



# Itsasoko eta kostako txostena

## Informe marino-costero



<b>1. Sarrera</b>	<b>3</b>
<b>2. Metodologia</b>	<b>5</b>
2.1. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa itsas ingurunean eta kostaldean	7
2.2. Joerak klima-aldaketari edo beste faktore batzuei egozteko atribuzio-analisisa	8
<b>3. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa</b>	<b>9</b>
3.1. Itsasoko adierazle fisiko-kimikoak	9
3.1.1. Itsasoko tenperatura	9
3.1.2. Gazitasuna	11
3.1.3. Termoklina, estratifikazioa eta neguko nahaste-geruza	12
3.1.4. Oxigenoa	16
3.1.5. Mantenugai ez-organiko disolbatuak	17
3.1.6. Itsas maila	18
3.1.7. Olatuak	20
3.2. Adierazle atmosferiko eta hidrologikoak	23
3.3. Kostaldeko higaduraren adierazle geomorfologikoak	23
3.3.1. Mareaz gaindiko eta marearteko eremua	24
3.3.2. Hondartzaren batez besteko zabalera	25
3.4. Adierazle biologikoak eta itsas ekosistemarenak	26
3.4.1. Fitoplanktona	27
3.4.2. Makroalgak eta substratu gogorreko beste komunitate batzuk	31
3.4.3. Substratu biguneko makroornogabe bentikoak	31
3.4.4. Arrainak	32
3.5. Adierazle berriak	35
<b>4. Joerak klima-aldaketari edo beste faktore batzuei egozteko atribuzio-analisisa</b>	<b>35</b>
4.1. Olatuen muturreko gertakariak eta kostaldeko higadura handitzea	35
4.1.1. Patroi atmosferikoen eta olatuen arteko erlazioa	35
4.1.2. Kostaldeko higaduraren inpaktua	39
4.2. Aldaketak ur-zutabearen egituran eta produkzio primarioan	41
4.3. Itsasoaren berotzea eta inplikazioak itsas baliabideei dagokienez	44
<b>5. Ondorioak</b>	<b>47</b>
<b>Adierazleetan behatutako joerak</b>	<b>50</b>
<b>Glosarioa</b>	<b>54</b>

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>5</b>
2.1. Análisis de series temporales de los indicadores de cambio climático en medio marino y costero	7
2.2. Análisis de la atribución de las tendencias al cambio climático u otros factores	8
<b>3. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático</b>	<b>9</b>
3.1. Indicadores fisicoquímicos marinos	9
3.1.1. Temperatura del mar	9
3.1.2. Salinidad	11
3.1.3. Termoclina, estratificación y capa de mezcla invernal	12
3.1.4. Oxígeno	16
3.1.5. Nutrientes inorgánicos disueltos	17
3.1.6. Nivel del mar	18
3.1.7. Oleaje	20
3.2. Indicadores atmosféricos e hidrológicos	23
3.3. Indicadores geomorfológicos de erosión costera	23
3.3.1. Área supramareal e intermareal	24
3.3.2. Anchura media de la playa	25
3.4. Indicadores biológicos y del ecosistema marino	26
3.4.1. Fitoplancton	27
3.4.2. Macroalgas y otras comunidades de sustrato duro	31
3.4.3. Macroinvertebrados bentónicos de sustrato blando	31
3.4.4. Peces	32
3.5. Nuevos indicadores	35
<b>4. Análisis de atribución de las tendencias al cambio climático u otros factores</b>	<b>35</b>
4.1. Aumento de eventos extremos de oleaje y erosión costera	35
4.1.1. Relación entre los patrones atmosféricos y el oleaje	35
4.1.2. Impacto en la erosión costera	39
4.2. Cambios en la estructura de la columna de agua y la producción primaria	41
4.3. Calentamiento del mar e implicaciones en los recursos marinos	44
<b>5. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>Tendencias observadas en los indicadores</b>	<b>50</b>
<b>Glosario</b>	<b>54</b>

## 1. Sarrera

Ozeanoek funtsezko zeregina dute klima erregulatzeko orduan, eta, beraz, klima-aldaketaren modulazioan. Beroa eta karbono dioxidoa (CO<sub>2</sub>) xurgatzeko eta birbanatzeko duen gaitasunaren ondorioa da hori. Kalkulatzen da berotegi-efektuko gasek Lurrean harrapatutako gehiegizko beroaren % 90 inguru ozeanoetan metatzen dela (Abram et al., 2019; Cheng et al., 2019; von Schuckmann et al., 2020; Foster et al., 2022). Atmosferara askatutako CO<sub>2</sub> biltegitratzeko eta banatzeko ahalmenaren ondorioz, ozeanoa Lurreko bigarren karbono-hustulekua da (jatorri antropogenikoko CO<sub>2</sub>-aren % 20-30 inguruko xurgapena) (Gruber et al., 2019; Friedlingstein et al., 2020). Hala ere, xurgapen horiek aldaketak eragiten dituzte ozeanoan, hala nola berotzea, itsas mailaren igoera, desoxigenazioa, estratifikazioa areagotzea eta zirkulazio-aldaketak, kostaldeko ekaitzak edo azidotzea. Horrek guztiak ondorio garrantzitsuak ditu biodibertsitatean eta itsas bizitzan, hala nola aldaketak espezieen banaketan edo fenologian, arrantza-intereseko espezieetan aldaketak egitea barne. Kostaldeko populazioek ere handitu egingo dute kostaldeko uholdeek edo hondartzen higadurak eragindako kalteen arriskua.

UNESCOk Garapen Jasangarrirako Ozeanoen Zientziarako Nazio Batuen Hamarkada (2021-2030) bideratu zuen, ezagutzak sortu eta erabiltzeko misioarekin, ozeanoa garbia, osasungarria eta erresistentea, auresan bezalako, segurua, modu jasangarrian ustiatua, gardena eta irisgarria izan dadin (Ryabinin et al., 2019; UNESCO, 2020). Helburu horien lorpenak prozesu ozeanikoei eta klima-aldaketak eskualde-eskalan duen inpaktuari buruzko ezagutza hobetzea izan behar du oinarri, eta arintze-eta egokitzapen-neurri espezifikoak proposatzeko aukera emango du ezagutza horrek. Horretarako, monitorizazio- eta jarraipen-sistema integratuak behar dira, denboran zehar jarraituak, funtsezko aldagai ozeanografiko desberdinen denbora-serie luzeak emateko. Monitorizazio horrek aukera emango du zehazteko egoera, dinamika, aldakortasuna eta bilakaera, baita aldaketak eta horien arrazoiak detektatzeko eta klima-aldaketaren agertokietan aldaketen iragarpen- eta proiektzio-ereduak hobetzeko ere.

## 1. Introducción

Los océanos desempeñan un papel fundamental en la regulación del clima y por tanto en la modulación del cambio climático. Esto se debe a su capacidad de capturar y redistribuir calor y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se estima que aproximadamente el 90% del exceso de calor de la Tierra que es atrapado por los gases de efecto invernadero se acumula en los océanos (Abram et al., 2019; Cheng et al., 2019; von Schuckmann et al., 2020; Foster et al., 2022). La capacidad de almacenamiento y distribución del CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera, hace que el océano sea el segundo sumidero de carbono de la Tierra (absorción cercana al 20-30 % del CO<sub>2</sub> de origen antropogénico) (Gruber et al., 2019; Friedlingstein et al., 2020). Sin embargo, estas absorciones provocan cambios en el océano como su calentamiento, subida del nivel del mar, desoxigenación, intensificación de la estratificación y cambios en la circulación, tormentas costeras o la acidificación. Todo ello tiene importantes consecuencias sobre la biodiversidad y vida marina, en forma de cambios en la distribución de especies o su fenología, incluyendo cambios en las especies de interés pesquero. Las poblaciones costeras también verán incrementado el riesgo de daños por inundación costera o erosión de playas.

La UNESCO proclamó el Decenio de las Naciones Unidas para la Ciencia de los Océanos para el Desarrollo Sostenible (2021-2030) con la misión de producir y utilizar los conocimientos para un océano limpio, saludable y resistente, predicho, seguro, explotado de manera sostenible y productivo, transparente y accesible (Ryabinin et al., 2019; UNESCO, 2020). La consecución de estos objetivos debe basarse en un mejorar conocimiento sobre los procesos oceánicos y el impacto del cambio climático a una escala regional, conocimiento que permita proponer medidas de mitigación y adaptación específicas. Para ello, son necesarios sistemas de monitorización y seguimiento integrados, continuos en el tiempo, que faciliten largas series temporales de distintas variables oceanográficas esenciales. Esta monitorización permitirá determinar el estado, dinámica, variabilidad, evolución, la detección de cambios y sus causas y la mejora de los modelos de predicción y proyección de cambios bajo escenarios de cambio climático.

Hori da Naturklimaren itsasoko eta kostaldeko behatokiaren helburua, **klima-aldaketaren eta haren efektuen jarraipen-sistema integratua izatea, klima-aldaketaren adierazle batzuk monitorizatzu**. Hori funtsezkoa da arriskuei aurrea hartu eta Gipuzkoako kostaldean egin beharreko egokitzapen irizpideak definitu ahal izateko. Horrekin, Gipuzkoako Klima Aldaketaren Aurkako Borroka Estrategia, Gipuzkoa Klima 2050en hiru jomugari lagundu nahi zaie:

- 3. jomuga: Lurraldearen efizientzia eta erresiliencia areagotzea. Zehazki, honako jarduketa lerro hau: 3.3 “Klima-aldaketa integratzea hondartzan, estuarioen eta dunen kudeaketan”.
- 4. jomuga: Natura-ingurunearen erresiliencia handitzea.
- 7. jomuga: Arriskuei aurrea hartzea. 7.2 ekintza (“Arriskuen kartografia, modelizazioa eta monitorizazioa eguneratzea eta hobetzea”) eta 7.3 ekintza (“Klima-aldaketak lurraldean dituen inpaktuen monitorizazioa eta jarraipena”).

Este es el objetivo del observatorio marino-costero de Naturklima, ser **un sistema integrado de seguimiento del cambio climático y sus efectos, a través de la monitorización de una serie de indicadores de cambio climático**. Esto es clave para poder anticiparnos a los riesgos y definir los criterios de adaptación que deban llevarse a cabo en la costa guipuzcoana. Con ello, se pretende además contribuir a tres de las metas de la Estrategia guipuzcoana de Lucha Contra el Cambio Climático, Gipuzkoa Klima 2050:

- Meta 3: Incrementar la eficiencia y resiliencia del territorio. En concreto a la línea de actuación 3.3 “Integrar el cambio climático en la gestión de playas, estuarios y dunas”.
- Meta 4: Aumentar la resiliencia del medio natural.
- Meta 7: Anticipación de los riesgos. Acción 7.2 “Actualizar y mejorar la cartografía, modelización y monitorización de riesgos” y Acción 7.3 “Monitorización y seguimiento de los impactos del cambio climático sobre el territorio”.

## 2 Metodologia

Gipuzkoako klima-aldaketaren itsasertzeko behatokiaren helburua klima-aldaketaren adierazleen jarraipena eta analisisa egitea da. Horretarako, bi adierazle-mota definitu dira: (1) klima-sistemaren egoera fisikoa eta haren bilakaera historikoa deskribatzen dituztenak, eta (2) inpaktuak, arriskua eta egokitzapena deskribatzen dituztenak. Klima-aldaketaren 19 adierazle identifikatu dira guztira Gipuzkoako kostalderako, klima-aldaketaren ondorioz alda daitezkeen aldagai fisiko-kimikoak, geomorfologikoak eta biotikoak barne. Horiek guztiek ere gure itsasoaren egoeraren irudi globala ematen dute, eta joerak eta aldaketak detektatzeko modua ematen dute.

## 2. Metodología

El observatorio marino-costero de cambio climático de Gipuzkoa tiene como objetivo el seguimiento y análisis de indicadores del cambio climático. Para ello, se han definido dos tipos de indicadores, (1) los que describen el estado físico del sistema climático y su evolución histórica, y (2) los que describen impactos, riesgo y adaptación. Se han identificado un total de 19 indicadores de cambio climático para la costa de Gipuzkoa, incluyendo variables fisicoquímicas, geomorfológicas y bióticas que pueden variar como consecuencia del cambio climático. Todos ellos también proporcionan una imagen global del estado de nuestro mar y permiten detectar tendencias y cambios.

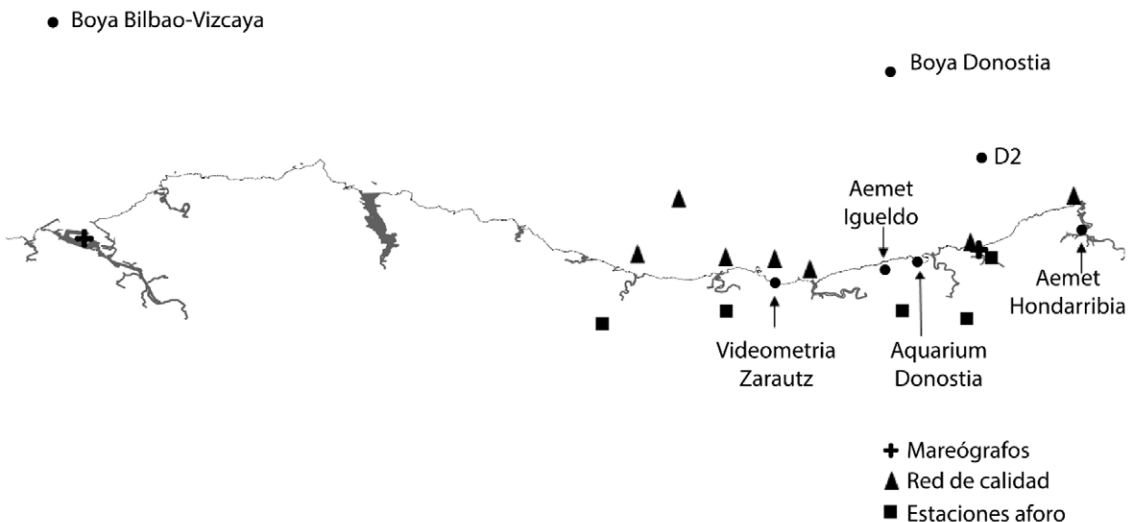
<b>Klima-aldaketaren adierazleak</b> Indicadores de cambio climático	<b>Itsasoko tenperatura</b>	Temperatura del mar
	<b>Gazitasuna</b>	Salinidad
	<b>Oxigenoa</b>	Oxígeno
	<b>Mantenugai ez-organikoak</b>	Nutrientes inorgánicos
	<b>Itsas maila</b>	Nivel del mar
	<b>Olatuak</b>	Oleaje
	<b>Airearen tenperatura</b>	Temperatura del aire
	<b>Intsolazioa eta eguzki-orduak</b>	Insolación y horas de sol
	<b>Haizearen norabidea eta abiadura</b>	Dirección y velocidad del viento
	<b>Prezipitazioa</b>	Precipitación
	<b>Ibai-emia estuarioan</b>	Caudal fluvial en estuario
<b>Klima-aldaketaren inpaktuaren adierazleak</b> Indicadores del impacto del cambio climático	<b>Kosta-lerroa</b>	Línea de costa
	<b>Hondartzen morfologia</b>	Morfología de playas
	<b>Bakterioak eta pikoeukariotoak</b>	Bacterias y picoeucariotas
	<b>Fitoplanktona</b>	Fitoplancton
	<b>Makroalgak</b>	Macroalgas
	<b>Makroornogabeak</b>	Macroinvertebrados
	<b>Arrainak</b>	Peces
<b>Klima-aldaketaren aurkako erresilientziaren adierazleak</b> Indicadores de resiliencia al cambio climático	<b>Kosta-lerroa</b>	Línea de costa
	<b>Hondartzen morfologia</b>	Morfología de playas
	<b>Makroalgak</b>	Macroalgas
	<b>Makroornogabeak</b>	Macroinvertebrados
	<b>Arrainak</b>	Peces

1. 1. ird. Gipuzkoako Itsasertzeko Behatokiaren adierazleak, ematen duten informazioaren arabera sailkatuta.

1. Fig. Indicadores del Observatorio marino-costero de Gipuzkoa, clasificados en función de la información que proporcionan.

Adierazle desberdinak kalkulatzeko, plataforma kontinentalean egindako behaketa-multzo zabal batean oinarritzen da, hala nola buia ozeanografi-koek edo mareografoek egindako denbora errealeko neurketak, zenbait erakundek jasotakoak –Estatuko Portuek, Ozeanografiaren Espainiako Institutuak, Eusko Jaurlaritzaren Larrialdiei Aurre Egiteko eta Meteorologiako Zuzendaritzak eta BIMEP-EVEk-. Denbora ia-errealeko behaketen multzo hori *in-situ* egindako neurketekin osatzen da, hala nola AZTIk egindako “Aldakuntzak” proiektuari lotutako kanpainetan, arrantza-stocken ebaluazio-kanpainetan edo EAeko Egoera Ekologikoaren Kalitate Sarearen bitartez egindakoekin, hain zuzen. Gainera, AEMETen azaleko behaketa meteorologikoen sareko datuak erabiltzen dira, baita Ingurumena eta Obra Hidraulikoak Departamentuaren Ingurumen Zuzendaritza Nagusiko Itsasertzeko Bideometria Foru Sarekoak, Ingurumena eta Obra Hidraulikoak Departamentuaren Ingurumen Zuzendaritza Nagusiko estazio iraunkorren sarekoak, satellite-irudiak (hainbat sensore eta orbita polarreko satellite, NOAA-AVHRR, MODIS-AQUA, MODIS-TERRA, VIIRS, ASEAWIFS, MSRE, Sentinel-3, ESA/NASA, ESA-CCI-SEASTATE, CERSAT, CEDA) eta berranalisi-datuak ere (Estatuko Portuetako SIMAR, IBI-MFC - CMEMS eta GOW - IHCantabria).

El cálculo de los distintos indicadores se basa en un amplio conjunto de observaciones realizadas sobre la plataforma continental, como las mediciones en tiempo real realizadas por boyas oceanográficas o mareógrafos recogidas por distintas entidades como Puertos del Estado, el Instituto Español de Oceanografía, la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología del Gobierno Vasco o BIMEP-EVE. Este conjunto de observaciones en tiempo casi-real se complementa con medidas *in-situ* recogidas durante campañas como las asociadas al proyecto ‘Variaciones’ realizadas por Azti, campañas de evaluación de stocks pesqueros o la Red de Calidad del Estado Ecológico de la CAPV. Además, se utilizan datos de la red de observaciones meteorológicas en superficie de AEMET, la Red Foral de Videometría costera de la Dirección General de Medio Ambiente - Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas, la Red de estaciones permanentes de la Dirección de Obras Hidráulicas también del Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas, imágenes de satélite (varios sensores y satélites de órbita polar, NOAA-AVHRR, MODIS-AQUA, MODIS-TERRA, VIIRS, ASEAWIFS, MSRE, Sentinel-3, ESA/NASA, ESA-CCI-SEASTATE, CERSAT, CEDA) y datos de reanálisis (SIMAR de Puertos del Estado, IBI-MFC de CMEMS, GOW de IH Cantabria).



2. ird. Aldagai fisiko-kimiko eta biologikoen jarraipen-programa nagusiak; bertan biltzen diren datuetatik eratoritzen dira klima-aldaketa adierazleak.

2. Fig. Principales programas de seguimiento de variables físico-químicas y biológicas que recogen las variables a partir de los cuales se derivan los indicadores de cambio climático.

Adierazle bakoitzaren analisirako metodologia zehatz bat aplikatu da, aldagai bakoitzaren eta datuen eskuragarritasunaren arabera, adierazlearen denboran zeharreko aldakuntza posibleak ezartzeko, baita aldakuntza horien eta gure eremuari dagokion klima-aldaketaren arteko harremana ere. Gainera, detektatutako joeren balizko kausak aztertu dira, klima-aldaketa beste kausa posible batzuetatik bereizteko.

## 2.1. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisia itsas ingurunean eta kostaldean

Klima-aldaketaren adierazleen analisia espezifikoa da aldagai-mota bakoitzerako, eta denbora-eta espazio-dimentsio desberdinetan erabilgarri dauden datuen arabera da. Hala ere, azterketan erabilitako metodo guztien helburua da aztertutako adierazlea denboran zehar aldatzen den eta aldakuntza hori gure eremuari dagokion klima-aldaketarekin lotuta ote dagoen zehaztea. Klima-aldaketarekin izan daitekeen harremanaren zantzuak denboran zeharreko joera linealaren arabera ezarri dira, eta/edo kasuan kasuko aldagaiak klima-aldaketarekin zuzeneko lotura duen aldagaiarekin duen harremanaren arabera.

Denboran zeharreko joera-analisia Eredu Gehigarri Orokorren (GAMs) bidez egin da (Simpson, 2018). Eredu horiek datu irregularretarako egokitutako metodoak dira, autokorrelazioa, ziklo konplexuak edo argi definitu gabeak dituztenak, eta denbora-serieak aztertzeke aukera ematen dutenak. Joera kalkulatzeko, eredu gehigarri bat hartzen da; hau da, edozein aldagai deskonposa daiteke denboran zeharreko joera linealean, gorabehera ziklikoetan eta datua lortzean sortutako errorean. Eredu horiek adierazle bakoitzerako egokitu dira, datu-motaren, aldagaiaren eta analisiaren helburuaren arabera –hala nola batezbestekoaren analisia, muturreko gertakarien joeraren analisia edo komunitatearen osaera espezifikoko aldaketen analisia–.

Para el análisis de cada uno de los indicadores se ha aplicado una metodología específica en función de la variable y de la disponibilidad de datos, con el objetivo de establecer posibles variaciones temporales del indicador y la relación de estas variables con el cambio climático correspondiente a nuestra zona. Además, se han analizado las posibles causas de las tendencias detectadas, para diferenciar el cambio climático de otras posibles causas.

## 2.1. Análisis de series temporales de los indicadores de cambio climático en medio marino y costero

El análisis realizado de los indicadores de cambio climático es específico para cada tipo de variable y función también de los datos disponibles en las diferentes dimensiones temporal y espacial. No obstante, todos los métodos empleados en el estudio tienen como objetivo establecer si el indicador analizado varía en el tiempo y si esa variación está relacionada con el cambio climático correspondiente a nuestra zona. Los indicios de la posible relación con el cambio climático se han establecido con una tendencia lineal en el tiempo y/o con una relación de la variable en cuestión con la variable climática más directamente asociada al cambio climático.

El análisis de tendencia en el tiempo se ha realizado mediante Modelos Aditivos Generalizados (GAMs) (Simpson, 2018). Estos modelos son métodos adaptados para datos irregulares, que presentan autocorrelación, con ciclos complejos o no definidos claramente que permiten analizar series temporales. Para el cálculo de la tendencia se asume un modelo aditivo, esto es, que cualquier variable se puede descomponer en una tendencia lineal en el tiempo, fluctuaciones cíclicas y un error de obtención del dato. Estos modelos se han adaptado para cada indicador en función del tipo de dato, variable y objetivo del análisis, como análisis del promedio, análisis de tendencias de eventos extremos o análisis de cambios en la composición específica de la comunidad.

## 2.2. Joerak klima-aldaketari edo beste faktore batzuei egozteko atribuzio-analisia

Klima-aldaketaren adierazleetan behatutako joeren balizko arrazoiak aztertu dira, klima-aldaketa beste kausa posible batzuetatik bereizteko (klima ozeanikoaren aldakortasun naturala edo jatorri antropogenikoko arrazoiak, hala nola arrantza eta kutsadura), teknika estatistikoak erabiliz (adibidez, eredu gehigarri orokor mistoak, joera-aldaketen analisia, metodo korrelatiboak), baita sistemen modelizazio mekanikorako teknikak ere. Analiak hiru adierazle-multzo hauei esleitzea izan du ardatz:

- Olatuen eta kostaldeko higaduraren muturreko gertakarien gorakada: olatuetan behatutako joeraren eta atmosferako behartzeen arteko harremanaren analisia, baita olatuen eta hondartzen higaduraren arteko harremanarena ere.
- Aldaketak ur-zutabearen egituran eta produkzio primarioan: neguko nahaste-geruzaren aldaketek (sakontzea) fitoplanktonaren biomasan duten efektuen analisia haren urtaro-zikloan zehar.
- Itsasoaren berotzea eta ekosisteman eta itsas baliabideetan dituen inplikazioak: berotzearen efektuaren analisia bentoseko kostaldeko komunitateen birbanaketaren joera behatuei dagokionez, baita azken bi hamarkadetan detektatutako antxoaren neurriaren murrizketari dagokionez ere.

## 2.2. Análisis de la atribución de las tendencias al cambio climático u otros factores

Se han analizado las posibles causas de las tendencias observadas en indicadores de cambio climático, para diferenciar el cambio climático de otras posibles causas (variabilidad natural del clima oceánico o causas de origen antropogénico como pesca, polución), a través del uso de técnicas estadísticas (por ej., modelos aditivos generalizados mixtos, análisis de cambios de tendencia, métodos correlativos) y de modelización mecánica de los sistemas. El análisis se ha centrado en la atribución de causas de tres grupos de indicadores:

- Aumento de eventos extremos de oleaje y erosión costera: análisis de la relación entre la tendencia observada en el oleaje con los forzamientos atmosféricos, y la relación entre el oleaje y la erosión de playas.
- Cambios en la estructura de la columna de agua y la producción primaria: análisis del efecto de cambios (profundización) en la capa de mezcla invernal en la biomasa del fitoplancton a lo largo de su ciclo estacional.
- Calentamiento del mar e implicaciones en el ecosistema y recursos marinos: análisis del efecto del calentamiento en las tendencias observadas en la redistribución de las comunidades costeras del bentos y en la disminución de la talla de la anchoa detectada en las dos últimas décadas.



### 3. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisia

### 3. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático

#### 3.1. Itsasoko adierazle fisiko-kimikoak

#### 3.1. Indicadores fisicoquímicos marinos

##### 3.1.1. Itsasoko temperatura

##### 3.1.1. Temperatura del mar

Ozeanoak berotzen aritu dira hamarkadatan berotegi-efektuko gasen isuriak areagotu direlako; izan ere, ozeanoek Lurrean metatutako beroaren % 90 inguru xurgatzen eta biltegitratzen dute (Abram et al., 2019; Cheng et al., 2019; von Schuckmann et al., 2020; Foster et al., 2022; Johnson & Lumpkin, 2022). Horren guztiaren ondorioz, itsasoko tenperaturaren denbora-serieen analisia funtsezko klima-adierazlea da.

Los océanos han estado calentándose durante décadas debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero ya que los océanos absorben y almacenan alrededor del 90 % del calor acumulado en la Tierra (Abram et al., 2019; Cheng et al., 2019; von Schuckmann et al., 2020; Foster et al., 2022; Johnson & Lumpkin, 2022). Por ello, el análisis de las series temporales de temperatura del mar constituye un indicador climático fundamental.

Temperatura, gainera, ekosistemen ikuspegi-tik garrantzi handia duen aldagai ozeanografikoa da. Izan ere, honako hauek baldintzatzen ditu: espezieen biziraupena, banaketa eta metabolismoa, itsaslasterrak, mantenugaien ekarpena azaleko geruzetan, itsas maila eta gas-trukea atmosferarekin, uren azidotzea eta oxigenazioa kontrolatzen dituena.

