguirlo de una restinga en ciertas circunstancias presenta dificultades, pues a veces un tómbolo puede corresponder a una restinga incipiente.

TRATADO O CONVENIO INTERNACIONAL: Un acuerdo internacional celebrado por escrito entre Estados y regido por el derecho internacional, compuesto de un instrumento único o de dos o más instrumentos conexos, cualquiera sea su denominación particular (Convención de Viena sobre el derecho de los tratados, 1969).

TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS: Ver RCP.

TSUNAMI: Fenómeno físico que se origina por sismos que ocurren bajo o cerca del fondo oceánico, remociones en masa, derrumbes submarinos y erupciones volcánicas y se manifiesta en la costa como una gran masa de agua que puede inundar y causar destrucción en las zonas costeras. Los tsunamis causados por sismos cercanos a la costa, pueden arribar en pocos minutos y sus efectos continuar por varias horas después de ocurrido el sismo. Los tsunamis también pueden ser generados en otros lugares del océano Pacífico, llegando a la costa varias horas después de ocurrido el sismo. Estos fenómenos físicos están entre los más desastrosos y complejos de la naturaleza. Todos los tsunamis son potencialmente peligrosos y cuando uno llega a la costa, puede causar pérdida de vidas y daños a la propiedad.

UMBRAL: Cordón o domo de variada dimensión y origen que separa cuencas o depresiones parcialmente aisladas entre sí o aisladas del océano adyacente.

UMBRALES MARGINALES DE LOS CONTINENTES: Elevaciones de altura y estructura interior muy variada que acompañan casi todas las costas de los continentes, por lo regular con pendiente escarpada hacia el mar; según algunos autores serían producto de abovedamientos jóvenes, simultáneos con hundimientos del fondo marino vecino.

UNDIMOTRIZ, ENERGÍA: Es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas. Es una energía renovable.

UNIÓN TRIPLE: Ciertas zonas deformadas están en el límite no de dos, sino de tres placas. En ese caso se tiene una unión triple y las estructuras resultantes pueden ser muy variables. Punto común de coincidencia de tres bordes de placas litosféricas.

VALLE SUBMARINO: Depresión del fondo del mar, relacionado con la estructura de la costa inmediata. Cañón submarino.

VERIL: Líneas que unen puntos de igual profundidad en el océano.

VIDA ÚTIL: Período de tiempo que va desde la completa instalación de la estructura hasta su inutilización, desmontaje o cambio de uso.

VULNERABILIDAD: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

WILLIWAWS: Ráfaga de viento que desciende de una costa montañosa hacia el mar.

ZONA DE PROTECCIÓN COSTERA: Área de tierra firme, de anchos variables, de una extensión mínima de 80 metros medidos desde la línea de la playa, en la que se establecen condiciones especiales para el uso del suelo, con el objeto de asegurar el ecosistema de la zona costera y de prevenir y controlar su deterioro.

ZONIFICACIÓN: Proceso de ordenamiento y planeamiento de los espacios que conforman el borde costero marino, lacustre y fluvial, que tiene por objeto establecer sus múltiples usos, expresados en usos preferentes o excluyentes, graficados de acuerdo con los instructivos dictados por el Ministerio que identifiquen, entre otros aspectos, los límites de extensión, usos y las condiciones y restricciones para su administración, basados en

los criterios de compatibilidad, y en los objetivos establecidos en el DS N° 475 de 1994, del Ministerio de Defensa Nacional, que establece la Política Nacional de uso del Borde Costero del Litoral de la República. Como resultado del proceso de zonificación, se podrán establecer áreas con usos preferentes que excluyan otros usos incompatibles [DS (M) N°9/2018, art. 1, N°56].

BIBLIOGRAFÍA

Díaz-Naveas, J & J. Frutos (eds.). 2010. Geología Marina de Chile. Comité Oceanográfico Nacional de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. 115 pp.

IPCC, 2014: Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.

SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA-SHOA (2002). Glosario de mareas y corrientes. Pub. SHOA 3013, 3ª edición: 59 pp.

«El océano, el gran unificador, es la única esperanza del hombre. Ahora, como nunca antes, la antigua frase tiene un nuevo significado: todos estamos en el mismo bote».

Jacques-Yves Cousteau

Este libro se terminó de imprimir en el verano del año 2020 en los talleres gráficos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