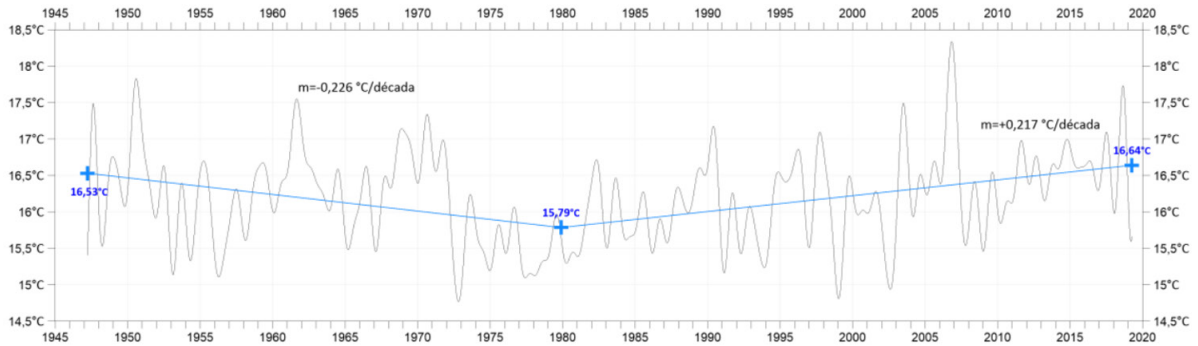
La temperatura es, además, una variable oceanográfica de gran importancia ecosistémica. Ello se debe a que condiciona la supervivencia, la distribución y metabolismo de especies, las corrientes oceánicas, el aporte de nutrientes a las capas superficiales, el nivel del mar y el intercambio de gases con la atmósfera, que controla la acidificación y oxigenación de las aguas.

Eskala globalean ozeanoaren azaleko tenperaturak  $0,10 \pm 0,01$  °C-ko igoera-tasa du hamarkada bakoitzeko 1950etik 2021era bitartean (Johnson & Lumpkin, 2022). Berotze hori, gainazalean areagotuta egon arren, sakonera guztietara zabaltzen da (Cheng et al., 2020; Meinen et al., 2020).

A escala global la temperatura superficial del océano presenta una tasa de ascenso de  $0,10 \pm 0,01$  °C por década entre 1950 y 2021 (Johnson & Lumpkin, 2022). Este calentamiento, aunque intensificado en la superficie, se extiende a todas las profundidades (Cheng et al., 2020; Meinen et al., 2020).

Donostiako Aquariumean 1946–2020 aldian neurtutako itsasoko uraren azaleko tenperaturak goranzko joera du 1980tik,  $0,249 \pm 0,034$  °C-koa hamarkada bakoitzeko.

La temperatura superficial del agua de mar medida en el Aquarium de Donostia-San Sebastián en el periodo 1946–2020 presenta una tendencia creciente desde 1980,  $0,249 \pm 0,034$  °C por década.

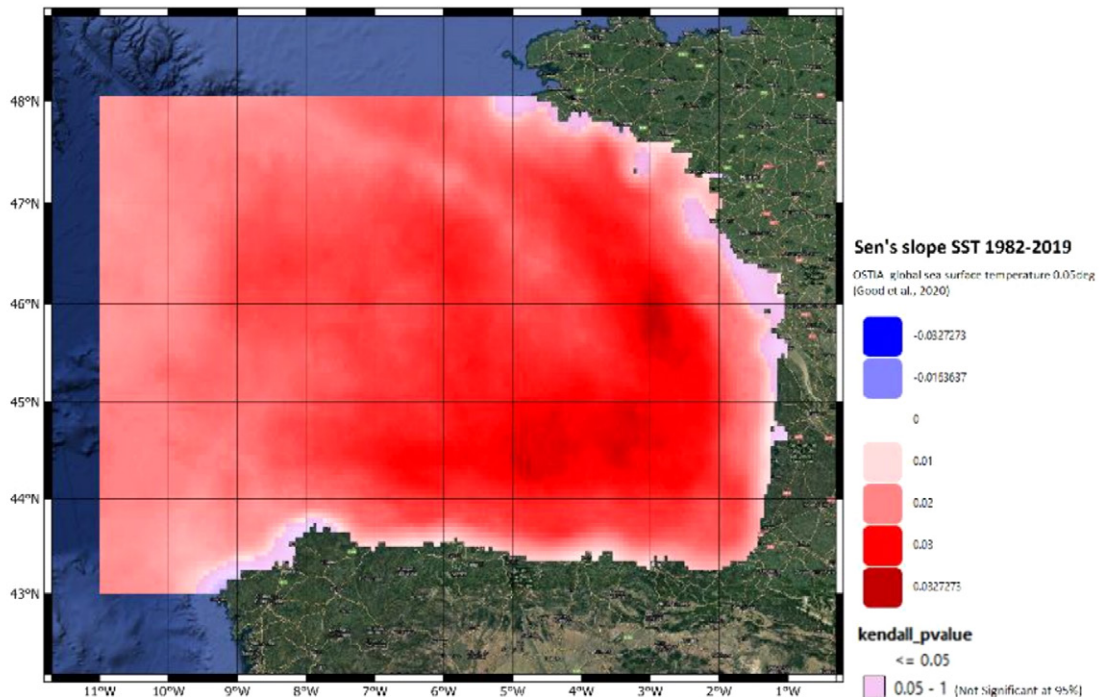


3. ird. Donostiako Aquariumeko uraren azaleko temperatura denbora-seriearen hasieratik gaur egunera arte (1946–2020). Datu iragaziak ( $T < 1$  urte gabe) eta joera-aldaketaren analisia.

3. Fig. Temperatura superficial del agua en el Aquarium de Donostia-San Sebastián desde el inicio de la serie temporal hasta la actualidad (1946–2020). Datos filtrados (sin  $T < 1$  año) y análisis del cambio de tendencia.

Bizkaiko golkoan eta Gipuzkoako kostaldean itsasoaren berotze graduala nabaritzen da, 80ko hamarkadatik aurrera izandako klima-aldaketari lotuta dagoena. Sakoneraren eta kokapenaren arabera, berotze-tasak 0,16 °C eta 0,25 °C bitartekoak dira hamarkada bakoitzeko, eta berotzerik handiena azaleko geruzetan gertatzen da.

En el golfo de Vizcaya y las costas guipuzcoanas se aprecia un calentamiento del mar gradual asociado al cambio climático a partir de los años 80. Dependiendo de la profundidad y localización, las tasas de calentamiento oscilan entre 0,16 °C y 0,25 °C por década, siendo el calentamiento más intenso en las capas superficiales.



4. ird. Bizkaiko golkoko SSTren joerak 1982–2019 aldian.

4. Fig. Tendencias en la SST del golfo de Vizcaya en el periodo 1982–2019.

Horrela, adibidez, 1980az geroztik Donostiako Aquariumean ikusitako berotze-tasa  $0,249 \pm 0,034$  °C-koa da hamarkada bakoitzeko; Pasaia pareko kostaldeko estazioko (Pasaitik 13,1 km ingurura dagoeneko) ur-zutabearen lehen 100 m-etako tenperaturak, berriz,  $0,16 \pm 0,04$  °C-ko goranzko joera esanguratsua du. Tasa horiek aurretiazko azterlanetan detektatutako joerak berresten dituzte (Valencia et al., 2004; Goikoetxea et al., 2009; González et al., 2008; Costoya et al., 2015).

Uraren azaleko temperatura Bizkaiko golko osoan handitzen ari da, baina tasa altuagoekin ( $0,3$  °C hamarkada bakoitzeko) haren hego-mendebaldean. Euskal kostaldeko berotze handiago hori azal liteke lehorreko ingurunearen eta plataforma kontinentalaren eraginez, eta, beraz, klima-aldaketaren adierazle nagusia den airearen berotzearen ondorioz (IPCC-AR5, 2013).

### 3.1.2. Gazitasuna

Gazitasuna aldaketa globalaren zeharkako aldagaia da. Aipatu behar da gatz-kantitatea ia konstante mantentzen dela maila globalean, eta, beraz, balitekeela horren aldakuntzak glaziarren eta izotz kontinentalaren desizozteak gehitutako ur gezaren aldaketetatik etortzea nagusiki. Izotzaren azalera osoa eta elur-estaldura berotze globalarekin murriztu ahala, ozeanoei ur geza gehitzen zaie; horrek aldaketak eragiten ditu itsasoko gazitasunean (IPCC-AR5, 2013). Ozeanoko gazitasunaren patroiak ur gezaren azaleko fluxuaren patroia islatzen du, lurruntzearen, prezipitazioaren eta nahastearen arteko balantzearen ondorio dena. Berotze-maila handiagoarekin -eta, beraz, ziklo hidrológicoaren intentsitate handiagoarekin- gazitasun-patroiak areagotu egingo direla espero da, gaur egun lurruntze garbia jasaten ari diren eremuen gazitasuna handituz, eta prezipitazio garbia duten eremuen gazitasuna murriztuz (Rhein et al., 2013).

Gazitasunak eta tenperaturak baldintzatzen dute, nagusiki, itsasoko uraren dentsitatea. Horregatik, gazitasunaren aldaketek eragina dute ur-zutabearen estratifikazioan ere, eta horrek inpaktuak izan ditzake mantenugaien zikloetan eta, ondorioz, baita produkzio primarioan ere. Tenperaturak bezala, gazitasunak eragina du itsasoko espezie eta ekosistema jakin batzuen biziraupenean.

Así, por ejemplo, la tasa de calentamiento observada en el Aquarium de Donostia-San Sebastián desde 1980 es de  $0,249 \pm 0,034$  °C por década, mientras que la temperatura en los primeros 100 m de la columna de agua en la estación costera frente a Pasaia (aproximadamente a 13,1 km de Pasaia) presenta una tendencia creciente significativa de  $0,16 \pm 0,04$  °C. Estas tasas confirman las tendencias detectadas en estudios previos (Valencia et al., 2004; Goikoetxea et al., 2009; González et al., 2008; Costoya et al., 2015).

La temperatura superficial del agua se está incrementando en todo el golfo de Vizcaya, pero con tasas más altas ( $0,3$  °C por década) en el suroeste del mismo. Este mayor calentamiento en la costa vasca podría explicarse por la influencia terrestre y de la plataforma continental y, por tanto, por el calentamiento del aire, principal indicador de cambio climático (IPCC-AR5, 2013).

### 3.1.2. Salinidad

La salinidad es una variable indirecta del cambio global. Cabe mencionar que la cantidad de sal a nivel global se mantiene prácticamente constante, por lo que sus variaciones podrían derivar principalmente de cambios en el agua dulce incorporada por el deshielo de los glaciares y el hielo continental. A medida que se reduce la superficie total del hielo y la cubierta de nieve con el calentamiento global, se va incorporando más agua dulce a los océanos, lo que provoca cambios en la salinidad del mar (IPCC-AR5, 2013). El patrón de salinidad en el océano refleja el patrón del flujo de agua dulce en superficie, resultante del balance entre evaporación, precipitación y mezcla. Se espera que, con mayores niveles de calentamiento, y por tanto un incremento de la intensidad del ciclo hidrológico, los patrones de salinidad se intensifiquen, con las áreas que actualmente experimentan evaporación neta evolucionen a ser más salinas, y las áreas con precipitación neta evolucionen a ser menos salinas (Rhein et al., 2013).

La salinidad, junto con la temperatura, determinan fundamentalmente la densidad del agua de mar. Por ello, cambios en la salinidad también tienen efecto en la estratificación de la columna de agua, que puede tener impactos en los ciclos de nutrientes y con ello en la producción primaria. Al igual que la temperatura, la salinidad también influye en la

Ozeanoko geruza azalekoenetako gazitasunaren eskala globaleko behaketek adierazten dute eboluzionatzen duela lurraren ziklo hidrológicoaren intentsitatea eta ozeanoaren azaleraren estratifikazioa handitzearekin (Durack, 2015; Zika, et al., 2018; Gould & Cunningham, 2021). 1960–2017 aldian, ur-zutabearen lehen 2000 metroetan, gazitasuna hamarkada bakoitzeko  $3,8 \pm 2,6 \times 10^{-4} \text{ g kg}^{-1}$  jaitsi egin dela baina espazio-banaketa aldakorra izan dela ikusten da (Cheng et al., 2020). Ipar Atlantikoan behatutako gazitasunaren beherakada bat dator esperotako Atlantiko Meridionalaren Iraultze Zirkulazioaren (AMOC ingelesezko siglen arabera) intentsitatea murriztearekin, ziklo hidrológicoaren aldaketekin eta itsas izotzaren bolumenaren murrizketarekin (Bindoff et al., 2019).

Pasaiaiko kostaldearen parean dagoen D2 estazioan, ur-zutabearen lehen 100 metroetan gazitasunak duen joera negatiboa da 1986–2020 aldian ( $0,049 \pm 0,007$  hamarkada bakoitzeko). Estazio honen ezaugarriak kontuan hartuta (110 m-ko sakonera), zaila da puntu honetako gazitasunaren murrizketa klima-aldaketarekin lotutako eskala globaleko prozesuekin lotzea, hala nola Ipar Atlantikoko latitude altuetako eta Artikoko arroko gazitasunaren murrizketarekin (Bindoff et al., 2019). Ur-zutabearen 100 metroko sakonerarako, prezipitazioaren efektua gazitasun txikiko anomalien zabaltzea baino garrantzitsuagoa izan daiteke; izan ere, sakonera horretan, gure itsasertzerira iritsi zitekeen jatorri subpolarreko ur nagusien seinalea indargetuta agertzen da.

### 3.1.3. Termoklina, estratifikazioa eta neguko nahaste-geruza

Klima-aldaketaren ondorioz ozeanoko geruza azalekoenak berotzeak ur-zutabearen estratifikazio handiagoa eragin dezake (Li et al., 2020), azaleko uren eta geruza sakonagoen arteko nahasketa bertikala murriztuz. Termoklina da tenperatura sakonearekin bat-batean jaisten den trantsizio-eremua, tenperatura homogeneousak dituen goiko geruza bero bat eta sakoneko ur hotz eta trinkoak bereizten dituena. Termoklinaren jarraipenak estratifikazio-zikloak behatzeko aukera ematen du. Termoklina

supervivencia de determinadas especies y ecosistemas marinos.

Las observaciones a escala global de la salinidad en las capas más superficiales del océano indican que evoluciona en relación al incremento de la intensidad del ciclo hidrológico de la tierra y al incremento de la estratificación de la superficie del océano (Durack, 2015; Zika, et al., 2018; Gould & Cunningham, 2021). En el periodo 1960–2017, en los primeros 2000 m de la columna de agua, se observa un descenso en la salinidad de  $3,8 \pm 2,6 \times 10^{-4} \text{ g kg}^{-1}$  por década, aunque con una distribución espacial desigual (Cheng et al., 2020). En el Atlántico Norte, se observa una disminución de la salinidad, consistentes con la esperada disminución de la intensidad de la circulación meridional de vuelco del atlántico (AMOC por sus siglas en inglés), los cambios en el ciclo hidrológico y la disminución del volumen del hielo marino (Bindoff et al., 2019).

En la estación D2 situada frente a la costa de Pasaia, la tendencia de la salinidad en los primeros 100 m de la columna de agua presenta una tendencia negativa ( $0,049 \pm 0,007$  por década) en el periodo 1986–2020. Dada las características de esta estación (profundidad de 110 m) es difícil asociar la disminución de la salinidad en este punto con procesos de escala global relacionados con el cambio climático, como la disminución de la salinidad en latitudes altas del Atlántico Norte y la cuenca del ártico (Bindoff et al., 2019). Para el espesor de la columna de agua de 100 m, el efecto de la precipitación puede ser más importante que la propagación de anomalías de baja salinidad, ya que a esta profundidad la señal de las aguas centrales de origen subpolar que podría llegar a nuestro litoral aparece amortiguada.

### 3.1.3. Termoclina, estratificación y capa de mezcla invernal

El calentamiento de las capas más superficiales del océano debido al cambio climático puede conllevar una mayor estratificación de la columna de agua (Li et al., 2020), reduciendo la mezcla vertical entre las aguas superficiales y las capas más profundas. La termoclina es la zona de transición en la que la temperatura desciende bruscamente con la profundidad, separando una capa superior cálida de temperaturas homogéneas, de las aguas frías y densas en profundidad. El seguimiento de la

adierazteko metodo oso zabaldua da isoterma jakin baten sakontzea erabiltzea. Bizkaiko Golkoko hego-ekialdean estratifikazioaren bilakaeraren aldi baterako indize gisa 14 °C-ko isotermaren murgiltze-sakontzea erabili da (Valencia et al., 2004; 2019). Neguko nahaste-geruzak atmosfera-ozeano sistema akoplatuaren interakzio-sakonera maximoa adierazten du; geruza horretan turbulenzia aktiboa dago, eta bere sakonerak nahasketa bertikal horren intentsitatea adierazten du.

Itsasoaren berotzeak ur-zutabearen estratifikazio handiagoa eragin dezake. 1960az geroztik, estratifikazioa handitu egin da eskala globalean ur-zutabearen lehen 2000 metroetan (Li et al., 2020). Eremu tropikalagoetan, ur-zutabearen estratifikazioak (Li et al., 2020) eragin negatiboa izan dezake itsas fitoplanktona hazteko mantengaien eskuragarritasunean (Steinacher et al., 2010, Bopp et al., 2013, Chust et al., 2014), nahiz eta zenbait egilek prozesu hori zalantzan jartzen duten (Dave & Lozier, 2013). Ozeano irekiko eremu tropikalekin alderatuta, nahasketa handiko eremuetan (eremu subartikoetan), estratifikazioaren igoera horrek produkzio primarioari lagun diezaioke. Itsas sare trofiko bi osagai nagusi horien kantitate global txikiagoak zenbait eskualdetako arrainen biomasa murriztu lezake, bereziki eremu tropikaletan (Steinacher et al., 2010) eta aplikazio trofiko efektuak sor ditzake (Chust et al., 2014).

Bizkaiko golkoan, nahaste-geruzaren sakontzea ikusi da 2000ko erdialdetik; horrek esan nahi du posible dela aurrez gainazalean metatutako anomalia termiko eta hidrikoak sartu izana atmosferaren efektutik isolatuta egon ohi diren sakontasun-mailetan (Somavilla et al., 2017; Valencia et al., 2019). Beraz, estratifikazioak ez du nahitaez handitu behar klima-aldaketaren agertoki batean (González-Pola et al., 2012). Neguan nahaste-geruzaren lodiera handiagoaren beste inplikazioetako bat da geruza sakonen mantengaien ekarpen handiagoa azaleko eremu fotikoari, eta horrek udaberriko "bloom" ari laguntzen dio (Valencia & Franco, 2004; Somavilla et al., 2017; González-Gil et al., 2018; Valencia et al., 2019).

Termoklinaren sakoneraren denbora-serieak eta ur-zutabearen estratifikazio-mailaren serieak aztertu dira Pasaia pareko D2 estazioko lehen 100 metroetan 1993-2020 aldian. Zehazki, bost aldagai

termoclina permite el seguimiento de los ciclos de estratificación. El uso de la profundización de una determinada isoterma para representar la termoclina es un método muy extendido. En el sureste del golfo de Vizcaya se ha utilizado como índice temporal de la evolución de la estratificación la profundización de inmersión de la isoterma de 14 °C (Valencia et al., 2004; 2019). La capa de mezcla invernal indica la máxima profundidad de interacción del sistema acoplado atmósfera-océano, es una capa donde hay una activa turbulencia y su profundidad indica la intensidad de esta mezcla vertical.

El calentamiento del mar puede conllevar una mayor estratificación de la columna de agua. Desde 1960, se observa a escala global un incremento de la estratificación en los primeros 2000 m de la columna de agua (Li et al., 2020). En zonas más tropicales, la estratificación de la columna de agua (Li et al., 2020) puede afectar negativamente la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento del fitoplancton marino (Steinacher et al., 2010, Bopp et al., 2013, Chust et al., 2014), si bien hay ciertos autores que ponen en duda dicho proceso (Dave & Lozier, 2013). En contraste con las zonas tropicales del océano abierto, en zonas con mucha mezcla (zonas subárticas), dicho incremento de la estratificación puede favorecer la producción primaria. La menor cantidad global de estos dos componentes principales de la red trófica marina podría reducir la biomasa de los peces en ciertas regiones, especialmente en las zonas tropicales (Steinacher et al., 2010) y producir efectos de amplificación trófica (Chust et al., 2014).

En el golfo de Vizcaya, desde mediados del 2000 se ha observado su profundización de la capa de mezcla, indicando la posible integración de las anomalías térmicas e hídricas previamente acumuladas en superficie a niveles de profundidad que habitualmente están aislados del efecto de la atmósfera (Somavilla et al., 2017; Valencia et al., 2019). Esto indica que la estratificación no necesariamente tiene que aumentar en un escenario de cambio climático (González-Pola et al., 2012). Otra de las implicaciones del mayor espesor de la capa de mezcla en invierno es un mayor aporte de nutrientes de las capas profundas a la zona fótica superficial, que favorece el "bloom" primaveral de fitoplancton (Valencia & Franco, 2004; Somavilla et al., 2017; González-Gil et al., 2018; Valencia et al., 2019).

aztertu dira: 14 °C-ko isotermaren sakonera (urte osoan), 14 °C-ko isotermaren sakonera (hura dagoen hilabeteetan, apiriletik abenduaren erdialdera), estratifikazio termikoa, estratifikazio termohalinoa eta neguko nahaste-geruzaren gehieneko sakonera (urtarrila-martxo, 1986-2020).

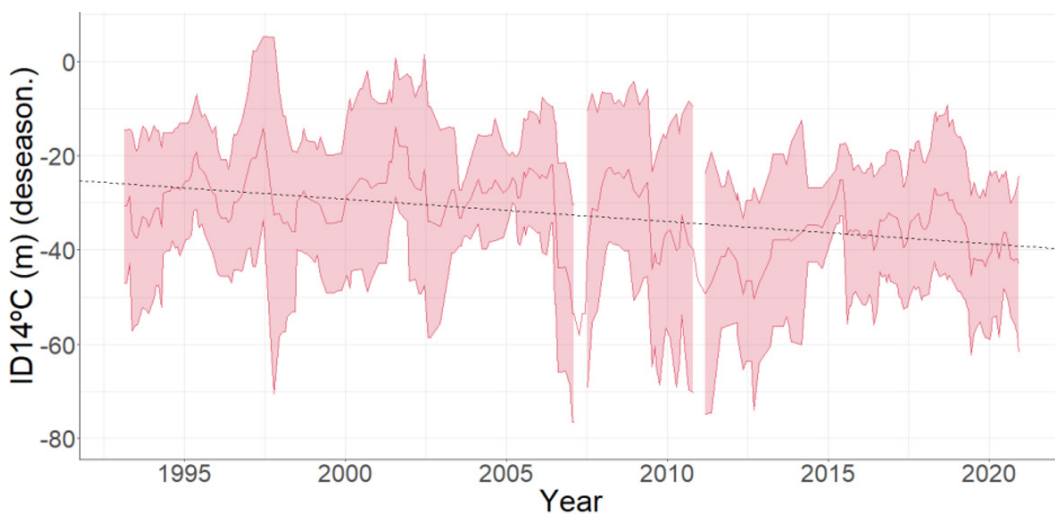
Aztertutako aldagaietatik, 14 °C-ko isotermaren sakonerak soilik du joera esanguratsu negatiboa, hau da, sakontzen ari da ( $-4,7134 \pm 1,9337$  m hamar-kada bakoitzeko). Valencia et al.-ek (2004, 2019) ondorioztatu zuten adierazitako termoklina 2007-2017 aldian sakondu zela 1986-2006 aldiarekin alderatuta, 2006ko udazkenean eta 2007ko neguan zehar oso baldintza beroak nagusitu zirelako. Aldi horretan bertan hondoratze-gertakarien maiztasuna eta intentsitatea handitzeak aurrez metatutako bero-edukia ur-zutabeen sartu zuen.

Se han analizado las series temporales de la profundidad de la termoclina y del grado de estratificación de la columna de agua en los primeros 100 m en la estación D2 frente a Pasaia durante el periodo 1993-2020. En concreto, se han analizado cinco variables: profundidad de la isoterma de 14 °C (todo el año), profundidad de la isoterma de 14 °C (en los meses en los que está presente, abril-mediados diciembre), estratificación térmica, estratificación termohalina y la profundidad máxima de la capa de mezcla invernal (enero-marzo, 1986-2020).

De las variables analizadas, solamente la profundidad de la isoterma de 14 °C presenta una tendencia significativa negativa, esto es, se profundiza ( $-4,7134 \pm 1,9337$  m por década). Valencia et al. (2004, 2019) concluyeron que la termoclina indicada se profundizó en el periodo 2007-2017 con relación al periodo 1986-2006 debido al predominio de condiciones muy cálidas durante el otoño de 2006 e invierno de 2007. El aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos de hundimiento en esta misma época integró en la columna de agua el contenido en calor previamente acumulado.

Ur-zutabea karakterizatzen duten denbora-seriearen emaitzek adierazten dute klima-aldaketaren ondorioz itsasoa eremu horretan berotzeak 14 °C-ko isoterma sakontzea eragingo lukeela.

Los resultados de la serie temporal que caracterizan la columna de agua indican que el calentamiento del mar en la zona, derivado del cambio climático, estaría produciendo una profundización de la isoterma de 14 °C.



5. ird. 14 °C-ko isotermaren sakontasunaren denbora-seriea D2 estazioan, 1993-2020 aldian.

5. Fig. Serie temporal de la profundidad de la isoterma de 14°C en la estación D2 en el periodo 1993-2020.

Estratifikazioaren urtearteko aldakortasun handia dela-eta, ezin da joera sendorik ezarri aldagai honetarako (González-Pola et al., 2012). Adierazle honek aldakortasuna erakusten du denbora-eskala laburragoetan (barne-uhinak, marea-zikloa, eguneko zikloa), eskuragarri dauden hileroko laginketetan karakterizatuak ez daudenetan.

La estratificación presenta una gran variabilidad interanual por lo que no es posible establecer tendencias consistentes para esta variable (González-Pola et al., 2012). Este indicador presenta variabilidad a escalas de tiempo más cortas (ondas internas, ciclo mareal, ciclo diario) no caracterizadas en los muestreos mensuales disponibles.

		Aldia Periodo	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	p-balioa p-valor
14 °C-ko isotermaren sakonera Profundidad de la isoterma de 14 °C	(m)	1993–2020	<b>-4,7134 ± 1,9337</b>	<b>0,0154</b>
Estratifikazio termikoa Estratificación térmica	(°C /m)	1993–2020	-0,0038 ± 0,0277	0,8910
Estratifikazio termohalinoa Estratificación termohalina	(kg m <sup>-3</sup> /m)	1993–2020	0,0142 ± 0,0147	0,3322
Neguko nahaste-geruzaren sakonera Profundidad de la capa de mezcla invernal	(m)	1986–2020	-18,6555 ± 9,5040	0,0581

1. taula. Nahaste- eta stratifikazio-geruzen adierazleen joera.

1. Tabla. Tendencia indicadores capa de mezcla y estratificación.

Somavilla et al.-ek (2011) ondorioztatu zuten Atlantikoaren latitude ertainetako stratifikazioa ez litzatekeela handitu beharko berotze globaleko testuinguruan, eskala globaleko ikuspegi orokorra-ekin alderatuta (Steinacher et al., 2010; Bindoff et al., 2019). Azterketa honek ondorioztatu zuen azken hamarkadetan goiko mailetan metatutako beroak negu oso hotzetan -2005 eta 2006 urteetan, esaterako- nahasketa-geruza oso sakonak garatzen lagundu zuela. Alde horretatik, D2 estazioan aztertutako datuek erakusten dute 1986az geroztik neguko nahaste-geruza oso sakoneko (gutxienez 200 m-ko) sei gertakari izan direla, denak azken bi hamarkadetan (2005, 2006, 2009, 2010, 2016 eta 2018). D2 estazioan aztertutako datuek erakusten dutenez, neguko nahaste-geruzaren lodiera handitzen ari da hamarkada bakoitzeko 19 m-ko tasan 1986az geroztik, eredu lineal baterako doikuntza esangura estatistikoaren mugan egon arren. Nabarmendu behar da nahaste-geruzaren lodiera hamarkada bakoitzeko 19 m-ko tasan igotzea baino gehiago erregimen-aldaketa bat gertatu dela. Horrela, bada, neguko nahaste-geruza 58 m sakondu da, batez beste, 2005–2020 aldian, 1986–2004 aldiarekin alderatuta.

Somavilla et al. (2011) concluyeron que la estratificación en latitudes medias del Atlántico no debería aumentar en un contexto de calentamiento global, en contraste con la visión general a escala global (Steinacher et al., 2010; Bindoff et al., 2019). Este estudio determinó que el calor acumulado en los niveles superiores en las últimas décadas, favoreció en inviernos extremadamente fríos, como en los años 2005 y 2006, el desarrollo de capas de mezcla muy profundas. En este sentido, los datos analizados en la estación D2, indican que desde 1986 se han producido seis eventos de capa de mezcla invernal muy profunda (de al menos 200 m), todos ellos en las últimas dos décadas (2005, 2006, 2009, 2010, 2016 y 2018). Los datos analizados en la estación D2 indican que el espesor de la capa de mezcla invernal está aumentando a una tasa de 19 m por década desde 1986, aunque el ajuste a un modelo lineal está al límite de la significación estadística. Cabe destacar que más que un aumento progresivo del espesor de la capa de mezcla a una tasa de 19 m por década se ha producido un cambio de régimen. Así pues, en término medio, la capa de mezcla invernal se ha profundizado 58 m en el periodo 2005–2020 con respecto al periodo 1986–2004.

### 3.1.4. Oxigenoa

Ozeanoen oxigeno-galera klima-aldaketaren inpaktu nagusietako bat da. Ozeanoko oxigeno disolbagarriaren murrizketa klima-aldaketaren eraginez ura berotzearen ondorioz gertatzen da; izan ere, gasen disolbagarritasuna murriztu egiten da alde batetik, eta, bestetik, oro har estratifikazio handiago eragiten du, ur-zutabearen eta atmosferaren arteko nahasketa murriztuz. Kostaldean, prozesu biogeokimikoek ere zeregin garrantzitsua izan dezakete oxigenoaren murrizketan: eutrofizazioa<sup>2</sup> bezalako prozesuak, kostaldean mantenugaiak deskargatzearen ondoriozkoak, eta erregai fosilak erretzetik eratorritako nitrogeno-jalkitzeak.

Oxigenoa funtsezkoa da ozeanoetako prozesu biologiko eta biogeokimikoetarako. Oxigeno disolbagarria murrizteak ondorioak izan ditzake hainbat itsas espezieetan, baita bestelako ondorioak ere, hala nola ekosistemaren funtzionaltasuna eta dibertsitatea galtzea, produktibitatearen aldaketak edo ziklo biogeokimikoen aldaketak oxigeno gutxiko eremuetan.

Eskala globaleko behaketek ozeano guztien oxigeno-galera adierazten dute azken hamarkadetan (Breitburg et al., 2018). Ozeano globaleko oxigeno disolbagarria % 1-2 murriztu da XX. mendearen erdialdetik (Laffoley, 2019).

Gipuzkoako kostaldean (EAEko Egoera Ekologikoaren Kalitate Sarearen estazioak, 25 m eta 100 m) 1995-2020 aldian (2002-2020 aldian 100 m-rako) azaleko eta 25 m-ko sakonerako oxigeno disolbatuaren kontzentrazioak goranzko joera esanguratsua du,  $0,119 \pm 0,019 \text{ m l}^{-1}$  hamarkada bakoitzeko eta  $0,087 \pm 0,020 \text{ m l}^{-1}$  hamarkada bakoitzeko tasekin, hurrenez hurren. 100 m-ko sakoneran, berriz, oxigeno disolbatuaren kontzentrazioak behera egin du,  $-0,0246 \pm 0,062 \text{ mg/l}$  hamarkada bakoitzeko.

Beharrezkoa da analisietan sakontzea, joesa desberdinak azalduko lituzkeen prozesua argitzeko; hura lotuta dago, seguru asko, neguko

### 3.1.4. Oxígeno

La desoxigenación de los océanos es uno de los principales impactos del cambio climático. La disminución del oxígeno soluble en el océano es debida al calentamiento del agua como resultado del cambio climático, que disminuye por un lado la solubilidad de los gases y por otra provoca en general una mayor estratificación reduciendo la mezcla de la columna de agua con la atmósfera. En la costa, los procesos biogeoquímicos también pueden tener un papel importante en la disminución de oxígeno, procesos como la eutrofización<sup>2</sup>, resultado de la descarga de nutrientes en las costas, y la deposición de nitrógeno proveniente de la quema de combustibles fósiles.

El oxígeno es fundamental para los procesos biológicos y biogeoquímicos en los océanos. La disminución del oxígeno soluble puede tener consecuencias en diferentes especies marinas y consecuencias como pérdida de funcionalidad y diversidad del ecosistema, cambios en la productividad o en los ciclos biogeoquímicos en zonas con poco oxígeno.

Las observaciones a escala global indican desoxigenación en todos los océanos en las últimas décadas (Breitburg et al., 2018). El oxígeno soluble en el océano global ha disminuido un 1-2% desde mediados del S.XX (Laffoley, 2019).

En la costa guipuzcoana (estaciones de la Red de Calidad del Estado Ecológico de la CAPV datos en superficie, 25 m y 100 m) en el periodo 1995-2020 (2002-2020 para 100 m) la concentración de oxígeno disuelto en superficie y a 25 m presenta una tendencia creciente significativa, con tasas de  $0,119 \pm 0,019 \text{ m l}^{-1}$  por década y  $0,087 \pm 0,020 \text{ m l}^{-1}$  por década, respectivamente. En cambio, a 100 m de profundidad, la concentración de oxígeno disuelto presenta una tendencia decreciente de  $-0,0246 \pm 0,055 \text{ m l}^{-1}$  por década.

<sup>2</sup> Eutrofizazioak erreferentzia egiten dio ur-sistema bateko mantenugai ez-organiko gehiegi ekartzeari (giza jardueren ondorioz), alga fitoplanctonikoak kontrolik gabe ugartzea eraginez, uretan dauden organismoen orekan eta uraren kalitatean nahasmendu kaltegarriak eraginez, hipoxia edo anoxia esate baterako.

<sup>2</sup> La eutrofización se refiere al aporte en exceso de nutrientes inorgánicos (procedente de actividades humanas) en un sistema acuático, produciendo una proliferación descontrolada de algas fitoplanctónicas produciendo una indeseable perturbación del equilibrio de los organismos presentes en el agua y de la calidad de esta, como hipoxia o anoxia.



nahasketa-prozesuekin, ibai-ekarpenekin eta/edo fitoplanktonaren kontsumoarekin/arnasketarekin.

Es necesario ahondar en los análisis que nos permitan esclarecer el proceso que explicaría las diferentes tendencias y que probablemente esté asociado a los procesos de mezcla invernal, aportes fluviales y/o consumo/respiración del fitoplancton.

### 3.1.5. Mantenugai ez-organiko disolbatuak

Mantenugaiak funtsezkoak dira itsas ekosistemetarako. Ozeanoen produktibitate biologikoa erregulatzeko balio dute, eta ziklo biogeokimikoen aztarna-elementuak dira, bai eta iturri natural eta antropogenikoetarako eta garraio-prozesuetarako ere. Mantenugaien erabilgarritasunari buruzko informazioak aukera ematen du baldintza fisikoen aldakortasuna ekosistemen aldakortasunarekin lotzeko. Klima-aldaketaren ondoriozko kostaldeko mantenugaien kopuruaren aldakuntzak lotura izan dezake (1) prezipitazio-erregimenaren aldaketarekin; izan ere, aldaketa horrek, aldi berean, ibaien emaria alda dezake eta, horrekin batera, kostaldera iristen diren lehorreko mantenugaien kopurua; eta (2) ur-zutabearen estratifikazioa tenperaturaren igoeratik handitzearekin; eremu tropikaletan, estratifikazioa handitzeak mantenugaien ekarpena mugatzen du eremu fotikoan; nahasketa handia duten eskualdeetan –esaterako, eremu subartikoetan–, berriz, estratifikazioa handitzeak produkzio primarioari lagun diezaioke. Mantenugai-mailen egungo joerei buruzko proba gutxi daude.

Gipuzkoako kostaldeetan, 1995–2020 aldirako, mantenugai ez-organiko disolbatuen azaleko kontzentrazioaren analisiak adierazten du amonioaren ( $\text{NH}_4$ ) eta silikatoen ( $\text{SiO}_4$ ) kontzentrazioek zertxobait gora egiten dutela ( $0,17 \mu\text{mol l}^{-1}$  hamarkada bakoitzeko eta  $0,35 \mu\text{mol l}^{-1}$  hamarkada bakoitzeko, hurrenez hurren), eta gainerako mantenugaiak, aldiz, ez dutela joera esanguratsurik.

### 3.1.5. Nutrientes inorgánicos disueltos

Los nutrientes son esenciales para los ecosistemas marinos. Sirven como reguladores de la productividad biológica de los océanos y son elementos traza de los ciclos biogeoquímicos, así como para las fuentes naturales y antropogénicas y los procesos de transporte. La información sobre la disponibilidad de nutrientes permite vincular la variabilidad de las condiciones físicas con la variabilidad de los ecosistemas. La variación en la cantidad de nutrientes en la costa, debida al cambio climático, puede estar relacionada con (1) el cambio en el régimen de precipitaciones, que a su vez puede hacer variar el caudal de los ríos y, con ello, la cantidad de nutrientes de origen terrestre que llegan a la costa y (2) el incremento en la estratificación de la columna de agua por el aumento de la temperatura; en las zonas tropicales el aumento de la estratificación limita el aporte de nutrientes a la zona fótica mientras que en regiones con mucha mezcla, como las zonas subárticas, el aumento de la estratificación puede favorecer la producción primaria. Existen pocas pruebas sobre las tendencias actuales de los niveles de nutrientes.

En las costas guipuzcoanas, para el periodo 1995–2020, el análisis de la concentración en superficie de nutrientes inorgánicos disueltos indica que el amonio ( $\text{NH}_4$ ) y silicato ( $\text{SiO}_4$ ) aumentan ligeramente su concentración ( $0,17 \mu\text{mol l}^{-1}$  por década y  $0,35 \mu\text{mol l}^{-1}$  por década, respectivamente), mientras que el resto de nutrientes no presenta tendencias significativas.

### 3.1.6. Itsas maila

Berotze globala itsas mailaren igoera eragiten ari da planeta osoan. XX. mendearen hasieratik behatutako igoeraren % 45ek gutxienez jatorri antropogenikoa duela estimatu da. Itsas mailaren igoera glaziarretako eta kasko polarretako izotza urtzeari zor zaio maila globalean, baita ozeanoen hedapen termikoari ere. Horren ondorioz, itsas maila klima-aldaketaren adierazle nagusietako bat da.

Itsas maila igotzeak eta horren ondorioz kostalderoa atzeratzeak hondartzen aire-azalera murriztea edo desagertzea eragin dezakete, baita kostaldeko azpiegitura eta eraikinen muturreko gertakarien eta uholdeen aurreko esposizioa handitzea ere. Itsas maila nola eta zergatik aldatzen ari den jakiteko etengabeko jarraipena garrantzitsua da, itsas mailak gora egiten jarraituko baitu, jada gertatutako berotzeari ozeanoak emandako erantzun iraunkorra dela-eta (IPCC, 2021).

Igoera-tasa globalak bizkortzen ari dira, aldi desberdinetarako igoera-tasek adierazten duten bezala: 1,38 mm urtea<sup>-1</sup> 1901-1990 aldian, 2,1 mm urtea<sup>-1</sup> 1970-2015 aldian, 3,2 mm urte<sup>-1</sup> 1993-2015 aldian eta 3,6 mm urte<sup>-1</sup> 2006-2015 aldian (IPCC, 2019). 1993-2021 aldirako estimatutako itsas mailaren igoera  $3,4 \pm 0,4$  mm urte<sup>-1</sup> da eta, beraz,  $0,081 \pm 0,025$  mm urte<sup>-2</sup>-ko azelerazioa gertatu da (Johnson & Lumpkin, 2022).

Bizkaiko golkoko 9 mareograforen (Vigo<sup>2</sup>, Vigo, Gijón<sup>2</sup>, Santander<sup>2</sup>, Newlyn, Bret, A Coruña<sup>2</sup>, A Coruña, Bilbo<sup>3</sup>) itsasoaren batez besteko mailaren denbora-serieak aztertu dira, hasieratik 2020ra arte. Bildutako datuek adierazten dute itsasoaren batez besteko maila modu esanguratsuan igotzen ari dela mareografo guztietan, Gijóngo mareografoan izan ezik, horren joera positiboa ez baita esanguratsua. 8 serie esanguratsuetako igoera-tasak  $1,25 \pm 0,05$  cm hamarkada bakoitzeko (Bresten, 1846-2019) eta  $3,07 \pm 0,32$  cm hamarkada bakoitzeko (Bilbon, 1992-2019) artekoak dira. Oro har, tasa handienak 90eko hamarkadaz geroztiko azken aldiei dagozkie. Horrela, adibidez, Bresteko mareografoaren denbora-serierako, 1992-2020 aldiko igoera-tasa ( $2,42 \pm 0,44$  cm hamarkada bakoitzeko) seriearen aldi osorako tasaren bikoitza da.

### 3.1.6. Nivel del mar

El calentamiento global está provocando el ascenso del nivel del mar en todo el planeta. Se ha estimado que como mínimo el 45% del incremento observado desde el inicio del siglo XX tiene un origen antropogénico (Dangendorf et al., 2015). El ascenso del nivel del mar se debe a la fusión del hielo de los glaciares y de los casquetes polares y a la expansión térmica de los océanos. Esto hace que el nivel del mar sea uno de los principales indicadores del cambio climático.

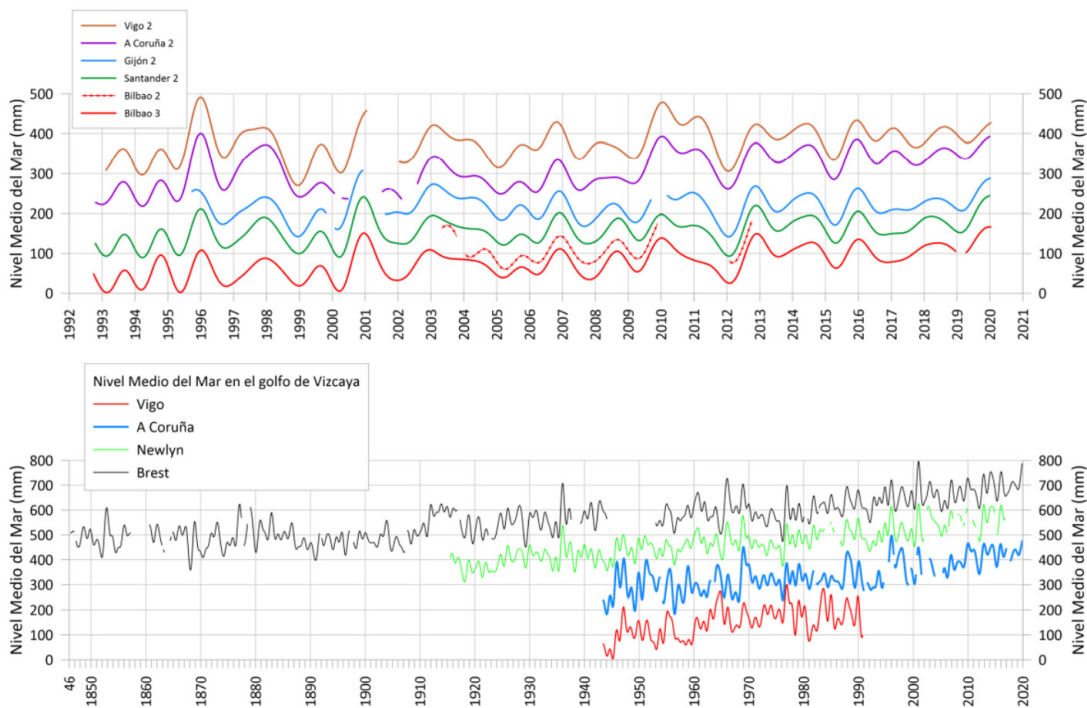
Una subida del nivel del mar y el consiguiente retroceso de la línea de costa puede conducir a la reducción o desaparición de la superficie aérea de las playas y al incremento de exposición de las infraestructuras y edificaciones costeras a fenómenos extremos e inundaciones. El seguimiento continuo de cómo y por qué el nivel del mar está cambiando es importante, ya que el nivel del mar seguirá aumentando debido a la respuesta sostenida del océano al calentamiento que ya ha ocurrido (IPCC, 2021).

Las tasas de ascenso globales se están acelerando como indican las tasas de ascenso para distintos periodos temporales: 1,38 mm año<sup>-1</sup> en el periodo 1901-1990, 2,1 mm año<sup>-1</sup> en 1970-2015, 3,2 mm año<sup>-1</sup> en 1993-2015 y 3,6 mm año<sup>-1</sup> en 2006-2015 (IPCC, 2019). El ascenso del nivel del mar estimado para el periodo 1993-2021, periodo en el que existen datos globales de satélite, es de  $3,4 \pm 0,4$  mm año<sup>-1</sup>, con una aceleración de  $0,081 \pm 0,025$  mm año<sup>-2</sup> (Johnson & Lumpkin, 2022).

Se han analizado las series temporales de nivel medio del mar de 9 mareógrafos situados en el golfo de Vizcaya (Vigo<sup>2</sup>, Vigo, Gijón<sup>2</sup>, Santander<sup>2</sup>, Newlyn, Bret, A Coruña<sup>2</sup>, A Coruña, Bilbao<sup>3</sup>) desde su inicio hasta 2020. Los resultados indican que el nivel medio del mar está ascendiendo significativamente en todos estos mareógrafos, salvo el de Gijón cuya tendencia positiva no es significativa. Las tasas de ascenso para las 8 series significativas oscilan entre  $1,25 \pm 0,05$  cm por década (en Bret, 1846-2019) y  $3,07 \pm 0,32$  cm por década (en Bilbao, 1992-2020). En general, las tasas más elevadas corresponden a los periodos más recientes, desde los años 90. Así, por ejemplo, para la serie temporal del mareógrafo de Brest, la tasa de ascenso en el periodo 1992-2020 ( $2,42 \pm 0,44$  cm por década) es el doble que la tasa para el periodo completo de la serie.

Emaitza horiek guztiek adierazten dute Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila 1,7 eta 3,4 cm hamarkada bakoitzeko arteko tasarekin igotzen ari dela (2,5 cm hamarkada bakoitzeko, batez beste) 90eko hamarkadaz geroztik.

Todos estos resultados indican que el nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya está ascendiendo a una tasa de entre 1,7 y 3,4 cm por década (en promedio 2,5 cm por década) desde los años 90.



6. ird. Bizkaiko golkoko mareografoetako batez besteko itsas mailaren denbora-serieak.

6. Fig. Series temporales del nivel medio del mar en mareógrafos del golfo de Vizcaya.

AZTI-Pasaia zentroko estazio geodesikoak (<http://geolabpasaia.org/>), Gipuzkoako Foru Aldundiaren, Aranzadiren, Institutu Geografiko Nazionalaren eta AZTIren jabetzakoa denak, mareografo bat dauka 2007az geroztik. 2007–2020 aldirako joera 4,2 mm urte<sup>-1</sup>-koa da. Hala ere, itsasoaren batez besteko mailaren bilakaera aztertzeko, serie hori laburregia da oraindik.

La estación geodésica del centro AZTI-Pasaia (<http://geolabpasaia.org/>), propiedad de la Diputación Foral de Gipuzkoa, Aranzadi, Instituto Geográfico Nacional y AZTI, dispone de un mareógrafo desde 2007. La tendencia para el periodo 2007–2020 es de 4,2 mm por año. Sin embargo, para el análisis de la evolución del nivel medio del mar, esta serie es aún demasiado corta.

Eskualde-mailan, Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila aztertu da, sateliteko bidezko sentsoreen bidez, 1993–2020 aldirako. Emaitzek goranzko joera adierazten dute, 2,62 ± 0,42 cm hamarkada bakoitzeko tasarekin, eta igoeraren dezerazioa 2004tik 2013ra bitartean.

A escala regional, se ha analizado el nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya obtenido con sensores satelitales para el periodo 1993–2020. Los resultados indican una tendencia de ascenso con una tasa de 2,62 ± 0,42 cm por década, con una desaceleración del ascenso entre 2004 y 2013.

Emaitza horiek guztiek adierazten dute Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila 1,7 eta 3,4 cm hamarkada bakoitzeko arteko tasarekin igotzen ari dela (2,5 cm hamarkada bakoitzeko, batez beste) 90eko hamarkadaz geroztik. Tasa hori aldi bererako tasa globala baino apur bat txikiagoa da (3,2–3,6 cm hamarkada bakoitzeko, IPCC (2019)). Hala ere, kontuan hartu behar da itsas mailaren igoera ez dela homogeneoa izan planeta osoan (Cazenave et al., 2018). Horrela, Atlantikoaren ipar-ekialdean eta, zehazkiago, Bizkaiko golkoaren ekialdean, batezbesteko globala baino igoera txikiagoa ikusi da. Ondoriozta daiteke, beraz, Bizkaiko golkoko kostaldean eta itsasoan detektatutako igoera bat datorrela maila globaleko igoerarekin. Analisiak berresten du, halaber, itsas mailaren igoera bizkortzen ari dela eremuan azken hiru hamarkadetan, XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta, aldi luzeagoak aztertzen dituzten ikerketekin bat etorritik (Woppelmann et al., 2006; Dangendorf et al., 2019).

### 3.1.7. Olatuak

Olatuak klima-sistemaren elementu garrantzitsuak dira, atmosferaren eta ozeanoaren arteko interakzioa modulatzeko baitute (Cavaleri et al., 2012). Klima-aldaketak olatuen klimari eragin diezaioke, haien sorrerarekin eta hedatzearekin zuzenean lotutako aldagaiak aldatzearen ondorioz. Azaleko haize-eremuetako aldaketek olatuen portaera alda dezakete (Reguero et al., 2019), transmititutako energia edo hedatze-norabidea eta -distantzia aldatuz.

Olatuak kostaldeko dinamika-prozesuen motor garrantzitsua dira, hala nola kostaldeko higadurarena, eta itsas mailaren muturrei ekarpena egiten diete denbora-escala askotan (Melet et al., 2018; Melet et al., 2020). Itsas mailaren igoeraren ondorioz, olatuek euskal kostaldean duten inpaktua handitzea aurreikusten da (Liria et al., 2011).

Olatuen joera globalen azterketek identifikatu dute olatu-altuera adierazgarria (Hs) zertxobait igo dela batez besteko baldintzetan (0,3 cm urte bakoitzeko) eta muturreko baldintzen igoera handiagoa (Young et al., 2011; 2019). Olatuen potentziaren (Pw) joeren analisi batean, Reguero et al.-ek (2019) Pw-ren % 0,4-ko igoera globala identifikatu dute urte

Todos estos resultados indican que el nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya está ascendiendo a una tasa de entre 1,7 y 3,4 cm por década (en promedio 2,5 cm por década) desde los años 90. Esta tasa es ligeramente inferior a la tasa global para el mismo periodo (3,2–3,6 cm por década, IPCC (2019)). No obstante, hay que tener en cuenta que el ascenso del nivel del mar no ha sido homogéneo en todo el globo (Cazenave et al., 2018). Así, en el NE Atlántico y más concretamente en el este del golfo de Vizcaya, se ha observado un ascenso menor al promedio global. Se puede por lo tanto concluir que el ascenso detectado en la costa y mar del golfo de Vizcaya es consistente con el ascenso a nivel global. El análisis también confirma que el ascenso del nivel del mar se está acelerando en la zona en las últimas tres décadas, respecto al ascenso medio del siglo XX, en coherencia con estudios que analizan periodos más largos (Woppelmann et al., 2006; Dangendorf et al., 2019).

### 3.1.7. Oleaje

Las olas son un elemento importante del sistema climático al modular la interacción entre atmósfera y océano (Cavaleri et al., 2012). El cambio climático puede afectar al clima de las olas al modificar las variables directamente relacionadas con su generación y propagación. Cambios en los campos de vientos en superficie pueden modificar el comportamiento del oleaje (Reguero et al., 2019), cambiando la energía transmitida o la dirección y distancia de propagación.

El oleaje es un importante motor de los procesos de dinámica costera, como la erosión costera, y contribuye a los extremos del nivel del mar en múltiples escalas de tiempo (Melet et al., 2018; Melet et al., 2020). Como consecuencia del ascenso del nivel del mar, se prevé que el impacto del oleaje en la costa vasca se incremente (Liria et al., 2011).

Estudios de tendencias del oleaje a nivel global han identificado un ligero aumento de la altura de ola significativa (Hs) en condiciones medias (0,3 cm por año) y un mayor aumento de las condiciones extremas (Young et al., 2011; 2019). En un análisis de tendencias de la potencia del oleaje (Pw), Reguero et al. (2019) han identificado un aumento global

bakoitzeko 1948tik 2008ra bitartean, ozeanoaren azaleraren berotzearekin lotu litekeena. Eskualde mailan, Ulazia et al.-en azterketa batek (2017) Hs-k eta Pw-k 1900az geroztik Bizkaiko golkoan izandako igoera karakterizatzeko aukera eman dute. Zehazki, Bilbo- Bizkaiko buiatik gertuko puntu batean Hs-ren 0,4 cm/urte-ko batez besteko igoera erregistratu da. 1970-2000 aldiari dagokionez, Paris et al.-ek (2014) Hs-ren batez besteko igoera handiagoa identifikatu dute (0,5 cm urte bakoitzeko, batez besteko baldintzetan), eta Hs90-en (muturreko baldintzetako) 3 cm urte bakoitzeko arteko igoera (balio hori udazkeneko hilabeteetan egindako analisi bati dagokio). Ipar Atlantikoko Hs-ren muturreko baldintzetan gertatzen diren joerak aldakortasun atmosferikoaren moduekin erlazionatu dira, zehazki, Ipar Atlantikoko Oszilazioarekin (NAO) (Wang et al., 2001). Bizkaiko golkoan, Hs-ren joerak zirkulazio atmosferikoaren aldakortasun-adierazleekin ere erlazionatu dira, NAOz gain, Mendebaldeko Europarekiko Presio Anomalian, WEPAn, oinarritutako adierazle batekin (Castelle et al., 2017).

Gipuzkoako kostaldean olatuen adierazlea aztertzeke, batez besteko baldintzen joerak aztertu dira (eguneko olatu-altuera adierazgarriaren batez besteko balioak, Hs, eta olatuen batez besteko potentziarenak, Pw), baita muturreko baldintzen adierazleen joerak ere; horretarako abiapuntua hileko muturreko balioak izan dira (olatu-altuera adierazgarriaren hileko 90 pertzentila, Hs90), bai eta 100 urteko errepikatze-denborarekin lortzen den olatu-altuera adierazgarria (Hs100) lortzeko aukera ematen duten olatu-altuera adierazgarriaren muturreko erregimenak ere. Olatuen serie historikoak erabili dira horretarako, Estatuko Portuen Bilbo-Bizkaiko buian (1991tik aurrerako datuak) eta Eusko Jaurlaritzako Larrialdiei Aurre Egiteko eta Meteorologiako Zuzendaritzaren Donostia buian (2007az geroztik) erregistratutakoak. Azterketa hori buietatik gertuko puntuetan egindako berranalisi<sup>3</sup>-datuekin osatu da.

Buien datuek ez dute aldaketa esanguratsurik erakusten olatuen batez besteko baldintzetan 1991-2020 aldian (Hs gehikuntza  $3,103 \pm 3,01$  cm-koa izan

de Pw de 0,4% por año entre 1948 y 2008 que se podría asociar al calentamiento de la superficie del océano. A nivel regional, el estudio de Ulazia et al. (2017) ha permitido caracterizar un aumento de Hs y Pw desde 1900 en el golfo de Vizcaya. En particular, ha registrado un aumento medio de Hs de 0,4 cm por año, y de 0,3 cm por año en un punto cercano a la boya de Bilbao – Vizcaya. Sobre el periodo 1970-2000, Paris et al. (2014) han identificado un aumento medio de Hs mayor (0,5 cm por año, en condiciones medias) y un aumento de Hs90 (condiciones extremas) de hasta 3 cm por año (este valor corresponde a un análisis de los meses de otoño). Las tendencias en las condiciones extremas de Hs en el Atlántico Norte se han relacionado con modos de variabilidad atmosférica, en concreto con la Oscilación del Atlántico Norte, NAO (Wang et al., 2001). En el golfo de Vizcaya, las tendencias de Hs también se han relacionado con indicadores de variabilidad de la circulación atmosférica, además de con la NAO con un indicador basado en la Anomalía de Presión sobre la Europa Occidental, WEPA (Castelle et al., 2017).

Para el análisis del indicador del oleaje sobre la costa guipuzcoana, se han analizado las tendencias de las condiciones medias (valores medios diarios de altura de ola significativa, Hs, y de potencia media del oleaje, Pw) y las tendencias de indicadores de condiciones extremas a partir de valores extremos mensuales (percentil 90 mensual de altura de ola significativa, Hs90) y a partir de regímenes extremos de altura de ola significativa que permiten obtener la altura de ola significativa que se alcanza con un periodo de retorno de 100 años (Hs100). Para ello, se han utilizado las series históricas de oleaje registradas en la boya de Bilbao-Vizcaya de Puertos del Estado (datos desde 1991) y de la boya Donostia de la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Gobierno Vasco (datos desde 2007). Este análisis se ha completado con datos de reanálisis<sup>3</sup> en puntos cercanos a las boyas.

Los datos de las boyas no muestran cambios significativos en las condiciones medias del oleaje en el

3 Berranalisisa: klima-serie berriak lortzea tresna-, homogeneizazio- edo metodologia-akats posibleak zuzentzeko, klima-ger-takariaren deskribapen errealista lortzeko neurketa-, behaketa- eta simulazio-datuaren konbinaziotik abiatuta.

3 Reanálisis: obtención de nuevas series climáticas para corregir posibles errores instrumentales, de homogeneización o de metodología, obtenidas a partir de la combinación de datos de medición, observación, simulación para obtener la descripción más realista de las ocurrencias climáticas.

da hamarkada bakoitzeko Bilbo-Bizkaiko buian, joera ez-esanguratsua). Berranalisi-datuak, berriz, 1991-2020 aldirako igoera esanguratsua erakusten dute ( $9,580 \pm 2,338$  cm hamarkada bakoitzeko). Buiaren eta berranalisiaren datuen arteko desberdintasun horiek berranalisiaren mugen ondoriozkoak izan daitezke, baita buiaren serieko datuen faltaren ondoriozkoak ere. Berranalisiarako serie osoak (1958-2020 aldian) Hs-ren igoera esanguratsua adierazten du:  $4,388 \pm 0,970$  cm hamarkada bakoitzeko.

Olatuen batez besteko potentziari ( $P_w$ ) dagokionez, ez da joera esanguratsurik ikusten buien datuetan oinarrituta. Hs-rekin gertatzen den bezala, berranalisiaren emaitzek joera esanguratsua erakusten dituzte:  $3,783 \pm 0,855$  kW/m hamarkada bakoitzeko 1991-2020 aldian eta  $1,366 \pm 0,288$  kW/m hamarkada bakoitzeko 1958-2020 aldian.

Olatu-altuera adierazgarriaren ( $H_{s90}$ ) hileko muturren analisiak goranzko joera adierazten du Bilbo-Bizkaiko buian (buiako datuei eta berranalisi-datuei dagokienez). Olatu-altuera adierazgarriaren muturreko erregimenen kasuan ( $H_{s100}$ ), Bilbo-Bizkaiko buiaren datuek goranzko joera lineal ez-esanguratsua adierazten dute. Emaitza hori ez dator bat 2019ko txostenean aurkeztutako emaitzekin; bertan, 2019ra arteko datuekin egindako analisiak joera handiagoak eta esanguratsua erakusten zituen. Beraz, emaitza horiek analisi-urtearekiko sentikorrek dira, seriearen iraupen laburra dela-eta, eta, horregatik, zuhurtziaz interpretatu behar dira. Donostiako buiaren emaitzek ere gora egiteko joera erakusten dute, baina ez da esanguratsua. Berranalisi-datuek adierazten dute  $H_{s100}$  modu esanguratsuan handitu dela, % 11,38ko hazkundearekin hamarkada bakoitzeko 1991-2020 aldian, eta % 3,24ko hazkundearekin hamarkada bakoitzeko 1958-2020 aldian. Muturreko balioen banaketaren ezaugarrien bilakaeraren analisiak adierazten du muturrik indartsuenak lehen baino ohikoagoak direla, eta indar gutxien dutenak, berriz, ez direla hain ohikoak.

periodo 1991-2020 (aumento de Hs de  $3,103 \pm 3,01$  cm por década en la boya de Bilbao-Vizcaya tendencia no significativa). Los datos de reanálisis, en cambio, sí muestran un aumento significativo para el periodo 1991-2020 ( $9,580 \pm 2,338$  cm por década). Estas diferencias entre los datos de la boya y de reanálisis pueden ser debidas tanto a limitaciones del reanálisis, como a la falta de datos en la serie de la boya. La serie completa para el reanálisis (periodo 1958-2020) indica un aumento significativo de Hs de  $4,388 \pm 0,970$  cm por década.

En cuanto a la potencia media del oleaje ( $P_w$ ), no se observan tendencias significativas a partir de los datos de las boyas. Al igual que ocurre con Hs, los resultados del reanálisis sí muestran tendencias significativas de  $3,783 \pm 0,855$  kW/m por década en el periodo 1991-2020 y  $1,366 \pm 0,288$  kW/m por década en el periodo 1958-2020.

El análisis de los extremos mensuales de altura de ola significativa ( $H_{s90}$ ) indican una tendencia creciente en la boya Bilbao Vizcaya (tanto los datos de boya como de reanálisis). En el caso de los regímenes extremos de altura de ola significativa ( $H_{s100}$ ), los datos de la boya de Bilbao-Vizcaya indican una tendencia lineal creciente no significativa. Este resultado difiere del resultado presentando en el Informe de 2019, en los que el análisis realizado con datos hasta 2019 mostraba tendencias mayores y significativas. Por tanto, estos resultados son sensibles al año de análisis debido a la duración relativamente corta de la serie y por ello, se tiene que interpretar con cautela. Los resultados de la boya de Donostia, muestran asimismo una tendencia al incremento, pero no significativa. Los datos de reanálisis indican un aumento de  $H_{s100}$  significativo, un aumento de 11,38 % por década en el periodo 1991-2020, y de 3,24 % por década en el periodo 1958-2020. El análisis de la evolución de las características de la distribución de los valores extremos indica que los extremos más fuertes son más frecuentes que antes, y los menos fuertes, menos frecuentes.

### 3.2. Adierazle atmosferiko eta hidrologikoak

Itsasertzeko eta itsasoko eremuari buruzko azterlan honetan jasotako adierazle atmosferiko eta hidrologikoek itsasoko adierazleetan duten eragina hobeto ulertzeko aukera ematen dute.

Airearen temperatura handitzen ari da Gipuzkoan. Igeldoko (1929–2020) eta Hondarribiko (1956–2020) estazio meteorologikoetako airearen tenperaturaren denbora-serieek joera positiboak dituzte. Era berean, bi estazioetako emaitzek eguneko eguzki-orduen kopuruaren igoera adierazten dute. Urteko prezipitazio metatuaren eta muturreko prezipitazioaren kasuan (dagokion serieko 75 perzentiletik gorako prezipitazioa duten urteko egun-kopuru gisa definitua), Igeldoko estazioan emaitzek ez dute joera esanguratsurik adierazten adierazle bakar batentzat ere; Hondarribian, berriz, joera goranzkoa da, bai urteko prezipitaziorako, bai muturreko prezipitaziorako. 90eko hamarkadatik 2020ra bitartean joera positiboa eta esanguratsua duten batez besteko emariak dituzten ibai bakarrak Uru-mea eta Oiartzun dira –ekialdekoenak–; Deba, Urola eta Oria ibaietan, aldiz, joerak ez dira esanguratsuak.

### 3.3. Kostaldeko higaduraren adierazle geomorfologikoak

Klima-aldaketaren ondorioz itsas maila handitzea arriskua da kostaldeko eskualdeentzat, gero eta uholde-arrisku handiagoaren eraginpean daudenentzat. Testuinguru horretan, hondartzetako higadura-tasak etorkizunean handitzea espero da. Hondartzak luraren eta ozeanoaren arteko interfazea dira, eta kostaldea ekaitzen aurrean babesten dute. Itsas mailaren eta olatuen igoeren konbinazioaren ondorioz (azkenek sedimentua daramate), hareatzek atzera egiten dute eta, beraz, kostaldek inpaktu handiagoa jasaten du. Munduko kostalde hareatsu asko higatzen ari dira jada (Bird, 1985; Luijendijk et al., 2018; Mentaschi et al., 2018), eta haien egoera klima-aldaketaren ondorioz larriagotu liteke (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe et al., 2016). Eskualde-mailan, proiektzioek adierazten dute euskal hondartzak atzerakada zabaleraren % 25etik % 40ra

### 3.2. Indicadores atmosféricos e hidrológicos

Los indicadores atmosféricos e hidrológicos incluidos en este estudio de ámbito litoral y marino permiten entender mejor su influencia en los indicadores propiamente marinos.

La temperatura del aire está incrementándose en Gipuzkoa. Las series temporales de la temperatura del aire de las estaciones meteorológicas de Igeldo (1929–2020) y Hondarribia (1956–2020) presentan tendencias positivas. Asimismo, en ambas estaciones los resultados indican un aumento del número de horas de sol diarias. En el caso de la precipitación anual acumulada y la precipitación extremal (definida como el número de días del año con precipitación superior al percentil 75 de la serie correspondiente), en la estación de Igeldo los resultados no indican una tendencia significativa para ninguno de los indicadores, mientras que en Hondarribia la tendencia es creciente tanto para la precipitación anual como para la extremal. Los únicos ríos cuyos caudales medios presentan una tendencia positiva y significativa desde los años 90 hasta 2020 son los ríos Uru-mea y Oiartzun, los más orientales, mientras que en los ríos Deba, Urola y Oria las tendencias no son significativas.

### 3.3. Indicadores geomorfológicos de erosión costera

El aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático supone un riesgo para las regiones costeras, expuestas a riesgos de inundación cada vez mayores. En este contexto, se espera que aumenten en el futuro las tasas de erosión en las playas. Las playas son la interfaz entre la tierra y el océano, proporcionando protección costera frente a las tormentas. La combinación del aumento del nivel del mar y del oleaje, que se lleva el sedimento, tiene como consecuencia el retroceso de los arenales y por tanto mayor impacto en la costa. Gran parte de las costas arenosas del mundo ya está erosionándose (Bird, 1985; Luijendijk et al., 2018; Mentaschi et al., 2018), y su situación podría agravarse por el cambio climático (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe et al., 2016). A escala regional, las proyecciones indican que los retrocesos en las playas vascas podrían ser del 25%

bitartekoa izan daitezkeela mende-amaierarako, itsas mailaren igoeraren ondorioz soilik (Chust et al., 2010).

Kostaldeko higaduraren Adierazle geomorfologikoen joerak zehazteko, Gipuzkoako Itsasertzeko Bideometria Foru Sareak hartutako irudiak erabiltzen dira. Sarea Gipuzkoako hareatzak epe labur, ertain eta luzera monitorizatzeko zerbitzu bat da, eta Gipuzkoako Foru Aldundiko Ingurumeneko eta Obra Hidraulikoetako Departamentuaren mende-koa da. Sarea 10 estazio osatzen dute (Santiago, Hondarribia, Saturrarán, Itzurun, Santiago, Gaztetape, Malkorbe, Antilla, Ondarbeltz) gehi Zarauzko bideometria-estazioak, udalaren jabetzakoa denak ([Bideometria Foru Sarea - Ingurumena - Ingurumena \(gipuzkoa.eus\)](#)). Denbora-serie gehienak ez dira 36 hilabetetik gorakoak, eta epe luzerako joerak zehaztea eragozten dute, baina hondartza bakoitzaren portaera orokorra deskribatzeko aukera eman dute. Zarautzen kasuan (Udalaren jabetzakoa da, eta AZTI Fundazioak kudeatzen du), eskuragarri dauden datuen seriea luzeagoa da (2010–2021) da, eta hura erabiltzen da definitutako adierazleak aztertzeke.

Kosta-lerroaren mugimendua da kostaldearen atzeraldiaren edo akrezioaren adierazlerik erabiliena (Hanslow, 2007). Lerro honek aldakortasun handia du, eta epe laburreko mugimenduei zein epe luzeko prozesuei lotuta dago. Denbora-escala guztietan, mugimenduaren emaitza gisa, hondartzen higadura-/akrezio-zikloak lortzen dira, jarraipena egiteko funtsezko adierazleak direnak. Zarauzko hondartzan 2010–2020 aldian lortutako hileroko irudi adierazgarrietako kosta-lerroa kontuan hartuta, hondartzen jarraipena egiteko adierazle morfologiko hauek zehaztu dira: (1) mareaz gaindiko eta marearteko azalera eta (2) hondartzaren zabalera itsasbeheran eta itsasgoran.

### 3.3.1. Mareaz gaindiko eta marearteko eremua

Mareaz gaindiko eremuak beheranzko joera ez-esanguratsua du,  $-7.367 \pm 6.495 \text{ m}^2$ -koa hamarkada bakoitzeko. Marearteko eremuak, aldiz,  $16.666 \pm 10.178 \text{ m}^2$ -ko goranzko joera du hamarkada bakoitzeko, baina ez da esanguratsua. Nabarmendu

al 40% de su anchura para finales de siglo, únicamente debido al aumento del nivel del mar (Chust et al., 2010).

Para determinar las tendencias de los indicadores geomorfológicos de erosión costera se utilizan imágenes capturadas por la Red Foral de Videometría Litoral de Gipuzkoa (RFVLG). Esta red es un servicio de monitorización de los arenales guipuzcoanos a corto, medio y largo plazo, que pertenece al Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Gipuzkoa. La red está integrada por 10 estaciones (Santiago, Hondarribia, Saturrarán, Itzurun, Santiago, Gaztetape, Malkorbe, Antilla, Ondarbeltz) más la estación de videometría de Zarautz, propiedad del ayuntamiento ([Red de Videometría Foral - Ingurumena - Ingurumena \(gipuzkoa.eus\)](#)). La mayoría de las series temporales no superan los 36 meses, lo que impiden determinar las tendencias a largo plazo, aunque sí ha permitido describir el comportamiento general de cada una de las playas. En el caso de Zarautz (propiedad del Ayuntamiento y gestionada por la Fundación AZTI), la serie de datos disponibles es la más larga (2010–2021) y la que se utiliza para el análisis de los indicadores definidos.

El movimiento de la línea de costa es el indicador más utilizado de recesión o acreción costera (Hanslow, 2007). Esta línea presenta una alta variabilidad, estando asociada tanto a movimiento de corto plazo como a procesos de largo plazo. En todas las escalas temporales, como producto resultante del movimiento, se obtienen ciclos de erosión/acreción de las playas, indicadores clave para su seguimiento. Teniendo en cuenta la línea de costa de imágenes representativas mensuales obtenidas en la playa de Zarautz en el periodo 2010–2020, se han determinado los siguientes indicadores morfológicos para el seguimiento de playas: (1) superficie supramareal e intermareal y (2) anchura de playa en bajamar y pleamar.

### 3.3.1. Área supramareal e intermareal

El área supramareal presenta una tendencia decreciente no significativa de  $-7.367 \pm 6.495 \text{ m}^2$  por década. En cambio, el área intermareal presenta una tendencia creciente de  $16.666 \pm 10.178 \text{ m}^2$  por década, pero tampoco significativa. Cabe destacar que la tendencia del área intermareal calculada con los



behar da serieko datuekin kalkulaturako marearteko eremuak 2019ra arte (2010-2019) duen joera esanguratsua zela, hondartzaren izaera iraungikorren handitzea erakutsiz, bereziki olatuen energia-maila handiagoaren ondorioz. Hala ere, 2019ko eta 2020ko neguetako olatu-baldintzak direla-eta – energia-maila erlatiboki txikia izan zutenak –, 2020ra arteko datuekin ikusitako marearteko eremuaren handitzea txikiagoa da, eta ez da esanguratsua.

### 3.3.2. Hondartzaren batez besteko zabalera

Itsasbeherako eta itsasgorako hondartzaren batez besteko zabalaren analisiak adierazten du aztertutako hondartza-profil gehienetan itsasgora-lerroak modu esanguratsuan egin duela atzera (-0,5 eta -1,5 m urte bakoitzeko artean), eta atzerakada handiagoa dela hondartzaren ekialderantz. Aitzitik, profil gehienetan, itsasbehera-lerroak aurrera egiten du itsasorantz, baina, oro har, aurrerapena ez da esanguratsua, hondartzaren erdiko eremuan izan ezik, bertan aurrerapena handiagoa baita (+2,5 m urte bakoitzeko). Horrek esan nahi du hondartzaren profila iraungikorra izateko joera duela (marearteko hondartzaren malda leunagoa izateko). Aldiz, ekialdeko eremuan itsasbehera-lerroak atzera egiten du, eta bertan profila ez da hain iraungikorra. Garrantzitsua da azpimarratzea itsasgorako lerroaren atzerakada esanguratsurik ez dagoen hondartzako eremua dela itsasbehera-lerroan aurrerapen esanguratsua izan duen eremua. Itsasgorako lerroaren babes gisa jokatzen duen zeharkako barra iraunkor bat duen eremu bati dagokio eremu hori.

Batez besteko analisiak erakusten du itsasbeherako lerroa itsasorantz hazten ari dela (0,14 m urte bakoitzeko), eta itsasgora barnealderantz higatzen ari dela (0,66 m urte bakoitzeko). Balantze garbiak, beraz, hondartza lehorraren lerroaren galera adierazten du (0,66 m urte bakoitzeko) eta marearteko hondartzaren igoera (0,80 m urte bakoitzeko).

datos de la serie hasta el año 2019 (2010-2019) era significativa, mostrando un aumento del carácter disipativo de la playa debido, en particular, a un oleaje más energético. No obstante, debido a las condiciones de oleaje de los inviernos 2019 y 2020 relativamente poco energéticas, el incremento del área intermareal observado con los datos hasta 2020 es menor, y no significativa.

### 3.3.2. Anchura media de la playa

El análisis de la anchura media de la playa para bajamar y pleamar indica que en la mayoría de los perfiles de playa analizados la línea de pleamar retrocede significativamente (-0,5 m por año a -1,5 m por año) y que el retroceso es mayor hacia el este de la playa. Por el contrario, en la mayoría de los perfiles, la línea de bajamar avanza hacia el mar, pero en general, el avance no es significativo, salvo en la zona central de la playa donde el avance es mayor (+2,5 m por año). Esto indica que el perfil de playa tiende a ser más disipativo (pendiente de la playa intermareal más suave). En cambio, en la zona este, donde la línea de bajamar retrocede, el perfil es menos disipativo. Es importante señalar que la zona de la playa donde no hay retroceso significativo de la línea de pleamar corresponde con la zona donde hay un avance significativo de la línea de bajamar. Esta zona corresponde a una zona con una barra transversal persistente que actúa como protección de la línea de pleamar.

En análisis promedio indica que la línea de bajamar está creciendo hacia el mar (0,14 m por año) y la pleamar está erosionándose (0,66 m por año) hacia el interior. El balance neto indica por tanto una pérdida de la línea de la playa seca (0,66 m por año) y un aumento de la anchura de la playa intermareal (0,80 m por año).

### 3.4. Adierazle biologikoak eta itsas ekosistemarenak

Ozeanoaren berotzeak, azidotzeak eta estratifikazioaren areagotzeak mantenugaien zikloi eragiten diete, eta horrek inpaktu negatiboa izan dezake produkzio primarioan. Itsas sare trofikoaren bi osagai nagusi horien kantitate global txikiagoak zenbait eskualdetako arrainen biomasa murriztu lezake, eta anplifikazio trofiko efektuak sor ditzake (Chust et al., 2014). Berotzeak eta produkzio primarioaren aldaketak eragina dute ere arrantza-stocken hazkundean, ugalketan eta biziraupenean, eta inpaktuak dituzte arrantza-harrapaketa eta haien osararen. Ozeanoaren berotzeak organismoen banaketa geografikoaren aldaketei ere laguntzen die, hasi fitoplanktonekoetatik eta itsasoko ugaztunetaraino, eta, horren ondorioz, komunitatearen osaera aldatzen du (IPCC, 2019).

Klima-aldaketak itsas espezieetan dituen inpaktuak identifikatzeko lau adierazle definitu dira:

- **Tokiko ugaritasuna (biomasa edo banako kopurua) eta banaketa (grabitate-zentroa edo banaketaren mugak).** Itsasoaren berotzea populazioen banaketa poloetara desplazatzen ari da, eta etorkizunean hala egitea aurreikusten da (Cheung et al., 2013, Poloczanska et al., 2013). Berotzeari emandako erantzunetik eratorritako populazioen latitude-mugimenduaren ondorioz, latitudeko zerrenda bakoitzaren (zehazkiago, zerrenda termal bakoitzaren) ugaritasuna alda daiteke. Kontuan hartu behar da arrantzak eta espeziearen elikagai-eskuragarritasunak eragin handia izan dezaketela espezie komertzialen ugaritasunean. Beraz, hobe da adierazle hori espezie-multzo baterako (komunitaterako) erabiltzea, haren nitxo termala kontuan hartuta (Villarino et al., 2020).
- **Fenologia (urtaro-ziklo baten gertakaria, adib.: migrazioa, errunaldia), eremuaren arabera.** Itsasoaren berotzeak zenbait urtaro-zikloren (errunaldia, migrazioa) hasiera aurreratu dezake, eta amaiera atzeratu (Poloczanska et al., 2016). Gertakari fenologikoa gertatzen den urteko unea latitudearen arabera denez, kontuan hartu behar da.

### 3.4. Indicadores biológicos y del ecosistema marino

El calentamiento del océano, la acidificación e intensificación de la estratificación afecta a los ciclos de nutrientes, lo que puede tener un impacto negativo sobre la producción primaria. La menor cantidad global de estos dos componentes principales de la red trófica marina podría reducir la biomasa de los peces en ciertas regiones y producir efectos de amplificación trófica (Chust et al., 2014). El calentamiento y el cambio en la producción primaria tiene efectos sobre el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de los stocks pesqueros, con impactos sobre las capturas de pesca y su composición. El calentamiento del océano también contribuye a cambios en la distribución geográfica de organismos, que van desde el fitoplancton a los mamíferos marinos, modificando consecuentemente la composición de la comunidad (IPCC, 2019).

Para identificar los impactos del cambio climático sobre las especies marinas se han definido cuatro indicadores:

- **Abundancia local (biomasa o número de individuos) y distribución (centro de gravedad o límites de la distribución).** El calentamiento del mar está desplazando ya y prevé desplazar en el futuro la distribución de las poblaciones hacia los polos (Cheung et al., 2013, Poloczanska et al., 2013). Como consecuencia del desplazamiento latitudinal de las poblaciones derivado de la respuesta al calentamiento, la abundancia en cada franja latitudinal (más concretamente, en cada franja termal) puede variar. Hay que considerar que, en especies comerciales, la abundancia puede estar muy influenciada por la pesca y la disponibilidad de alimento de la especie. Por lo tanto, es mejor usar este indicador para un conjunto de especies (comunidad) teniendo en cuenta su nicho termal (Villarino et al., 2020).
- **Fenología (evento de un ciclo estacional, por ej. migración, puesta), por zonas.** El calentamiento del mar puede avanzar el inicio de ciertos ciclos estacionales (puesta, migración) y atrasar el fin de estos (Poloczanska et al., 2016). Dado que el momento en el año en el que tiene lugar el evento fenológico depende de la latitud, este debe tenerse en cuenta.

- **Sakoneko desplazamendua.** Adierazle hau berotzearekin lotuta dago, espezieak bere nitxo termala mantendu nahi duelako (Perry et al., 2005).
- **Banakoen tamaina (edo pisua), eremuaren arabera.** Itsasoaren berotzearekin alderantziz lotuta dago (Pauly & Cheung, 2018). Hala ere, espezie komertzialetan, arrantzak eta espeziearen elikagai-eskuragarritasunak eragin handia izan dezakete.
- **Desplazamiento en profundidad.** Este indicador está relacionado con el calentamiento dado que la especie busca mantener su nicho termal (Perry et al., 2005).
- **Tamaño (o peso) de los individuos, por zonas.** Está relacionado inversamente con el calentamiento del mar (Pauly & Cheung, 2018). No obstante, en especies comerciales, puede estar muy influenciado por la pesca y la disponibilidad de alimento de la especie.

### 3.4.1. Fitoplanktona

Organismo fitoplanktonikoak, produkzio primarioaren erantzule nagusiak direnez, funtsezko zeregina dute itsas ekosistemen egitura eta funtzionamendua mantentzeko (sare trofikoak mantentzen dituzte eta ziklo biogeokimikoak eta klima erregulatzen dituzte). Fitoplankton-komunitateak oso sentikorak dira ingurumen-aldagaiekiko, hala nola argiarekiko eta mantenugaiekiko. Faktore horiek,aldi berean, tenperaturarekin, haizearekin, hodeiekin, prezipitazioarekin eta abarrekin lotutako prozesuen mende daude. Klima-aldaketaren ondorioz aldagai horietan izandako aldaketek eragina izan lezakete ozeanoko biomasan, baita haren dinamikari ere (Boyd et al., 2015; Jonkers et al., 2019; Eker-Develi et al., 2022); halaber, loratzeen fenologiari eragin diezaieke, baita fitoplankton-komunitatearen osakerari ere, espezieen birbanaketaren ondorioz (Hinder et al., 2012; Mikaelyan et al., 2015), eta horrek,aldi berean, sare trofikoei eta ekosistema-zerbitzuei eragingo lieke (Staudinger et al., 2019; Trombetta et al., 2019). Beraz, ingurumen-aldaketek (atmosfera-aldaketek barne) itsas ekosistemetan duten eragina karakterizatzeko adierazle bat izan daitezke.

Fitoplankton-biomasari dagokionez, klorofila-kontzentrazioaren bidez neurtuta, ozeanoko jaitziera orokorra iradoki da azken hamarkadetan, azaleko tenperaturaren igoeraren eta estratifikazioa eta haren ondoriozko azaleko geruzako mantenugaiek eragindako mugaketa direla-eta (IPCC-AR5, 2013; Siegel et al., 2013). Baina azaleko tenperaturaren eta klorofilaren arteko harremana konplexua da eta zaila eskala globalean erlazionatzen (Behrenfeld et al., 2016; Dave & Lozier, 2013).

Behatoki honen barruan, a klorofilaren kontzentrazioa erabili da fitoplanktonaren ugaritasunaren/

### 3.4.1. Fitoplancton

Los organismos fitoplanctónicos, como principales productores primarios, juegan un papel esencial en el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos (sostienen las redes tróficas y regulan los ciclos biogeoquímicos y el clima). Las comunidades de fitoplancton son altamente sensibles a variables ambientales como la luz y nutrientes, factores que a su vez dependen de procesos relacionados con la temperatura, viento, nubosidad, precipitación, etc. Cambios en estas variables debido al cambio climático podrían afectar a la biomasa en el océano, a su dinámica o composición (Boyd et al., 2015; Jonkers et al., 2019; Eker-Develi et al., 2022) y también cambiar la fenología, composición o duración de los *blooms* y la estructura de la comunidad de fitoplancton por redistribución de especies (Hinder et al., 2012; Mikaelyan et al., 2015), lo que a su vez afectaría a las redes tróficas y servicios ecosistémicos (Staudinger et al., 2019; Trombetta et al., 2019). Por tanto, pueden ser un indicador para caracterizar la influencia que ejercen los cambios ambientales, incluidos los atmosféricos, en la base de los ecosistemas marinos.

En relación a la biomasa de fitoplancton, medida a través de la concentración de clorofila, se ha sugerido un descenso generalizado en los océanos durante las últimas décadas debido al incremento de la temperatura superficial y la estratificación y la consiguiente limitación por nutrientes en la capa superficial (IPCC-AR5, 2013; Siegel et al., 2013). Pero, la relación entre la temperatura superficial y la clorofila es compleja y difícil de correlacionar a escala global (Behrenfeld et al., 2016; Dave & Lozier, 2013).

En el marco de este observatorio, se ha utilizado la concentración de clorofila-a como un indicador

biomasaren eta produkzio primarioaren adierazle gisa. 1993–2020 aldian azaleko klorofila-kontzentrazioaren denbora-serieak aztertu dira (0–50 m eta 0 - 100 m bitartean), baita D2 estazioan neurtutako klorofila-maximoaren sakonerarenak ere. Azaleko klorofila-kontzentrazioak eta lehen 50 m-etako kontzentrazioak ez dute joera lineal esanguratsurik izan aztertutako aldian. Aitzitik, sakontasuneko analisiak adierazten du klorofila-kontzentrazioaren igoera esanguratsua ( $0,0252 \pm 0,0097 \mu\text{g l}^{-1}$  hamarkada bakoitzeko). Klorofila-maximoaren sakoneraren joerari dagokionez, serieak ez du joera esanguratsurik izan aztertutako aldian.

Halaber, klorofila-kontzentrazioa aztertu da kalitate-sarearen kostaldeko estazioetan (azaleko kontzentrazioa eta 25 m-koa batuz) 1995–2020 aldian. Emaitzek erakusten dute klorofila-kontzentrazioak ez duela joera esanguratsurik.

de la abundancia/biomasa de fitoplancton y de la producción primaria. Se han analizado las series temporales, en el periodo 1993–2020, de la concentración de clorofila en superficie y en la columna de agua (0 a 50 m y de 0 a 100 m) y de la profundidad del máximo de clorofila medida en la estación D2. La concentración de clorofila en superficie y la concentración integrada en los primeros 50 m no presentan tendencia lineal significativa en el periodo analizado. Por el contrario, el análisis por profundidad sí que indica un aumento significativo de la concentración de clorofila ( $0,0252 \pm 0,0097 \mu\text{g l}^{-1}$  por década). En cuanto a la tendencia de la profundidad del máximo de clorofila, la serie no presenta una tendencia significativa en el periodo analizado.

También se ha analizado la concentración de clorofila es las estaciones costeras de la red de calidad (sumando la concentración de superficie y la de 25 m) en el periodo 1995–2020. Los resultados indican que la concentración de clorofila no presenta una tendencia significativa.

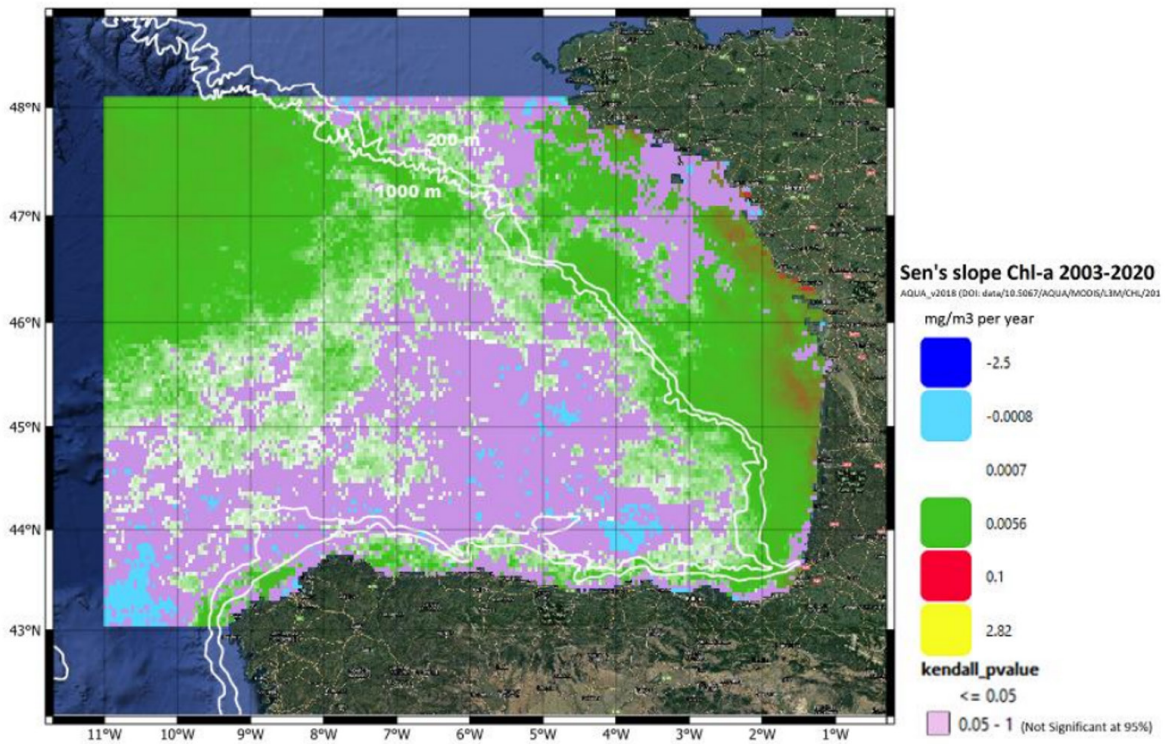
		Estazioa Estación	Aldia Periodo	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	p-balioa p-valor
Komunitatearen CTI CTI comunidad	(°C)	Kalitate-sarea Red calidad	2008–2020	-0,1048	0,2450
Azaleko Chla Chla superficie	( $\mu\text{g/l}$ )	D2	1993–2020	$0,0469 \pm 0,0675$	0,4873
Chla 0–50 m	( $\mu\text{g/l}$ )	D2	1993–2020	$-0,0038 \pm 0,0388$	0,9213
Chla sakoneraren arabera Chla por profundidad	( $\mu\text{g/l}$ )	<b>D2</b>	<b>1993–2020</b>	<b><math>0,0252 \pm 0,0097</math></b>	<b>0,0095</b>
Chla-ren geh. Sak. Prof máx Chla	(m)	D2	1993–2020	$0,9111 \pm 1,5247$	0,5507
Chla (0 m + 25 m) n estazioetan Chla (0m +25m) en n estaciones	( $\mu\text{g/l}$ )	Kalitate-sarea Red calidad	1995–2020	$-0,0215 \pm 0,0321$	0,5041
Azaleko Chla satelitea Chla superficie satélite	( $\text{mg/m}^3$ )	Satelitea Satélite	<b>2003–2020</b>	<b><math>0,0703 \pm 0,0117</math></b>	<b>&lt;0,0001</b>

2. taula. Fitoplankton-adierazleen joerak.

2. Tabla. Tendencias de los indicadores de fitoplancton.

Bizkaiko golko osoaren eskalan, satellite bidez neurtutako azaleko klorofila-kontzentrazioaren datuek adierazten dute handitzen ari dela  $0,0703 \pm 0,011 \text{ mg m}^{-3}$  hamarkada bakoitzeko tasarekin 2003–2020 aldian. Klorofila-kontzentrazioaren igoerak plataforma kontinental eta kontinente-azpindua Akitaniar-Armorikarrean gertatzen dira, Iberiar Penintsularen iparraldean eta ipar-mendebaldeko muturrean. Satellite-datuen analisiak ere goranzko joera esanguratsua erakusten du Donostiako buia ozeanografikoaren estazioaren posizioarekin bat datorren eremuan, eta  $0,0151 \pm 0,250 \text{ mg m}^{-3}$ -ko tasa izan du hamarkada bakoitzeko.

A escala de todo el golfo de Vizcaya, los datos de concentración de clorofila en superficie medida mediante satélite indican que está aumentando a una tasa de  $0,0703 \pm 0,011 \text{ mg m}^{-3}$  por década en el periodo 2003–2020. Los aumentos en la concentración de clorofila se dan en la plataforma y talud continental Aquitano-Armoricano, en el norte de la península ibérica y en el extremo noroeste. El análisis de los datos satelitales, en la zona coincidente con la posición de la estación de la boya oceanográfica de Donostia, también indican una tendencia creciente significativa con una tasa de  $0,0151 \pm 0,250 \text{ mg m}^{-3}$  por década.



7. Ird. Satellite bidez neurtutako azaleko klorofila-kontzentrazioaren joera 2003–2020 aldian.

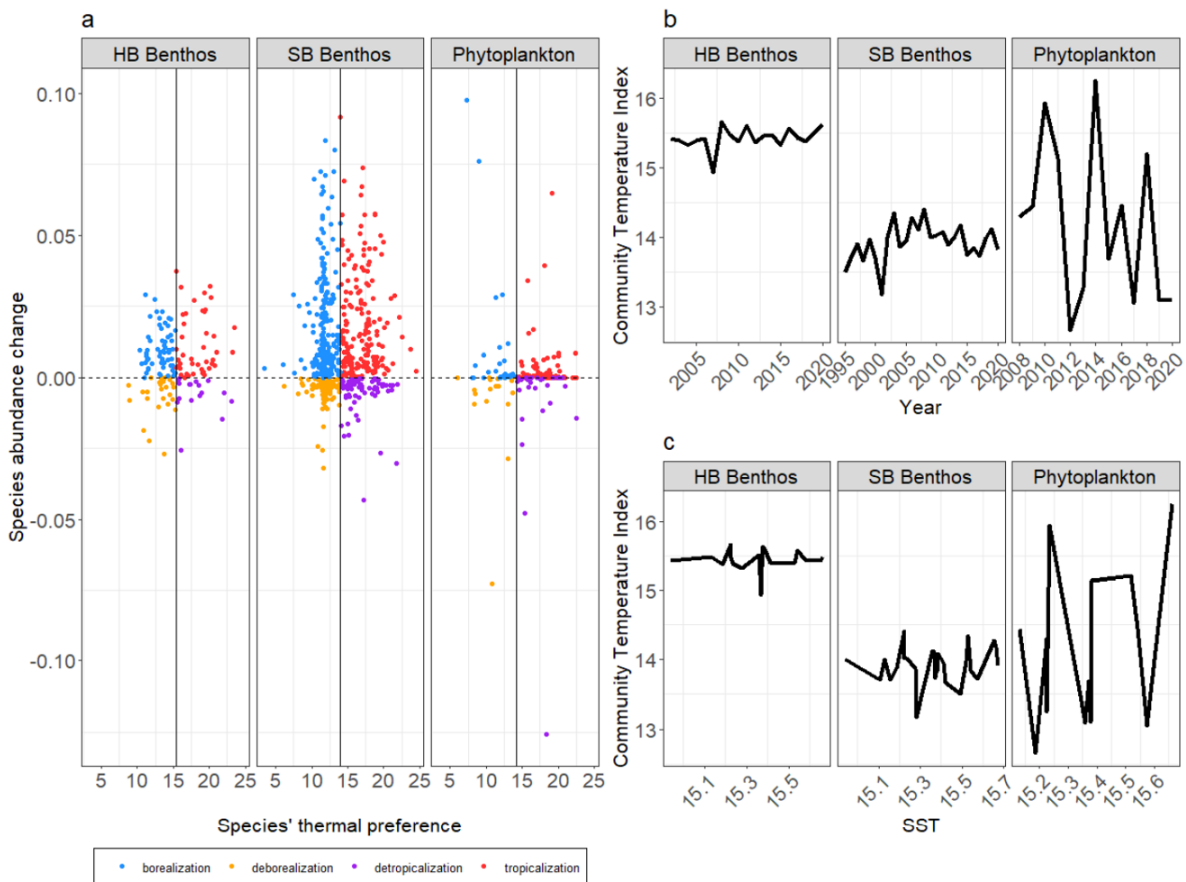
7. Fig. Tendencia en la concentración de clorofila superficial medida mediante satélite en el periodo 2003–2020.

Azkenik, fitoplankton-komunitateak Bizkaiko golkoan ozeanoko tenperatura-igoerari emandako erantzuna aztertu da, 'Community Temperature Index' (CTI) indizea erabiliz (Devictor et al., 2008). Indize honek komunitate jakin bateko afinitate termikoa hartzen du kontuan, tokian duen ugaritasun erlatiboaren arabera.

Por último, se ha analizado la respuesta de la comunidad de fitoplancton al incremento de temperatura del océano en el golfo de Vizcaya utilizando el 'Community Temperature Index' (CTI) (Devictor et al., 2008). Este índice considera las afinidades térmicas de una comunidad determinada en función de su abundancia relativa en el sitio.

CTIren denbora-bilakaera aztertzeaz gain, komunitateen osuera aldatzea eragiten duten prozesu ekologikoen intentsitatea ebaluatu da: tropikalizazioa (ur beroetako espezieen kopurua handitzea), borealizazioa (ur hotzetako espezieen kopurua handitzea), destropikalizazioa (ur beroetako espezieen kopurua murriztea) eta desborealizazioa (ur hotzetako espezieen murrizketa).

Además de analizar la evolución temporal del CTI, se ha evaluado la intensidad de los procesos ecológicos que ocasionan el cambio en la composición de las comunidades: tropicalización (aumento del número de especies propias de aguas cálidas), borealización (aumento del número de especies de aguas frías), de-tropicalización (disminución en el número de especies de aguas cálidas) y de-borealización (disminución de especies de aguas frías).



8. Ird. a) Denboran zeharreko CTIren (Community Temperature Index-en) aldaketei laguntzen dieten 4 prozesu ekologikoak fitoplanktoneko komunitateetan eta substratu gogor eta biguneko bentosean Bizkaiko golkoan. Irudian puntu bakoitzak espezie jakin baten ugartasunaren aldaketa erakusten du, bere optimo termikoaren arabera. Barra bertikalak CTIren batezbestekoa erakusten du komunitate biologiko bakoitzerako. Hala, puntu gorriek komunitatearen tropikalizazio bat adierazten dute (ur beroetako espezieen kopurua handitzea), puntu urdinek borealizazioa (ur hotzetako espezieen kopurua handitzea), puntu moreek destropikalizazioa (ur beroetako espezieen kopurua murriztea) eta puntu horiek desborealizazioa (ur hotzetako espezieen murrizketa). b) CTIren denboran zeharreko bilakaera komunitate biologiko bakoitzerako. c) CTIren eta Bizkaiko golkoko ozeanoaren azaleko tenperaturaren arteko erlazioa, GODAS ereduaren (Global Ocean Data Assimilation System) datuetan oinarrituta.

8. Fig. a) Los 4 procesos ecológicos que contribuyen a los cambios en el tiempo del CTI (Community Temperature Index) en las comunidades del fitoplancton y bentos de sustrato duro y blando en el golfo de Vizcaya. Cada punto en la figura muestra el cambio en la abundancia de una determinada especie en función de su optimo térmico. La barra vertical muestra la media del CTI para cada comunidad biológica, de tal manera que los puntos rojos indican una tropicalización de la comunidad (aumento en el número de especies de aguas cálidas), los puntos azules la borealización (aumento en el número de especies de aguas frías), los puntos morados una de-tropicalización (disminución en el número de especies de aguas cálidas) y los puntos amarillos una de-borealización (disminución de especies de aguas frías). b) Evolución temporal del CTI para cada comunidad biológica c) relación entre el CTI y la temperatura superficial del océano en el Golfo de Vizcaya a partir de datos del modelo GODAS (Global Ocean Data Assimilation System).

CTIren gehikuntzak gertatzen dira tropikalizazioaren eta deborealizazioaren konbinazioa borealizazioaren eta destropikalizazioaren konbinazioa baino indartsuagoa denean. 149 espezie aztertu ondoren, emaitzek erakusten dute CTIren denboran beharakada txiki bat egon dela, ez-esanguratsua, harreman positiboa baina ez esanguratsua dagoela CTIren eta azaleko tenperaturaren artean, eta komunitate fitoplanktonikoaren tropikalizazioa (% 36) eta borealizazioa (% 27) nagusitu direla.

### 3.4.2. Makroalgak eta substratu gogorreko beste komunitate batzuk

Azterketa batzuek harremanetan jartzen dituzte klima-aldaketaren ondorioz alda daitezkeen hainbat ingurumen-aldagaitako aldaketak –tenperatura, intsolazioa, olatuen energia, etab.– makroalga-estaldurako eta biomasako aldaketekin, bai euskal kostaldean (Díez et al., 2012, Borja et al., 2018, Borja et al., 2013, Díez et al., 2014, Muguerza et al., 2017), bai Kantauriko kostaldean (Voerman et al., 2013, Duarte et al., 2013, Martínez et al., 2015, Casado-Amezúa et al., 2019, Ramos et al., 2020) nahiz Bizkaiko golko osoan (Alcock, 2003).

CTIren analisiak, 2002–2020 aldian makroalga-espezieen eta substratu gogorreko beste komunitate batzuen 146 espezie kontuan hartuta, hazkunde txiki ez-esanguratsua adierazten du, 2019ra arte aztertutako seriean ez bezala –hazkunde esanguratsua baitzuen azken horrek-. Substratu gogorreko komunitate bentonikoan nagusi diren prozesu ekologikoak tropikalizazioa (% 41) eta borealizazioa (% 37) dira.

### 3.4.3. Substratu biguneko makroornogabe bentikoak

Azterketa batzuek harremanetan jartzen dituzte zenbait ingurumen-aldagaitan izandako aldaketak (tenperatura, ibai-emia, prezipitazioa eta aldakortasun atmosferikoa gisakoetan, hala nola NAO eta Atlantikoaren ekialdeko patroia –EA ingelesezko siglen arabera–) makroornogabeen ugartasunaren eta biomasaren aldaketekin, bai euskal kostaldean (Garmendia et al., 2008, Borja et al., 2016, Pérez et

Los aumentos de CTI ocurren cuando la combinación de tropicalización y de-borealización es más fuerte que la combinación de borealización y de-tropicalización. Tras analizar 149 especies, los resultados muestran una ligera disminución en el tiempo del CTI no significativa, una relación positiva pero no significativa entre el CTI y la temperatura superficial y una predominancia de la tropicalización (36 %) y borealización (27 %) de la comunidad fitoplanctónica.

### 3.4.2. Macroalgas y otras comunidades de sustrato duro

Existen diversos estudios que relacionan cambios en diversas variables ambientales susceptibles de cambio asociadas al cambio climático como temperatura, insolación, y la energía del oleaje, con cambios en la cobertura y biomasa de macroalgas, tanto en la costa vasca (Díez et al., 2012, Borja et al., 2018, Borja et al., 2013, Díez et al., 2014, Muguerza et al., 2017) como en la costa Cantábrica (Voerman et al., 2013, Duarte et al., 2013, Martínez et al., 2015, Casado-Amezúa et al., 2019, Ramos et al., 2020) o en todo el golfo de Vizcaya (Alcock, 2003).

El análisis del CTI, considerando 146 especies de macroalgas y otras comunidades de sustrato duro en el periodo 2002–2020, indica un ligero incremento no significativo, a diferencia de la serie analizada hasta 2019 cuyo incremento era significativo. Los procesos ecológicos que predominan en la comunidad bentónica de sustrato duro son la tropicalización (41 %) y borealización (37 %).

### 3.4.3. Macroinvertebrados bentónicos de sustrato blando

Distintos estudios relacionan cambios en diversas variables ambientales como la temperatura, caudal de ríos, precipitación, y modos de variabilidad atmosférica como la NAO, el patrón del Atlántico Este (EA por sus siglas en inglés), con cambios en la abundancia y biomasa de macroinvertebrados, tanto en la costa vasca (Garmendia et al., 2008, Borja et al., 2016, Pérez et al., 2009), como en

al., 2009), bai Kantauriko kostaldean (Fernández, 2016), nahiz Bizkaiko golko osoan (Alcock, 2003).

Substratu biguneko makroornogabe bentikoetarako CTIren analisiak, 579 espezie kontuan hartuta, substratu gogorreko komunitatearentzako emaitzen joera bera erakusten du, CTIren hazkunde ez-esanguratsu txiki bat denboran zehar, 2019ra arte aztertutako seriean ez bezala, hazkunde esanguratsua baitzuen azken horrek. Substratu biguneko komunitate bentikoan nagusi diren prozesu ekologikoak tropikalizazioa (% 41) eta borealizazioa (% 37) dira baita ere.

### 3.4.4. Arrainak

Temperaturaren igoeraren ondorio nagusietako bat banakoen tamaina edo pisua murriztea izan daiteke. Antxoa Gipuzkoako arrantza-sektorean intereseko espeziea denez, eta denbora-serie luzeak dituen, berotzeak tamainan duen efektuaren analisia espezie horretan zentratzen da. Antxoaren adinaren arabera pisuaren analisiak adierazten du 1987-2020 aldian jaitsi egin dela azterketaren azken urteetan.

la costa Cantábrica (Fernández, 2016), o en todo el golfo de Vizcaya (Alcock, 2003).

El análisis del CTI para macroinvertebrados bentónicos de sustrato blando, considerando 579 especies, muestran la misma tendencia que los resultados para la comunidad de sustrato duro, un pequeño incremento no significativo del CTI en el tiempo, a diferencia de la serie analizada hasta 2019, cuyo incremento era significativo. Los procesos ecológicos que predominan en la comunidad béntica de sustrato blando son también la tropicalización (41 %) y borealización (37 %).

### 3.4.4. Peces

Uno de los principales efectos del incremento de la temperatura puede ser la disminución del tamaño o peso de los individuos. Al ser la anchoa una especie de interés en el sector pesquero guipuzcoano, y contar con largas series temporales, el análisis del efecto del calentamiento en el tamaño se centra en esta especie. El análisis del peso por edad de la anchoa en el periodo 1987-2020 indica que este ha disminuido en los últimos años de estudio.

	Batez besteko pisua (g) Batezbestekoa (Q1-Q3) Peso medio (g) Media (Q1-Q3)	Malda (g urte bakoitzeko) Pendiente (g por año)	r <sup>2</sup> zuzendua r <sup>2</sup> Corregida	p-balioa p-valor
Adina 1 Edad 1	15,56 (12,15-17,35)	-0,25	0,47	< 0,001
Adina 2 Edad 2	26,08 (22,65-29,45)	-0,36	0,61	< 0,001
Adina 3 Edad 3	31,50 (27,05-35,38)	-0,33	0,34	< 0,001

3. taula. Banakoen batez besteko pisuaren joerak antxoaren adin-klasearen arabera Bizkaiko golkoan 1987-2019 aldian.

3. Tabla. Tendencias en el peso medio de los individuos por clase de edad de anchoa en el golfo de Vizcaya en el periodo 1987-2019.



### 3.5. Adierazle berriak

2021ean zehar klima-aldaketaren hiru adierazle berriren jarraipena inplementatu da: pH-a (azido-tzearen neurria), bakterio-komunitateak eta *Zostera noltei*-ren itsas belardiak.

Itsas ingurunearen azidotzea, hau da, pH-a murriztea, CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazio atmosferikoa handitzearen ondorioa da (Doney et al., 2009), eta ozeanoak hura xurgatzearena. CO<sub>2</sub> itsasoko uretan disolbatzen denean, azido karbonikoa sortzen da. Erreakzio kimiko horrek ozeanoaren azidotzea eragiten du, eta klima-aldaketaren beste efektu batzuekiko independentea da (Pelejero et al. 2010). 1751tik 1994ra bitartean ozeanoko azaleko pH-a jaitsi egin da, 80ko hamarkadaren amaieraz geroztik 0,017–0,027 pH-unitate hamarkada bakoitzeko tasan (IPCC, 2019). Azidotzeak itsas faunan dituen ondorioak aldakorrek dira (Hendriks et al., 2010, Melzner et al., 2020), eta eragin handiagoa du organismo kaltzifikatzaileetan (Kroeker et al., 2010) –esate baterako, muskuiluaren gisako gure kostaldeko moluskuetan– eta aldaketa esanguratsuak eragiten ditu komunitateen egituran (Sunday et al., 2017). Itsasoko pH-aren kostaldeko monitorizazioa funtsezkoa da ozeanoaren azidotzearen magnitudea eta horrek fauna kaltzifikatzailean dituen inpaktuak ebaluatzeko. Orain arte ez dago aldagai honen neurri erregularrak dituen aldi baterako serierik. Neurketa-sentsore autonomo bat ezartzeko lan egin da, Gipuzkoako kostaldean pHaren neurriak modu erregularrean lortzeko.

Bakterioak itsasoko kate trofikoaren oinarrian daude, eta funtsezko zeregina dute itsasoko ekosistemen biogeokimikan eta funtzionamenduan. Ingurumen-aldaketekiko sentikorrek diren komunitateak dira (itsasoaren berotzearekiko, esate baterako), eta osagai batzuek erreplikazio-tasa azkarrak dituzte, beraz, potentzial handia dute organismo adierazle gisa. Denbora-serie luzeagoak monitorizatu eta eskuragarri izateak aukera emango du bakterio-komunitateen osaeran eta ugaritasunean izandako aldaketen bilakaera ezagutzeko eta horiek detektatzeko.

*Zostera noltei*<sup>4</sup> da euskal estuarioetan dagoen fanerogamo -espezie bakarra. Espezie hori, gaur egun, galzorian dagoen espezie gisa katalogatuta dago Basa eta Itsas Fauna eta Landaredian Arriskuan

4 Belardiak osatzen dituzten itsas landareak.

### 3.5. Nuevos indicadores

Durante 2021 se han implementado el seguimiento de tres nuevos indicadores de cambio climático: pH (medida de la acidificación), comunidad de bacterias y praderas marinas de *Zostera noltei*.

La acidificación del medio marino, esto es, la disminución del pH, es debida al efecto directo del aumento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (Doney et al., 2009) y su absorción por el océano. Cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua del mar, se forma el ácido carbónico. Esa reacción química provoca la acidificación del océano y es independiente de otros efectos del cambio climático (Pelejero et al. 2010). Entre 1751 y 1994 se ha producido una disminución del pH superficial del océano a una tasa de 0,017–0,027 unidades de pH por década desde finales de la década de los 80 (IPCC, 2019). Los efectos de la acidificación sobre la fauna marina son variables (Hendriks et al., 2010, Melzner et al., 2020), con una mayor incidencia sobre organismos calcificantes (Kroeker et al., 2010) como pueden ser en nuestras costas moluscos de tipo mejillón, y cambios significativos en la estructura de las comunidades (Sunday et al., 2017). La monitorización en la costa del pH del mar es clave para evaluar la magnitud de la acidificación del océano y sus impactos sobre la fauna calcificante. Hasta el momento no se disponen series temporales con medidas regulares de esta variable. Se ha trabajado en el establecimiento de un sensor de medida autónomo que permita obtener medidas de pH en la costa guipuzcoana de manera regular.

Las bacterias están en la base de la cadena trófica marina y juegan un papel fundamental en la biogeoquímica y el funcionamiento de los ecosistemas marinos. Son comunidades altamente sensibles a los cambios ambientales (como el calentamiento del mar) y algunos de sus componentes tienen rápidas tasas de replicación, por lo que tienen un alto potencial como organismos indicadores. La monitorización y disponibilidad de series temporales más largas permitirá conocer la evolución y la detección de cambios en la composición y abundancia de las comunidades bacterianas.

*Zostera noltei*<sup>4</sup> es la única especie de fanerógamas marinas presente en los estuarios vascos. Esta especie se encuentra actualmente catalogada como

4 Plantas marinas que forman praderas.

dauden Espezieen Euskal Katalogoan (eta, mareartekoa denez, klima-aldaketaren inpaktuarekiko oso kaltebera izan daitekeela uste da; izan ere, itsas mailaren igoerari eta itsasoko baldintza fisiko-kimiko aldaketari erantzunez, hura garatzeko dagoen espazioa mugatua izan daiteke). Euskal Autonomia Erkidegoan espezie kaltebera denez, marearteko estuario-sistemaren erresilientziaren adierazletzat jotzen da hornitzen dituen ekosistema-zerbitzuen ondorioz, hala nola estuarioen higaduraren aurkako babesa eta ekosistemen sorrera. Adierazle gisa ezarri da espezie horren itsas belardiek hartzen duten azalera, estaldura eta dentsitatea, bai belardiak naturalak diren estuarioetan (Bidasoan) bai esperimentalki leheneratu diren lekuetan (Oria).

especie en peligro de extinción dentro del Catálogo Vasco de Especies Amenazadas de la Fauna y Flora Silvestre y Marina y debido a su carácter intermareal se considera que puede ser sumamente vulnerable al impacto del cambio climático, ya que en respuesta al ascenso del nivel del mar y el cambio en las condiciones físico-químicas marinas, podrían ver limitado el espacio disponible para su desarrollo. Al ser una especie vulnerable en el País Vasco, se considera un indicador de resiliencia del sistema estuárico intermareal por los servicios ecosistémicos que provee, como protección frente a la erosión de estuarios y la creación de ecosistemas. Se ha establecido como indicador el área ocupada, la cobertura y densidad de las praderas marinas de esta especie tanto en los estuarios donde las praderas son naturales (Bidasoa) como donde han sido restauradas experimentalmente (Oria).

## 4. Joerak klima-aldaketari edo beste faktore batzuei egozteko atribuzio-analisia

## 4. Análisis de atribución de las tendencias al cambio climático u otros factores

### 4.1. Olatuen muturreko gertakariak eta kostaldeko higadura handitzea

Klima-aldaketak kostaldeko eremuetan izango dituen inpaktu nagusiak ekaitzen maiztasun eta/edo intentsitate-aldaketekin lotzen dira, bai eta proiektatutako itsas mailaren igoerarekin ere. Horrek gure itsasertzeko hondartza asko nabarmen murriztea ekar dezake. Eskura dauden datuek olatu-altuera adierazgarria eta olatuen batez besteko potentzia handitzeko joera adierazten dute. Era berean, datuek erakusten dute Zarauzko hondartzako mareaz gaindiko eremua galtzeko joera dagoela. Hondartza horrek urtaro-ziklo ondo definitua du, azarotik martxora bitartean hondar-galera izaten da denboraleen eraginez eta martxotik urrira bitartean hondartza berreskuratzen da. Energia-maila handiko neguko olatuak baldintzatzen du, neurri handi batean, hondartzaren aldakortasun morfologikoa. Olatuen neguko jarduerak atmosferaren eta ozeanoaren aldakortasun-patroi handien eragin nabarmena du. Aldakortasun hori eskala handiko urrutiko konexioen bidez azal daiteke, aldizkakotasun desberdinak dituzten klima-oszilazioen bidez.

Atal honetan, eskala luzeko patroi atmosferikoen aldaketen eta olatuen aldaketen eta aldaketa horien eta kostaldeko higaduraren arteko erlazio posiblea aztertzen da.

#### 4.1.1. Patroi atmosferikoen eta olatuen arteko harremana

Lehenik eta behin, eskala luzeko eredu atmosferikoen aldaketen eta olatuen aldaketen arteko erlazio posiblea aztertu da.

Patroi atmosferikotzat jotzen ditugu maiztasun txikiko eta eskala luzeko aldakortasun atmosferiko

### 4.1. Aumento de eventos extremos de oleaje y erosión costera

Los principales impactos del cambio climático en las zonas costeras se relacionan con cambios en la frecuencia y/o intensidad de tormentas, así como con el ascenso del nivel del mar proyectados. Esto puede llevar a la reducción marcada de muchas playas de nuestro litoral. Los datos disponibles indican una tendencia al aumento de la altura de ola significativa y la potencia media del oleaje. Asimismo, los datos indican una tendencia a la pérdida del área supramareal de la playa de Zarautz. Esta presenta un ciclo estacional bien definido, con pérdida de arena por los temporales entre noviembre y marzo y una recuperación de la playa entre marzo y octubre. Es el oleaje energético de invierno el que condiciona en mayor parte la variabilidad morfológica de la playa. La actividad de las olas de invierno está muy influenciada por los grandes patrones de variabilidad atmosférica y oceánica. Esta variabilidad puede explicarse por teleconexiones de gran escala, con oscilaciones climáticas que presentan distintas periodicidades.

En esta sección se analiza la posible relación entre los cambios en los patrones atmosféricos de larga escala y los cambios en el oleaje y la relación de estos cambios con la erosión costera.

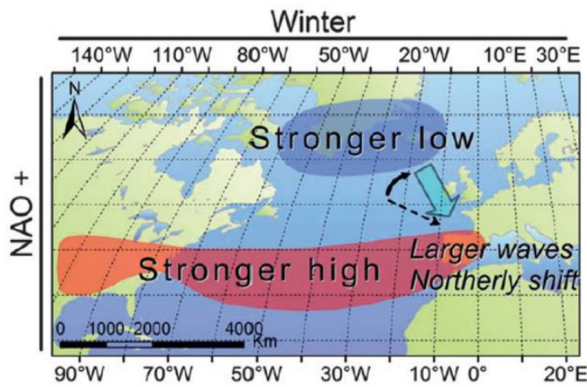
#### 4.1.1. Relación entre los patrones atmosféricos y el oleaje

En primer lugar, se ha analizado la posible relación entre los cambios en los patrones atmosféricos de larga escala y los cambios en el oleaje.

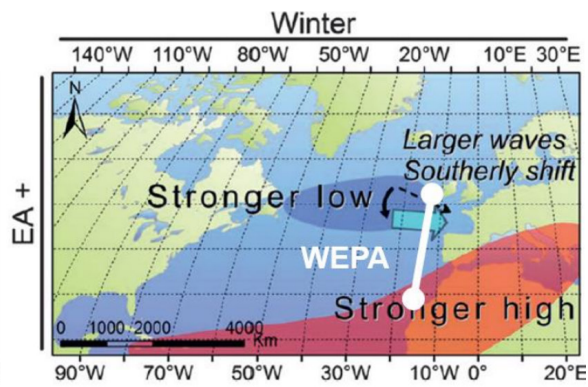
Entendemos por patrones atmosféricos los modos de variabilidad atmosférica y oceánica de baja

eta ozeanikoko moduak, eskala globaleko urrutiko konexioek azal ditzaketenak. Patroi horiek distantzia luzeek bereizita dauden klima-aldagaien arteko asoziazio estatistiko gisa definitzen dira, eta espazialki identifikatzen dira zeinu desberdin edo berdineko presio-anomalien hainbat zentro desberdin gisa. Aldakortasun horrek eragin handia du tenperaturan, prezipitazioetan edo ekaitzen intentsitatean, eta, aldi berean, lehorreko eta itsasoko biosferan. Kostaldeko arriskuei ere asko eragiten diete eskala handiko klima-patroiek.

frecuencia y de larga escala, que pueden ser explicados por teleconexiones a escala global. Estos patrones se definen como asociaciones estadísticas entre variables climáticas separadas por largas distancias y se identifican espacialmente como diversos centros de anomalías de presión de diferente o mismo signo. Esta variabilidad tiene una gran influencia en la temperatura, las precipitaciones o en la intensidad de tormentas, y a su vez en la biosfera terrestre y marina. Los riesgos costeros también se ven fuertemente afectados por los patrones climáticos a gran escala.



9. ir. Presio atmosferikoaren patroien anomalia NAO indize positiboarentzat (ezk.) eta EA indize positiboarentzat (esk.). Puntuen kokapena WEPA indizea kalkulatzeko (puntu zuriak). Charles et al.en aldatua (2012).



9. Fig. Anomalia del patrón de presión atmosférica para el índice NAO positivo (izq.) y para un índice EA positivo (dcha.). Localización de los puntos para el cálculo del índice WEPA (puntos blancos). Modificado de Charles et al. (2012).

Gauden Ipar Atlantikoko eremuko aldakortasun atmosferikoaren modu nagusia Ipar Atlantikoko Oszilazioa da (North-Atlantic Oscillation, NAO). Bizkaiko golkoko olatuen joerekin lotzen den atmosferako beste zirkulazio-modu bat Atlantiko Ekialdeko patroia da (East-Atlantic Oscillation, EA) (Charles et al., 2012). 10. irudiak presio atmosferikoaren patroien anomalien adibide bat erakusten du NAO positiboko eta EA positiboko gertakari batean zehar. Bi gertakariak uhin-garaiera handitzea eta olatuen norabidea aldatzea eragiten dute, eta horrek modu desberdinean eragin diezaike kostaldera hedatutako olatuei eta, beraz, horien inpaktuari, kostaldearen orientazioaren arabera.

El modo de variabilidad atmosférica principal en la zona del Atlántico Norte en la que nos encontramos es la Oscilación del Atlántico Norte (North-Atlantic Oscillation, NAO). Otro modo de circulación atmosférica que se relaciona con las tendencias del oleaje en el golfo de Vizcaya es el denominado patrón del Atlántico Este (East-Atlantic Oscillation, EA) (Charles et al., 2012). La Figura 10 muestra un ejemplo de anomalías del patrón presión atmosférica durante un evento de NAO positivo y de EA positivo. Los dos eventos producen un incremento de altura de ola y un cambio de dirección del oleaje, lo cual puede afectar de manera distinta al oleaje propagado hasta la costa y por tanto a su impacto, dependiendo de la orientación de la costa.

Gainera, duela gutxi egindako azterlan batek (Castelle et al., 2017) indize berri bat sartu du: Europa mendebaldeko presio-anomalia (West Europe Pressure Anomaly, WEPA), Europako kostalde atlantikoan zeharreko presio atmosferikoan

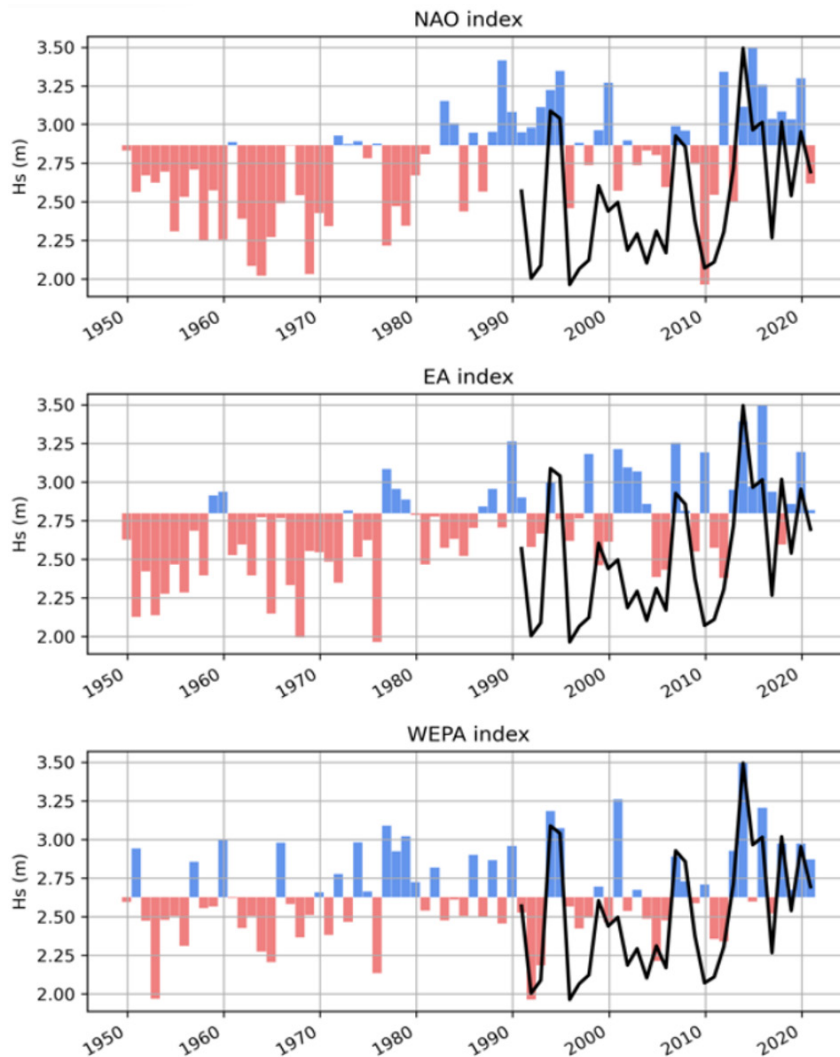
Además, un estudio reciente (Castelle et al., 2017) ha introducido un nuevo índice denominado Anomalia de Presión de Europa occidental (West Europe Pressure Anomaly, WEPA), basado en la

oinarritua. Indize horrek korrelazio ona du Bizkaiko golkoaren hego-mendebaldeko eremuko neguko uhin-garaierarekin.

Indize atmosferikoen hileko balioen (NAO, EA eta WEPA) eta Bilbo-Bizkaiko buian erregistratutako neguko batez besteko olatu-altuera adierazgarriaren arteko korrelazioaren analisiak adierazten du WEPA indizeak korrelaziorik onena duela ( $R_{NAO}=0,52$ ;  $R_{EA}=0,42$ ;  $R_{WEPA}=0,81$ ) eta 2014an uhin-garaiera handitzea harrapatzen duen bakarra da, neguan muturreko ekaitzak dituen urtean.

presión atmosférica a lo largo de la costa atlántica de Europa. Este índice presenta una buena correlación con la altura de ola en invierno en la zona suroeste del Golfo de Vizcaya.

El análisis de la correlación entre los valores mensuales de los índices atmosféricos (NAO, EA y WEPA) y la altura de ola significativa media de invierno registrada en la boya de Bilbao-Vizcaya, indica que el índice WEPA presenta la mejor correlación ( $R_{NAO}=0,52$ ;  $R_{EA}=0,42$ ;  $R_{WEPA}=0,81$ ) y es además el único que captura el incremento de la altura de ola en el año 2014, año con temporales extremos durante el invierno.

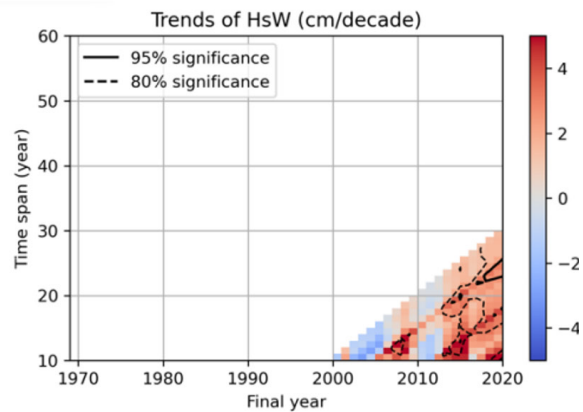
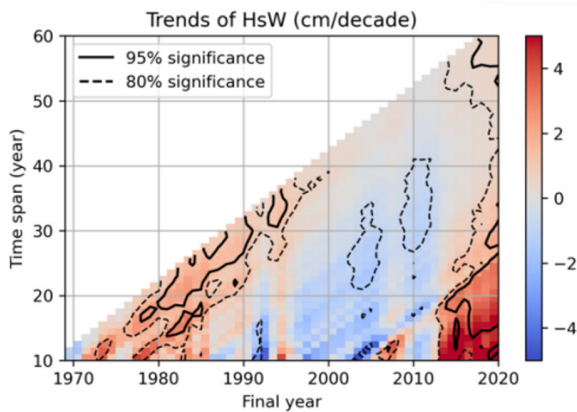


10. ird. Indize atmosferikoak (barrak) eta Bilbo-Bizkaiko buian erregistratutako olatu-altuera adierazgarria neguan (abendua-urtarrila-otsaila-martxo aaldiaren batezbestekoa).

10. Fig. Índices atmosféricos (barras) y altura de ola significativa registrada en la boya de Bilbao-Vizcaya en invierno (promedio diciembre-enero-febrero-marzo).

Muturreko olatuetan behatutako joeren analisiak adierazten du behatutako joera analisi-urtearen arabera dela (joera desberdinak lortzen dira 2019ra edo 2020ra arteko datuekin) eta erabilitako datu-iturriaren arabera (buiar edo berranalisis). Neguko uhin-garaieraren joerari dagokionez, analisiak aldakortasun handia erakusten du serie laburreko luzeretan, hau da, analisi-urtearen mendekoa da hein handi batean.

El análisis de tendencias observadas en el oleaje extremal indica que la tendencia observada depende del año de análisis (se obtienen tendencias diferentes con datos hasta 2019 o hasta 2020) y de la fuente de datos utilizada (boyas o reanálisis). En el caso de la tendencia de la altura de ola invernal, el análisis muestra una gran variabilidad para longitudes de serie corta, esto es, dependen mucho del año de análisis.

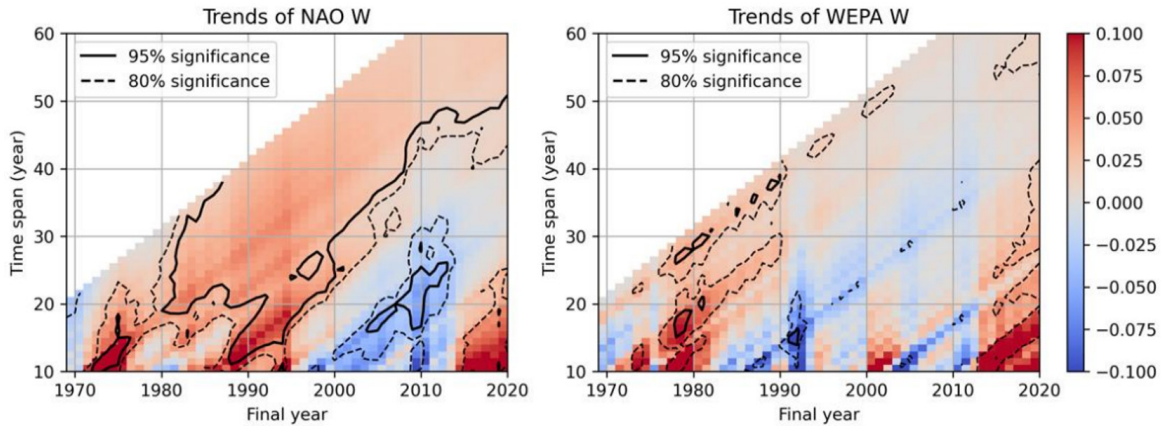


11. ir. Neguko olatu-altuera adierazgarriaren joeren analisisa, berranalisi-datuekin (ezk.) eta Bilbo-Bizkaiko buiaren datuekin lortua (esk.). Joera (kolorea, cm/hamarkada-tan) analisi-urtearen arabera (ardatz horizontala) eta aztertutako seriearen iraupenaren arabera (ardatz bertikala).

11. Fig. Análisis de tendencias de altura de ola significativa de invierno obtenida con datos de reanálisis (izq.), y con datos de la boya Bilbao-Vizcaya (dcha.). Tendencia (color, en cm/década) en función del año de análisis (eje horizontal) y de la duración de la serie analizada (eje vertical).

Analisisa indize atmosferikoekin errepikatuz gero, joera positibo handiagoa ikusten da oso epe luze-  
 ra (> 50 urteko serieak) NAO indizerako. Horrek azal  
 lezake berranalisi-datuaren goranzko joera (buiako  
 datuak laburregiak dira joera egiaztatzeko). WEPA  
 indizearekin lortutako epe laburreko joeren emaitzen  
 ereduua uhin-garaieraren ereduaren antzekoa da,  
 eta WEPAri olatu-joeren balizko ekarpena adierazten  
 dio.

Repetiendo el análisis con los índices atmosféricos, se observa una tendencia positiva más significativa a muy largo plazo (series > 50 años) para el índice NAO. Esto podría explicar la tendencia creciente observada en los datos de reanálisis (los datos de la boya son demasiado cortos para verificar la tendencia). El patrón de resultados de tendencias a plazo más corto obtenido con el índice WEPA es parecido a los patrones de altura de ola, indicando una posible contribución de tendencias de oleaje a WEPA.



12. ir. NAO indize atmosferikoen (ezkerrean, neguko batezbestekoak) eta WEPAren (eskuinean) joeren analisia. Joera (kolore-mapa, indize/hamarkada unitatean) analisi-urtearen arabera (ardatz horizontala) eta aztertutako seriearen iraupenaren arabera (ardatz bertikala).

12. Fig. Análisis de tendencias de los índices atmosféricos NAO (izquierda, promedios invernales) y WEPA (derecha). Tendencia (mapa de color, en unidad de índice/década) en función del año de análisis (eje horizontal) y de la duración de la serie analizada (eje vertical).

#### 4.1.2. Kostaldeko higaduraren inpaktua

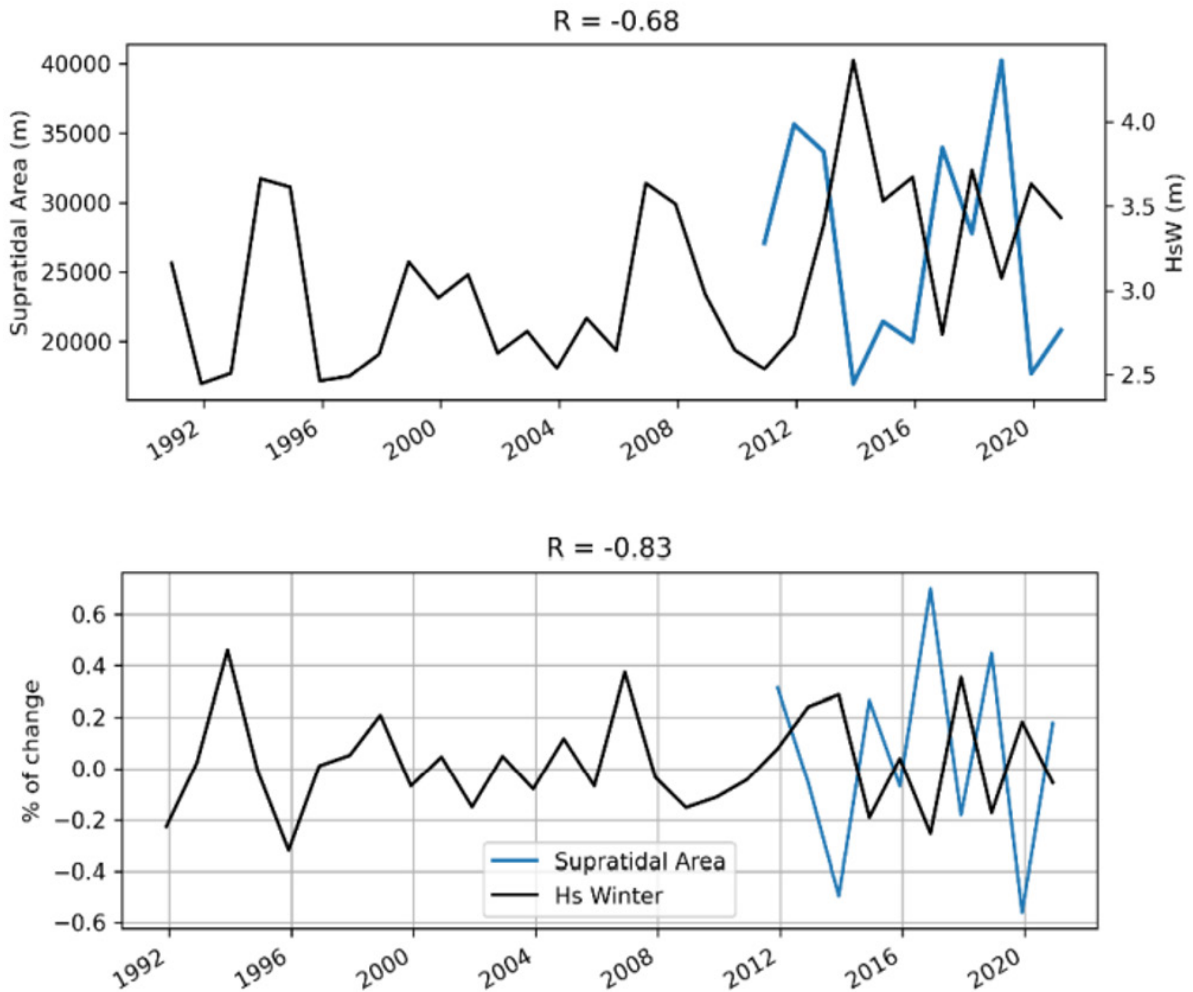
Marearteko eta mareaz gaindiko eremuak Zarauzko hondartzako 2020ra arteko datuekin izan duen bilakaeraren analisiak ez du joera esanguratsurik erakusten, baina, hondartzako profil jakin batzuetan, kosta-lerroaren atzerakada esanguratsua ikusten da. Olatuekin gertatzen den bezala, datu-serie labur samarraren luzeraren ondorioz (10 urte), lortutako joerak urte batetik bestera alda daitezke.

Kostaldeko higaduraren atribuzio-analisia egin da, Bilbo-Bizkaiko buian ikusitako batez besteko eta muturreko olatuen arteko erlazio posibleak aztertuz, baita Zarauzko hondartzan ikusitako aldaketa morfologikoak ere, zehazki, hondartzako mareaz gaindiko eremuko aldaketak. Emaitzek erakusten dute mareaz gaindiko eremuaren eta neguko batez besteko olatu-altuera adierazgarriaren arteko korrelazioa  $R=0,68$ koa dela, eta aldagai horien aldaketen arteko korrelazioa  $R=0,83$ koa dela urte baten eta besteren artean. Emaitza horrek lotura argia erakusten du Bilbo-Bizkaiko buian erregistratutako olatu-altuera adierazgarriaren eta Zarauzko hondartzaren higaduraren artean.

#### 4.1.2. Impacto en la erosión costera

El análisis de la evolución del área intermareal y supramareal con los datos de hasta 2020 de la playa de Zarautz no muestra tendencias significativas, aunque, en determinados perfiles de la playa, se observa un retroceso significativo de la línea de costa. Al igual que sucede con el oleaje, debido a la longitud de la serie de datos relativamente corta (10 años), las tendencias obtenidas pueden cambiar de un año a otro.

Se ha realizado un análisis de atribución de la erosión costera estudiando las posibles relaciones entre el oleaje medio y extremal observado en la boya de Bilbao-Vizcaya y los cambios morfológicos observados en la playa de Zarautz, en concreto cambios en el área supramareal de la playa. Los resultados muestran una correlación entre el área supramareal y la altura de ola significativa media invernal de  $R=0,68$  y una correlación de los cambios entre un año y el otro de estas variables de  $R=0,83$ . Este resultado muestra una clara relación entre los cambios de altura de ola significativa registrada en la boya de Bilbao-Vizcaya y la erosión de la playa de Zarautz.



13. ir. Zarauzko hondartzako neguko mareaz gaindiko eremuaren eta Bilbo-Bizkaiko buiako neguko batez besteko olatu-altuera adierazgarriaren arteko korrelazioaren analisia. Goian: mareaz gaindiko eremuaren denbora-seriea (lerro urdina) eta olatu-altuera adierazgarria (lerro beltza). Behean: aurreko neguarekiko aldaketak, ehunekotan, mareaz gaindiko eremuan (lerro urdina) eta olatu-altuera adierazgarriari dagokionez (lerro beltza).

13. Fig. Análisis de la correlación entre el área supramareal invernal de la playa de Zarautz y la altura de ola significativa media invernal en la boya de Bilbao-Vizcaya. Arriba: serie temporal del área supramareal (línea azul) y altura de ola significativa (línea negra). Abajo: cambios respecto al invierno anterior, en porcentaje, del área supramareal (línea azul) y de la altura de ola significativa (línea negra).

Egindako analisiak emaitza erabakigarriak erakusten ditu, hondartzako neguko mareaz gaidiko eremuaren eta neguko batez besteko olatu-altuera adierazgarriaren arteko korrelazio-analisan oinarrituta, eta azken hori, aldi berean, WEPA indize atmosferikoarekin lotzen da.

El análisis realizado muestra resultados concluyentes a partir del análisis de correlación entre el área supramareal invernal de la playa y la altura de ola significativa media de invierno que, a su vez, se correlaciona con el índice atmosférico WEPA.

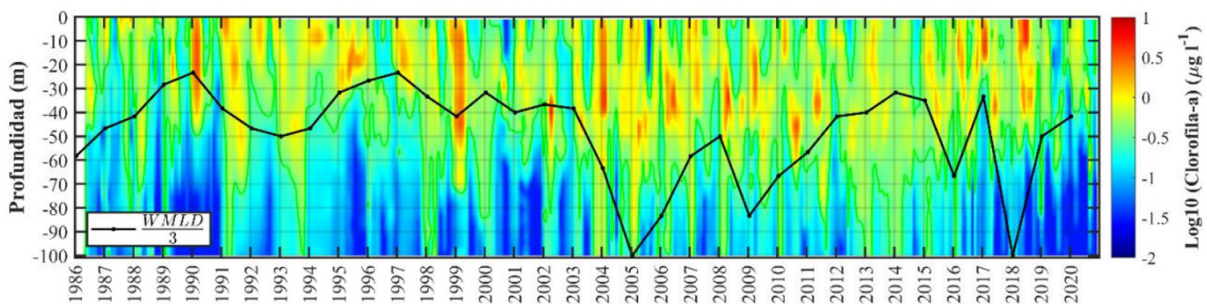


## 4.2. Aldaketak ur-zutabearen egituraren eta produkzio primarioan

Azaleko nahaste-geruzaren sakonera eta ur-zutabearen estratifikazioa bereziki garrantzitsuak dira, sakoneko eremuetatik azalekoenataranzko mantenu-gai-ekarpenarekin duten erlazioa dela-eta, eta horrek eragin zuzena du produkzio primarioan. Zehazki, neguan nahaste-geruza sakontzeak (WMLD) udaberrian fitoplanktona loratzea errazten du, baina oraindik ez dakigu udan eta udazkenean gorabeheraren bat duen. Kantauri Mendebaldean, Cudillero (Asturias) estazio hidrografikoan, González-Gil et al.-ek (2018) neguko nahasketak fitoplanktonean duen eragina aztertu zuten. Autore horiek ondorioztatu zuten bai mantenu-gaien kontzentrazioa eta bai fitoplanktonaren ugartasuna udaberrian handitzen direla, neguko nahasketa areagotzearekin batera. Gainera, autore horiek ondorioztatu zuten udaberriko loraketa biziagoa zela eta beranduago gertatzen zela neguko nahasketa hala bazen. Eta, aitzitik, udaberriko loraketaren intentsitatea murriztu egiten zela neguko nahasketaren ondorioz. Aipatzekoa da autore hauek ez zutela ikusi neguko nahasketak udaberriaz haragoko eragina izango zuenik.

## 4.2. Cambios en la estructura de la columna de agua y la producción primaria

La profundidad de la capa de mezcla superficial y la estratificación de la columna de agua son especialmente relevantes por su relación con el aporte de nutrientes desde zonas profundas a las capas más superficiales, con el consiguiente efecto directo sobre la producción primaria. En concreto, la profundización de la capa de mezcla en invierno (WMLD), favorece la floración de fitoplancton en primavera, pero todavía se desconoce si tiene alguna incidencia en verano y otoño. En el cantábrico occidental, en la estación hidrográfica de Cudillero (Asturias), González-Gil et al. (2018) estudiaron la influencia de la mezcla invernal en el fitoplancton. Estos autores concluyeron que tanto la concentración de nutrientes como la abundancia de fitoplancton se incrementan en primavera al aumentar la mezcla invernal. Además, dichos autores concluyeron que la floración primaveral era más intensa y tardía si la mezcla invernal lo era. Y, por el contrario, la intensidad de la floración primaveral disminuía al decrecer la mezcla invernal. Cabe destacar que estos autores no observaron que la mezcla invernal tuviese influencia más allá de la época primaveral.



14. ird. a klorofilaren kontzentrazioa ur-zutabearen (D2 estazioa), neguko nahaste-geruzaren bilakaerarekin batera (1986–2020).

14. Fig. Concentración de clorofila-a en la columna de agua (estación D2) junto con la evolución de la capa de mezcla invernal (1986–2020).

Azaleko mantenu-gaien kontzentrazioaren eta WMLDren arteko korrelazio-analisia urtarriletik apirilera bitarteko hilabeteak bakarrik kontuan hartuz egin da; izan ere, udaberritik udara artean mantenu-gaiak pixkanaka agortzen dira azalean, produkzio primarioa handitzearen ondorioz, eta, beraz, mantenu-gaiak gainazal azpiko mailetan kontzentratzen

El análisis de correlación entre la concentración de los nutrientes en superficie y la WMLD se ha realizado únicamente considerando los meses de enero a abril debido a que en el transcurso de la primavera a verano los nutrientes se van agotando progresivamente en superficie al aumentar la producción primaria, y los nutrientes se concentran

dira. Análisiak erakusten du  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , NID eta  $\text{SiO}_4$ -k korrelazio positibo esanguratsua dutela WMLDrekin, eta  $\text{NO}_2$  eta  $\text{PO}_4$ -k, berriz, korrelazio positibo-ez esanguratsua dutela, esangura-maila mugatik gertu egon arren. Azaldutako aldakortasun-ehuneko txikia bada ere, horrek guztiak esan nahi du azaleko mantengaien kontzentrazioaren urtarriletik apirilera arteko aldaketa neguko nahaste-geruzaren sakoneraren arabera dela neurri batean, eta haren intentsitateak ere modulatu duela. Hau da, neguko nahasketa handiko urteetan, nahaste-geruzaren sakonera handiagoa denean, azaleko mantengaien kontzentrazioa handiagoa da urtarriletik apirilera bitartean. Aipatu dugun bezala, WMLDK azaleko mantengaien aldakortasunaren ehuneko txiki samarra azaltzen du. Hori logikoa da azaleko mantengaiak maila sakonagoetakoek baino aldakortasun handiagoa dutelako, eta haien aldakortasunak hainbat faktoreri erantzuten dielako, hala nola ur gezako fluxuei (ibai- eta euri-ekarpenei).

por tanto en los niveles sub-superficiales. El análisis muestra que  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , NID y  $\text{SiO}_4$  se correlacionan positivamente y de forma significativa con WMLD, mientras que  $\text{NO}_2$  y  $\text{PO}_4$  muestran correlación positiva no significativa, aunque el nivel de significación está cerca del límite. Aunque el porcentaje de variabilidad explicado es reducido, todo ello indica que la concentración de nutrientes superficiales de enero a abril varía, en parte, en función del espesor de la capa de mezcla invernal y queda también modulada por la intensidad de esta. Es decir, en años de mucha mezcla invernal, con mayor espesor de la capa de mezcla, la concentración de nutrientes superficiales es mayor entre enero y abril. Como hemos mencionado la WMLD explica un porcentaje relativamente reducido de la variabilidad de los nutrientes superficiales. Esto resulta lógico porque los nutrientes superficiales presentan mayor variabilidad que los nutrientes a niveles más profundos y su variabilidad responde a múltiples factores como pueden ser los flujos de agua dulce (aportes fluviales y pluviales).

Mantenguaia Nutriente	Malda Pendiente	Korrelazio-koefizientea (r) Coeficiente de correlación (r)	p-balioa p-valor
$\text{NH}_4$	<b>0,00899</b>	<b>0,3176</b>	<b>&lt;0,0001</b>
$\text{NO}_2$	0,00022	0,0888	0,0863
$\text{NO}_3$	<b>0,01052</b>	<b>0,1845</b>	<b>0,0003</b>
NID	<b>0,01698</b>	<b>0,2806</b>	<b>&lt;0,0001</b>
$\text{PO}_4$	0,00027	0,0935	0,0710
$\text{SiO}_4$	<b>0,01698</b>	<b>0,2599</b>	<b>&lt;0,0001</b>

4. taula. Mantengaien kontzentrazioaren (urtarriletik apirilera) eta neguko nahaste-geruzaren lodieraren arteko korrelazioa 1995-2020 aldirako.

4. Tabla. Correlación entre la concentración de los nutrientes en superficie de enero a abril y el espesor de la capa de mezcla invernal para el periodo 1995-2020.

Halaber, WMLDren eta a klorofilaren kontzentrazioaren arteko korrelazioa ere aztertu da, desfasearekin (azalera, maximoa eta ur-zutabearen 50 eta 100 metroetan integratua), ur-zutabearen mantengai ez-organikoen neurririk ezak lortutako emaitzen interpretazioa mugatzen duen arren.

También se ha analizado la correlación, con desfase, entre la WMLD y la concentración de clorofila-a (superficie, máximo e integrada en los 50 y 100 m de la columna de agua), aunque la falta de medidas de nutrientes inorgánicos en la columna de agua limita la interpretación de los resultados obtenidos.

Nahasketa-intentsitateak ez du korrelazio esanguratsurik a klorofilaren maximoarekin, azaleko kontzentrazioarekin eta lehen 50 m-etako kontzentrazio integratuarekin apirilera arte. Horrek esan nahi du produkzio berria handiagoa dela zenbat eta handiagoa izan neguko mantenugaien erreserba, hau da, zenbat eta handiagoa izan neguko nahasketa.

Maiatzean, korrelazioa ez da esanguratsua, eta hori mantenugaien erreserbaren agortze gisa interpreta daiteke. Seguruenik mantenugaien kargaren zati bat birmineralizazioagatik itzultzen da ur-zutabera ekainetik aurrera, eta, horren ondorioz, lehen 100 m-etan integratutako klorofila-kontzentrazioa handiagoa da zenbat eta handiagoa izan neguko mantenugaien erreserba.

Ekainean nahasketa-gertakariak oraindik garrantzitsuak dira, eta horrek eragingo luke azpigainazalaren maximoa ur-zutabean barreiatu eta diluitzea.

Uztailan zein abuztuan korrelazioa esanguratsua da, bai azpigainazaleko maximatorako, bai lehenengo 50 eta 100 m-etako kontzentrazio integraturako. Estratifikazio-garaian klorofilaren azpigainazaleko maximoa agertzeko, estratifikazio moderatua gertatu behar da, hondoratze-gertakarien eta nahasketa bertikaleko gertakarien ondorioz hausten ez dena (hautsiz gero maximo hori ur-zutabearen zabalera handiagora sakabanatu eta diluituko litzateke). Gainera, azalerrateak moderatua izan behar du estratifikazio-mailari eusteko eta produkzio berriaren zati baten offshore esportazioa saihesteko.

Maiatzean adierazitakoaren antzera, irailean, berriro ere, korrelazioa ez da esanguratsua, agian mantenugaien karga berriro agortu izanaren ondorioz.

Azkenik, urrian ikusten da bai a klorofilaren maximoa bai lehen 50 eta 100 metroko sakoneretan integratutako a klorofila handitu egiten direla neguko mantenugaien erreserba handitu ahala. Lortutako emaitzak berresteko, beharrezkoa izango litzateke mantenugai ez-organikoen neurriak edukitzea ur-zutabean zehar.

La intensidad de mezcla no correlaciona significativamente con el máximo de clorofila-a, la concentración superficial y la concentración integrada en los primeros 50 m hasta el mes de abril. Esto estaría indicando que la producción nueva es mayor cuanto mayor es la reserva de nutrientes en invierno, es decir, cuanto mayor es la mezcla invernal.

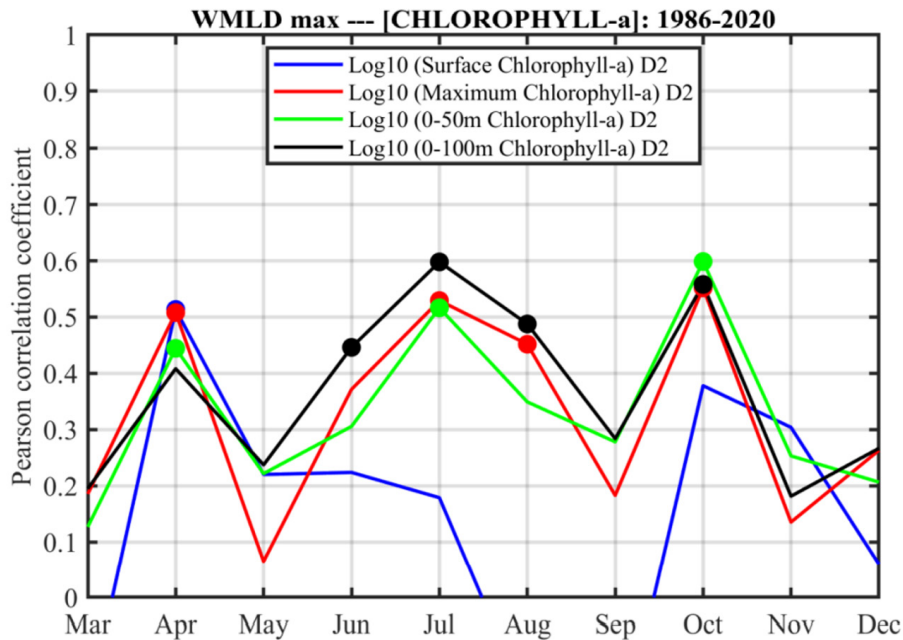
En mayo, la correlación no es significativa, lo que podría interpretarse como un agotamiento de la reserva de nutrientes. Posiblemente parte de la carga de nutrientes retorna a la columna de agua por remineralización a partir de junio, lo que da lugar a que concentración de clorofila integrada en los primeros 100 m sea tanto mayor cuanto mayor ha sido la reserva de nutrientes en invierno.

En junio, los eventos de mezcla son todavía importantes, lo que daría lugar a que el máximo subsuperficial se dispersase y diluyese en la columna de agua.

Tanto en julio como agosto la correlación es significativa tanto para el máximo subsuperficial como para la concentración integrada en los primeros 50 y 100 m. Para que aparezca el máximo subsuperficial de clorofila en la época de estratificación debe darse una estratificación moderada que no se rompa por eventos de hundimiento y mezcla vertical (lo que dispersaría y diluiría el máximo en un espesor mayor de columna de agua). Además, el afloramiento debe ser moderado para mantener el grado la estratificación y para evitar una exportación offshore de parte de la producción nueva.

De forma similar a lo apuntado en mayo, en septiembre, nuevamente, la correlación no es significativa lo que podría deberse a un nuevo agotamiento de la carga de nutrientes.

Finalmente, en octubre, se puede observar que tanto el máximo de clorofila-a como la clorofila-a integrada en los primeros 50 y 100 m de profundidad se incrementan con el incremento de la reserva de nutrientes invernal. Para confirmar los resultados obtenidos sería necesario disponer de medidas de nutrientes inorgánicos a lo largo de la columna de agua.



15. ird. Korrelazio-maila, desfasearekin, neguko nahaste-geruzaren sakonera maximoaren (urtarrila-martxo) eta azaleko a klorofilaren kontzentrazioaren, a klorofilaren maximoaren eta ur-zutabearen lehen 50 eta 100 metroetan integratutako a klorofilaren artean. Puntuak balio esanguratsuak adierazten dituzte.

15. Fig. Grado de correlación con desfase entre el máximo de profundidad de la capa de mezcla invernal (enero-marzo) y la concentración de clorofila-a en superficie, el máximo de clorofila-a, y la clorofila-a integrada en los primeros 50 y 100 m de la columna de agua. Los puntos indican valores significativos.

### 4.3. Itsasoaren berotzea eta inplikazioak itsas baliabideei dagokienez

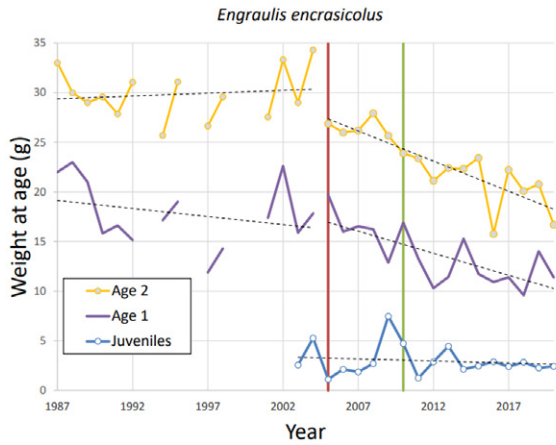
Bizkaiko golkoko itsasoaren azaleko tenperaturak goranzko joera esanguratsua du,  $0,205\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,038\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ko tasarekin hamarkada bakoitzeko 1981-2020 aldian. Tasa hori 2003-2019 aldirako lortutakoa baino handiagoa da, eta horrek esan nahi du berotzearen moteltzea gertatu dela azken bi hamarkadetan. Berotzea ia Bizkaiko golko osoan gertatzen da, baina tasa altuagoekin ( $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  hamarkada bakoitzeko) haren hego-ekialdean (4. ird.).

Itsasoaren berotzeak eragina du arrantza-stocken hazkundean, ugalketan eta biziraupenean, eta eragina du arrantza-harrapaketan eta haien osakeran. Kasu honetan, itsasoaren berotzearen eta antxoaren eta sardinaren adinaren araberako pisuaren murrizketaren arteko erlazio posiblea aztertu da.

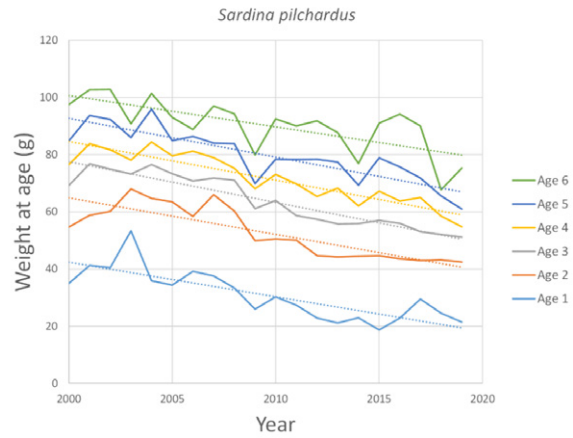
### 4.3. Calentamiento del mar e implicaciones en los recursos marinos

La temperatura superficial del mar en el golfo de Vizcaya presenta una tendencia creciente y significativa con una tasa de  $0,205\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,038\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década en el periodo 1981-2020. Esta tasa es superior a la obtenida para el periodo 2003-2019, lo que indica una ralentización del calentamiento en las dos últimas décadas. El calentamiento se produce en prácticamente todo el golfo de Vizcaya, pero con tasas más altas ( $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década) en el sureste del mismo (Fig. 4).

El calentamiento del mar tiene efectos sobre el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de los stocks pesqueros, con impactos sobre las capturas de pesca y su composición. En este caso se ha analizado la posible relación entre el calentamiento del mar y la disminución observada del peso por edad de la anchoa y sardina.



16. ird. Batez besteko pisuaren joerak adin-motaren arabera Bizkaiko golkoan antxoaren kasuan 1987–2020 aldian (ezk.) –lerro bertikalek arrantzategiaren itxieraren hasiera (gorria, 2005) eta amaiera (berdea, 2010) adierazten dute– eta sardinaren kasuan (esk.), 2000–2019 aldian.



16. Fig. Tendencias en el peso medio de los individuos por clase de edad en el golfo de Vizcaya e (dcha.) anchoa en el periodo 1987–2020, las líneas verticales indican el inicio (rojo, 2005) y final (verde, 2010) del cierre de la pesquería y (izq.) de la sardina en el periodo 2000–2019.

Antxoari buruzko analisiak (1987–2019) eta sardinari buruzkoak (2000–2019) adierazten dute adinaren arabeko pisua murriztu dela aztertutako aldi guztietan, eta bereziki azken 15 urteetan, azken azterlanekin bat etorritz (Doray et al., 2018; Escribano et al., 2019; Verón et al., 2020). Ondo ezarrita dago itsas banako ektotermikoen<sup>5</sup> tamaina itsasoko tenperaturarekin alderantziz erlazionatuta dagoela (Atkinson, 1994, Huss et al., 2019, Pauly & Cheung, 2018). Hala ere, arrain-banakoen tamaina (luzera edo pisua) beste faktore batzuek ere baldintza dezakete, hala nola populazioaren tamainak eta dentsitateak (Rose et al., 2001), espeziearen elikagai-erabilgarritasunak (Ljungström et al., 2020), arrantza-ustiapenak –arrantza-debekualdiaren efektu positiboak barne (Barnett et al., 2017)–, eta petrolio-isuriaren efektu toxikoek (Carls et al., 1999). Sardinaren tamainaren murrizketa lotu da banako gazteenen biziraupen-tasa handitzearekin, errute-eremuetan elikagaia lortzeko lehia (dentsitatearen mendeakoa) eragiten duenarekin (Doray et al., 2018), edo baldintza-faktorearekin (Véron et al., 2020).

<sup>5</sup> Beroa lortzeko kanpoko iturrien mende dauden izaki bizidunak, haien gorputzaren tenperatura aldatu egiten da giro-tenperatura-rekin.

El análisis sobre la anchoa (1987–2019) y la sardina (2000–2019) indican que el peso por edad ha disminuido en todos los periodos analizados y especialmente en los últimos 15 años, en concordancia con estudios recientes (Doray et al., 2018; Escribano et al., 2019; Verón et al., 2020). Está bien establecido que el tamaño de los individuos ectotérmicos<sup>5</sup> marinos está inversamente relacionado con la temperatura del mar (Atkinson, 1994, Huss et al., 2019, Pauly & Cheung, 2018). Sin embargo, el tamaño (longitud o peso) de los individuos de los peces puede estar condicionado además por otros factores como el tamaño y la densidad de la población (Rose et al., 2001), la disponibilidad de alimento de la especie (Ljungström et al., 2020), la explotación pesquera –incluidos los efectos positivos de la veda pesquera (Barnett et al., 2017)–, y los efectos tóxicos del derrame de crudo (Carls et al., 1999). La reducción del tamaño de la sardina se ha asociado con el aumento de la tasa de supervivencia de los individuos más jóvenes, lo que provoca una competencia (dependiente de la densidad) por el alimento en las zonas de desove (Doray et al., 2018), o al factor de condición (Véron et al., 2020).

<sup>5</sup> Seres vivos que dependen de fuentes externas para la obtención de calor, su temperatura corporal varía con la temperatura ambiental.

Antxoak eta sardinak batez besteko pisuaren beheranzko joera erakutsi dute populazioaren biomasaren joera desberdinetarako (goranzkoa antxoarentzat eta beheranzkoa sardinarentzat) (CIEM, 2018; Ibaibarriaga, 2021). Gainera, antxoaren tamainaren beherakada gertatu da arrantza-debekualdian ere (2005–2010). Bestalde, tamaina-murrizketaren estimazioak itsasoko tenperaturaren eraginez bakarrik espero zitezkeenak baino handiagoak dira, seguruenik. Horren guztiaren ondorioz, aurrez ondoriozta daiteke itsasoaren berotzearen eragin zuzen batek Bizkaiko golkoan espezie horien tamainaren murrizketa partzialki bakarrik azal lezakeela, eta ekosistemaren eta jarduera antropogenikoen beste mekanismo batzuek zeregin garrantzitsua izan lezaketela.

Tanto la anchoa como la sardina han mostrado una tendencia decreciente en el peso medio para diferentes tendencias de la biomasa de la población (creciente para la anchoa y decreciente para la sardina) (CIEM, 2018; Ibaibarriaga, 2021). Además, la reducción del tamaño de la anchoa ha continuado durante la veda de pesca (2005–2010). Por otro lado, las estimaciones de reducción de tamaño son probablemente mayores de lo que podría esperarse sólo por el efecto de la temperatura del mar. Todo ello lleva a concluir preliminarmente que un efecto directo del calentamiento del mar podría explicar solo parcialmente la reducción de tamaño de estas especies en el golfo de Vizcaya y que otros mecanismos del ecosistema y las actividades antropogénicas podrían tener un papel importante.

## 5. Ondorioak

### Itsasoaren berotzea

Bizkaiko golkoan itsasoaren berotzea ikusten da 80ko hamarkadatik aurrera, 0,16 eta 0,25 °C bitarteko tasekin hamarkada bakoitzeko, azalean handiago izanik lehen 100 m-etan baino, eta handiago izanik golkoaren hego-mendebaldean kanporago dagoen eremuan baino. Halaber, 14 °C-ko isoterma- ren sakontzea ikusten da. Bizkaiko golkoaren eskalan behatutako itsasoaren berotzea lotuta egongo litzateke Atlantikoaren ipar-ekialdeko berotzearekin, klima-aldaketari lotutako ozeano-atmosfera interakzio-patroiekin lotuta dagoenarekin. Euskal kostaldeko itsasoaren berotzea nabarmenagoa azal liteke lurraren eta plataforma kontinentalaren eraginengatik, eta, beraz, airearen berotzearengatik, klima-aldaketaren adierazle nagusia baita; haren igoera giza jarduerak eragindako berotegi-efektuko gasen kontzentrazioaren igoeraren emaitza zuzena da (IPCC-AR5, 2013).

### Berotzeak biodibertsitatean izan ditzakeen ondorioak

Dirudenez, itsasoaren nahiz airearen berotzeak eta eguneko eguzki-orduaren igoerak ondorioak dituzte bentoseko komunitateen birbanaketan, ur beroetako espezieei nolabait abantaila txiki bat emanez (tropikalizazioa) ur hotzetako espezieekin alderatuta (borealizazioa); azken horiek ere gora egin dute, eta fitoplankton-espezieen osaeran ez da tenperatura-tarte optimoekin lotutako aldaketarik nabaritzen. Antxoaren populazioaren 1987-2020 aldiko analisiak adierazten du adinaren araberako pisua murriztu egin dela azken urteotan, baina itsasoaren berotzearekin duen erlazioa xehetasun handiagoz aztertu behar da, beste faktore batzuen ondorio izan daitezkeelako, hala nola dentsitatearekiko mendekotasunarena.

### Itsas mailaren igoera

Bizkaiko golkoaren itsasoaren batez besteko maila 1,7 eta 3,4 cm hamarkada bakoitzeko arteko tasarekin igozten ari da (2,5 cm/hamark. batez beste) 90eko

## 5. Conclusiones

### Calentamiento del mar

En el golfo de Vizcaya se aprecia un calentamiento del mar a partir de los años 80, con tasas que oscilan entre 0,16 y 0,25 °C por década, siendo mayor en superficie que en los primeros 100 m y mayor en el sureste del golfo que en la zona más exterior. Se observa también una profundización de la isoterma de 14 °C. El calentamiento del mar observado a escala del golfo de Vizcaya estaría asociado al calentamiento del Atlántico noreste, ligado a los patrones de interacción océano-atmósfera, asociados al cambio climático. El calentamiento del mar más acusado en la costa vasca podría explicarse por la influencia terrestre y de la plataforma continental y, por lo tanto, al calentamiento del aire, el cual es el principal indicador de cambio climático, cuyo aumento es resultante directo del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero provocado por la actividad humana (IPCC-AR5, 2013).

### Posibles consecuencias del calentamiento en la biodiversidad

El calentamiento tanto del mar como del aire y el incremento de horas diarias de sol parece tener consecuencias en la redistribución de las comunidades del bentos, favoreciendo ligeramente más a las especies de aguas cálidas (tropicalización) que a las de aguas frías (borealización), las cuales también han aumentado, mientras que no se aprecian cambios en la composición de las especies de fitoplancton relacionadas a sus rangos óptimos de temperatura. El análisis de la población de la anchoa en el periodo 1987-2020 indica que el peso por edad ha disminuido en los últimos años, si bien su relación con el calentamiento del mar debe ser analizada con mayor detalle ya que podría obedecer a otros factores como la denso-dependencia.

### Ascenso del nivel del mar

El nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya está ascendiendo a una tasa de entre 1,7 y 3,4 cm por década (en promedio 2,5 cm por década) desde los

hamarkadaz geroztik. Bizkaiko golkoko kostaldeko eta itsasoko igoera hori bat dator itsas mailaren eskala globaleko igoerarekin. Itsas mailaren igoera bizkortzen ari da eremuan azken hiru hamarkadetan XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta, aurretiazko azterlanekin bat etorritik (Woppelmann et al., 2006, Dangendorf et al., 2019).

### **Olatuen eta haizearen eta kostaldeko higaduraren muturreko gertakariak handitzea**

Azken 30 urteotan olatuen batez besteko baldintzak pixka bat igo direla ikusi da (Hs-ren igoera 3,1 cm hamarkada bakoitzeko Bilbo-Bizkaiko buian, eta Pw-rena, aldiz, % 3,5-ekoa hamarkada bakoitzeko) eta olatuen muturreko baldintza batzuetan gorakada ikusi da (Hs90-en 18 cm-ko igoera esanguratsua hamarkada bakoitzeko eta Hs100-en igoera ez-esanguratsua). Muturreko gertakarien igoeraren balizko arrazoiak ikertzeko eta klima-aldaketarekin erlazionatu ahal izateko, lehen urratsa eskala handiko eredu atmosferikoekin erlazio posible bat identifikatzea izan da. Korrelazioa dago Bilbo-Bizkaiko buiako neguko olatu-altuera adierazgarriaren eta WEPA indizearen artean. Gainera, analogiak daude neguko olatuen joeren eta WEPA indizearen artean. Eraitza horiek euskal kostaldean ikusitako muturreko gertakarien igoeraren eta WEPA indizearen arteko harremana iradokitzen dute. Halaber, neguko olatu-altuera adierazgarriaren eta Zarauzko hondartzako neguko mareaz gairako azaleraren arteko korrelazioa ere ikusi da. Horrek guztiak adierazten du olatuen igoeraren ondorioz eta, bereziki, muturreko zenbait gertakarien ondorioz (adibidez, 2013-2014ko neguko ekaitzen sekuentzia), Zarauzko hondartza itsasgorako kosta-lerroaren higadura handia jasaten ari dela 2010-2020 aldian.

### **Aldaketak ur-zutabeen, gazitasunean, oxigeno disolbatuan, mantenugaietan eta fitoplanktonean**

Ikusi da neguko nahaste-geruzaren sakonera pixka bat handitzen ari dela (19 m-ko tasa hamarkada bakoitzeko 1986az geroztik, probabilitatea esanguraren mugan egon arren), azaleko zenbait mantenugaien kontzentrazioak gora egin duela (batez ere nitratoarenak eta silikatoarenak), baita 1995az geroztik 0 m eta 25 m-ko sakonerako oxigeno disolbatuaren kontzentrazioak ere, klorofila-kontzentrazioa pixka bat igozten dela eta gazitasuna pixka bat jaitsi

años 90. Este ascenso en la costa y mar del golfo de Vizcaya es consistente con el ascenso del nivel medio del mar a escala global. El ascenso del nivel del mar se está acelerando en la zona en las tres últimas décadas respecto al ascenso medio en el siglo XX, en coherencia con estudios previos (Woppelmann et al., 2006, Dangendorf et al., 2019).

### **Incremento de eventos extremos de oleaje y de viento y erosión costera**

En los últimos 30 años se ha observado un ligero aumento en las condiciones medias de oleaje (incremento de Hs de 3,1 cm por década en la boya de Bilbao-Vizcaya y de 3,5% por década de Pw) y un aumento en ciertas condiciones extremas de oleaje (aumento significativo en 18 cm por década de Hs90 y no significativo de Hs 100). Para investigar las posibles causas del incremento de eventos extremos y poder relacionarlo con el cambio climático, el primer paso ha sido identificar una posible relación con patrones atmosféricos de gran escala. Existe una correlación entre la altura de ola significativa de invierno en la boya de Bilbao-Vizcaya y el índice WEPA. Además, existen analogías entre las tendencias del oleaje de invierno y el índice WEPA. Estos resultados sugieren una posible relación entre el incremento de eventos extremos observados en la costa vasca y el índice WEPA. También se ha observado una correlación entre la altura de ola significativa de invierno y la superficie supramareal media de invierno en la playa de Zarautz. Todo ello indica que, como consecuencia del incremento del oleaje y en particular de ciertos eventos extremos (como la secuencia de tormentas de invierno 2013-2014), la playa de Zarautz está siendo sujeta a una importante erosión de la línea de costa de pleamar en el periodo 2010-2020.

### **Cambios en la columna de agua, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y fitoplancton**

Se ha observado que el espesor de la capa de mezcla invernal está profundizándose ligeramente (tasa de 19 m por década desde 1986, aunque la probabilidad está en el límite de significación), un aumento en la concentración de algunos nutrientes en superficie (principalmente nitrato y silicato), en la concentración de oxígeno disuelto a 0 m y 25 m de profundidad desde 1995, un ligero aumento de la concentración de clorofila y un ligero descenso de la salinidad en los primeros 100 m. El análisis de la



delas lehen 100 metroetan. Prozesu horien arteko erlazioaren analisiak adierazten du neguko nahaste-geruzaren sakontzeak berekin dakarrela, neurri batean, neguan mantengaien kontzentrazioa handitzea, eta horrek, aldi berean, klorofila-kontzentrazioa handitzea ahalbidetzen duela, udaberriko loratzean haziko den fitoplanktonaren estimazioa dena. Klima-aldaketaren atribuzio-analisi horrekin jarraitu behar da, neguko nahaste-geruza sakontzeko joera zehazten duten prozesuak ez baitaude zuzenean lotuta ozeanoaren berotzearekin.

Klima-aldaketarekin modu zuzenagoan lotutako adierazle aldaketa-tasak (itsas tenperaturaren igoera, 14 °C-ko isoterma sakontzea, airearen tenperaturaren igoera, intsolazioaren igoera eta itsasoaren batez besteko mailaren igoera) oso antzera mantentzen dira azken urte honetako datuak sartuta (2020). Gainera, adierazle horiek klima-aldaketaren agertokietan gure eskualdean espero diren aldaketeekin bat datozen joerak dituzte, eta horrek klima-aldaketa globalak eremuko neurri fisikoetan dituen efektuen gaineko ondorioa indartzen du; gainera aukera ematen dute euskal kostalderako klima-aldaketaren adierazle fidagarri gisa identifikatzeko.

Kostaldeak eta ozeanoa behatzea funtsezkoa da hobeto ulertzeko nola eragiten dioten sistema honi eta sistema honek duen bizitzari, baita gizarteari ere, klima-aldaketaren mehatxuek. Ozeanorako eta kostalderako behatu eta proiektatutako aldaketek, hala nola berotzeak, it, desoxigenazioaren areagotzeak, azidotzeak edo estratifikazioan aldaketak egiteak, ondorio garrantzitsuak dituzte biodibertsitatean eta itsas bizitzan, espezieen banaketan edo haien fenologian edo tamainan aldaketak eginez, arrantza-intereseko espezieen aldaketak barne. Itsasoko eta kostaldeko ekosistemetan ematen dituzten zerbitzu ekosistemako ugariak ere eragiten die, hala nola klimaren erregulazioari edo karbono-bahiketari. Gainera, itsas mailaren igoerak eta ekaitzak areagotzeak itsasertzeko populazioengan ere badu eragina. Ikusiko dugunez, itsasertzeko azpiegiturek eta eraikinek muturreko fenomenoak eta uholdeen eraginpean egoteko arriskua handitu egingo da, baita hondartzetako aireko azalera murriztu edo desagertzeko arriskua ere. Hala, ekaitzen aurrean kostako komunitateen babesa galduko da. Hau da, klima-aldaketa antropogenikoak ozeanoetako eta kostaldeko ekosistemetan duen eraginak eragin handia du itsas bizitzan, ekonomian, industrian, turismoan eta kostaldeko komunitateetan. Horregatik, klima-aldaketaren adierazle hauek epe luzean monitorizatzen jarraitu behar da, sistema horren

relación entre estos procesos indica que la profundización de la capa de mezcla invernal determina, en parte, el aumento de la concentración de nutrientes en superficie en invierno, que a su vez permite el incremento de la concentración de clorofila, que es una estima del crecimiento del fitoplancton en el bloom primaveral. Es necesario continuar con este análisis de atribución al cambio climático, dado que los procesos que determinan la tendencia en la profundización de la capa de mezcla invernal no están directamente asociados al calentamiento del océano.

Las tasas de cambio de los indicadores más directamente relacionados con el cambio climático (aumento de la temperatura del mar, profundización de la isoterma de 14 °C, incremento de la temperatura del aire, aumento de la insolación y ascenso del nivel medio del mar) se mantienen muy parecidas con la inclusión de los datos de este último año (2020). Además, estos indicadores presentan tendencias consistentes con los cambios esperados en nuestra región en escenarios de cambio climático, lo cual refuerza la conclusión sobre los efectos del cambio climático global en las medidas físicas de la zona, y permiten identificarlas como indicadores fiables del cambio climático para la costa vasca.

La observación de las costas y el océano son esenciales para comprender mejor cómo este sistema y la vida que alberga, así como la sociedad se ven afectadas ante las amenazas del cambio climático. Los cambios observados y proyectados para el océano y las costas como el calentamiento, intensificación de la desoxigenación, acidificación o cambios en la estratificación tienen importantes consecuencias sobre la biodiversidad y vida marina, en forma de cambios en la producción, cambios en la distribución de especies, en su fenología o en su talla, incluyendo cambios en las especies de interés pesquero. Esto también afecta a los numerosos servicios ecosistémicos proporcionados por los ecosistemas marinos y costeros, como regulación del clima o secuestro de carbono. Además, la subida del nivel del mar y la intensificación de los temporales también tiene implicaciones para las poblaciones costeras que veremos incrementado el riesgo de exposición de las infraestructuras y edificaciones costeras a fenómenos extremos e inundación y también el riesgo de reducción o desaparición de la superficie aérea de las playas, perdiendo así la protección de las comunidades costeras ante tormentas. Esto es, los efectos del cambio climático antropogénico en los ecosistemas oceánicos y costeros, tienen



bilakaera ezagutu, etorkizuneko arriskuei aurrea hartu eta beharrezko egokitze-neurriak proposatu ahal izateko.

gran efecto en la vida marina, la economía, la industria, el turismo y las comunidades costeras. Por ello, es necesario continuar con la monitorización a largo plazo de estos indicadores de cambio climático, que ón de este sistema, poder anticiparnos a los riesgos futuros y proponer las medidas de adaptación necesarias.

## Adierazleetan behatutako joerak

## Tendencias observadas en los indicadores

Adierazlea Indicador	Deskribapena Descripción	Estazioa/Eremua Estación/Zona	Unitatea Unidad	Aldia Periodo	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	p-balioa p-valor	
<b>Itsasoko temperatura</b> Temperatura del mar	SST Aquarium	Aquarium	°C	1946-1979	-0,1987 ± 0,0569	<b>0,0005</b>	
	SST AQUA satelitea / satelite	Bizkaiko golkoa Golfo Vizcaya	°C	1980-2020	0,495 ± 0,0339	<b>0,0000</b>	
	SST OSTIA satelitea / satelite		°C	2003-2020	0,1187 ± 0,0379	<b>0,0017</b>	
	T sak. / T por prof. 0-100 m	D2	°C	1981-2020	0,2050 ± 0,0381	<b>0,0000</b>	
<b>Gazitasuna</b> Salinidad	G sakon. arab. / S por prof. 0-100 m	D2		1986-2019	-0,0493 ± 0,0075	<b>0,0000</b>	
		D3		1993-2020	-0,0501 ± 0,0108	<b>0,0000</b>	
<b>Nahasketa-geruza eta estratifikazioa</b> Capa de mezcla y estratificación	Sakon., 14 °C-ko isoterma Prof. Isoterma 14°C	D2	m	1993-2020	-4,7134 ± 1,9337	<b>0,0154</b>	
	Estrat. termikoa Estrat. térmica		°C/m		-0,0038 ± 0,0277	0,8910	
	Estrat. termohalinoa Estrat. termohalina		Kg m <sup>-3</sup> /m	0,0142 ± 0,0147	0,3322		
	Sakon., neguko nahaste-geruza Prof. Capa de mezcla invernal		m	1986-2020	-18,6555 ± 9,5040	0,0581	
<b>Oxigeno disolbatua</b> Oxígeno disuelto	Azaleko OD / DO superficie	Kalitate-sarea Red de calidad	mg/l	1995-2020	0,1195 ± 0,0196	<b>0,0000</b>	
	OD / DO 25 m			1995-2020	0,0872 ± 0,0201	<b>0,0000</b>	
	OD / DO 100 m			2002-2020	-0,2461 ± 0,0557	<b>0,0000</b>	
<b>Mantenugaiak</b> Nutrientes	NH <sub>4</sub>	Kalitate-sarea Red de calidad	µmol/l	1995-2020	0,1726 ± 0,0788	<b>0,0288</b>	
	PO <sub>4</sub>				0,0079 ± 0,0152	0,6029	
	NO <sub>2</sub>				-0,0091 ± 0,0055	0,0967	
	NO <sub>3</sub>				0,1671 ± 0,0971	0,0854	
	SiO <sub>4</sub>				0,3484 ± 0,1016	<b>0,0006</b>	
<b>Itsas maila</b> Nivel del mar	IBBM / NMM	Vigo	Vigo2	cm	1992-2020	1,7598 ± 0,6687	<b>0,0141</b>
		Gijon 2	Gijon 2		1995-2020	0,7120 ± 0,5523	0,2096
		Santander 2	Santander2		1992-2020	2,0438 ± 0,3391	<b>0,0000</b>
		Brest	Brest		1846-2020	1,2512 ± 0,0537	<b>0,0000</b>
		Brest	Brest		1992-2020	2,4222 ± 0,4366	<b>0,0000</b>
		Coruña	Coruña 2		1992-2020	3,4013 ± 0,8038	<b>0,0003</b>
		Coruña	Coruña		1943-2020	2,0193 ± 0,1901	<b>0,0000</b>
		Bilbao3	Bilbao3		1992-2020	3,0681 ± 0,3182	<b>0,0000</b>
		Pasaia	Pasaia		2007-2020	4,2000	
		satelitea / satelite	Bizkaiko golkoa Golfo Vizcaya		1993-2019	2,6212 ± 0,4172	<b>0,0000</b>

Adierazlea Indicador	Deskribapena Descripción	Estazioa/Eremua Estación/Zona	Unitatea Unidad	Aldia Periodo	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	p-balioa p-valor
Olatuak Oleaje	Hs	Boya Bilbao-Bizkaia buia	cm	1991-2020	3,1030 ± 3,0311	0,3060
		Boya Donostia buia		2007-2020	3,5125 ± 8,9592	0,6950
	Pw	Bilbao-Bizkaia	kW/m	1991-2020	0,9421 ± 1,0737	0,3803
		Donostia		2007-2020	1,4822 ± 3,2140	0,6447
	Hs90	Bilbao-Bizkaia	cm	1991-2020	18,3166 ± 7,5728	<b>0,0161</b>
		Donostia		2007-2020	16,5665 ± 26,455	0,4724
	Hs100	Bilbao-Bizkaia	cm	2001-2020	58,7205 ± 50,8570	0,2633
		Donostia		2017-2020	195,4500 ± 47,8962	0,0551
	SIMAR Hs Bilbao-Bizkaia			1958-2020	4,3883 ± 0,9073	<b>0,0000</b>
				1991-2020	9,5802 ± 2,6383	<b>0,0003</b>
	SIMAR Pw Bilbao-Bizkaia			1958-2020	1,3663 ± 0,2881	<b>0,0000</b>
				1991-2020	3,7835 ± 0,8550	<b>0,0000</b>
	SIMAR Hs90 Bilbao-Bizkaia			1958-2020	4,9926 ± 1,9241	<b>0,0097</b>
				1991-2020	15,0239 ± 6,2006	<b>0,0159</b>
SIMAR Hs100 Bilbao-Bizkaia			1968-2020	33,9918 ± 8,2671	<b>0,0001</b>	
			2001-2020	122,736 ± 30,9307	<b>0,0009</b>	
Kosta-lerroa Línea de costa	Itsasbehera / Bajamar	Zarautz	m	2010-2020	1,3980	
	Itsasgora / Pleamar				-6,6440	
Hondartzen higadura Erosión playas	Mareaz gaindiko eremua Área supramareal	Zarautz	m <sup>2</sup>	2010-2020	-7367,0 ± 6495,0	0,2590
	Marearteko eremua Área intermareal				16666,0 ± 10178,0	0,1042
Fitoplanktona Fitoplancton	Erkidegoa Comunidad (CTI)	Kalitate-sarea Red de calidad	°C	2008-2020	-0,1048	0,2450
	Azaleko Chla Chla superficie	D2	µg/l	1993-2020	0,0469 ± 0,0675	0,4873
	Chla 0-50 m	D2	µg/l	1993-2020	-0,0038 ± 0,0388	0,9213
	Chla sak. Chla por prof.	D2	µg/l	1993-2020	0,0252 ± 0,0097	<b>0,0095</b>
	Geh. sak. Chla Prof. max. Chla	D2	m	1993-2020	0,9111 ± 1,5247	0,5507
	Chla (0m+25m)	Kalitate-sarea Red de calidad	µg/l	1995-2020	-0,0215 ± 0,0322	0,5041
	Gainaz. Chla satelitea Chla sup. Satellite	Bizkaiko golkoa Golfo Vizcaya	mg/m <sup>3</sup>	2003-2020	0,0703 ± 0,0117	<b>0,0000</b>
	Gainaz. Chla Sat Chla sup. Sat	Donostiaren parean Frente Donostia	mg/m <sup>3</sup>	2003-2020	0,1345 ± 0,0609	<b>0,0273</b>

Adierazlea Indicador	Deskribapena Descripción	Estazioa/Eremua Estación/Zona	Unitatea Unidad	Aldia Periodo	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	p-balioa p-value
<b>Harri-substratuko bentosa</b> Bentos sustrato rocoso	Harri-substratuko kom. CTI CTI com. Sustrato rocoso	Kalitate-sarea Red de calidad	°C	2002-2020	0,0089	0,1771
<b>Substratu biguneko bentosa</b> Bentos sustrato blando	CTI, substratu biguneko kom. CTI com. Sustrato blando	Kalitate-sarea Red de calidad	°C	1995-2020	0,0100	0,1512
<b>Arrainak</b> Peces	2 adineko antxoa-pisua Peso anchoa edad 2	BIOMAN	g	1987-2020	-0,3600	<b>&lt;0,0001</b>

## Glosarioa

**Aldaketa global:** aldaketa globalaren kontzeptuak erreferentzia egiten dio gure planetari eragiten dioten jarduera antropogenikoen ondoriozko eskala handiko aldaketa eta eraldaketen multzoari.

**Atlantiko Meridionalaren Iraultze Zirkulazio (AMOC):** Hegoaldeko eta Ipar Atlantikoko ozeanoetako itsaslaster-sistema nagusia. AMOCek ozeanoko ur beroa iparralderantz garraiatzen du, eta ur hotz sakona hegoalderantz, ozeanoko zirkulazio-sistema globalaren parte gisa. AMOCren intentsitate-aldaketek eragina izan dezakete klima-sistemaren beste osagai batzuetan.

**Atribuzio:** hainbat faktorek aldaketa edo gertaera bati egindako ekarpen erlatiboak ebaluatzeko prozesua, konfiantzaren ebaluazio formalarekin.

**Bentos:** ozeanoen hondoen edo sedimentuetan bizi diren organismoen komunitatea. Hondoko eremu ekologikoa, sedimentuaren gainazala eta azpigainazaleko geruza batzuk barne, 'eremu bentiko' gisa ezagutzen da.

**Berotegi-efektuko gasak:** atmosferaren osagai gaseosoak, naturalak nahiz antropogenikoak, erradiazioa uhin-luzera espezifikoean xurgatzen eta igortzen dutenak, ozeanoak eta lurrazalak, atmosferak berak eta hodeiek igorritako erradiazio-espektoaren barruan. Propietate honek eragiten du berotegi-efektua. Ur-lurrina (H<sub>2</sub>O), karbono dioxidoa (CO<sub>2</sub>), oxido nitrosoa (N<sub>2</sub>O), metanoa (CH<sub>4</sub>) eta ozonoa (O<sub>3</sub>) dira lurreko atmosferako berotegi-efektuko gas nagusiak.

**Berotze global:** munduko gainazalaren batez besteko tenperaturaren igoeraren batezbestekoa, 30 urteko aldi bati dagokiona, edo urte edo hamarkada jakin batean zentratutako 30 urteko aldiari, industriaurreko mailekin alderatuta adierazita, aurkakoa zehazten ez bada.

**Biodibertsitate edo dibertsitate biologiko:** organismo bizien eta horiek kide diren konplexu ekologikoen arteko aldakortasuna, espezieen barneko, espezie arteko eta ekosistemen arteko dibertsitatea barne hartzen dituena.

## Glosario

**Acidificación del océano:** reducción del pH del océano, acompañada de otros cambios químicos (principalmente en los niveles de iones de carbonato y bicarbonato), durante un periodo prolongado, normalmente décadas o más, que es causada principalmente por la captación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera, pero también puede ser causada por otras adiciones químicas o sustracciones del océano. La acidificación antropogénica se refiere a la componente de reducción del pH causada por la actividad humana.

**Anchura media de la playa:** se define como la distancia neta en dirección sensiblemente perpendicular a la costa, entre cada punto de la línea de costa y la línea base.

**Atribución:** proceso de evaluación de las contribuciones relativas de múltiples factores a un cambio o evento con una evaluación formal de la confianza.

**Bentos:** comunidad de organismos que viven en el fondo o en los sedimentos de los océanos. La zona ecológica en el fondo, incluida la superficie del sedimento y algunas capas subsuperficiales, se conoce como 'zona bentónica'.

**Biodiversidad: o diversidad biológica:** variabilidad entre organismos vivos y complejos ecológicos de los que forman parte, incluida la diversidad dentro de las especies, entre especies y ecosistemas.

**Biomasa:** masa de materia orgánica en una zona específica.

**Calentamiento global:** aumento de la temperatura media de la superficie mundial promediado durante un periodo de 30 años, o el periodo de 30 años centrado en un año o una década determinados, expresado en relación con los niveles preindustriales, a menos que se especifique lo contrario.

**Biomasa:** materia organikoaren masa eremu espezifikoko batean.

**Ekoizpen primario:** landareek eta mikroorganismoek konposatu organikoak sintetizatzea, lurrean eta ozeanoan, nagusiki fotosintesi bidez, argia eta karbono dioxidoa energia- eta karbono-iturri gisa erabiliz, hurrenez hurren.

**Ekosistema-zerbitzuak:** gizabanakoentzat edo, oro har, gizartearentzat balioa –diruzkoa edo ez-diruzkoa– duten prozesu edo funtzio ekologikoak. Sarritan honela sailkatzen dira: (1) euskarri-zerbitzuak, hala nola produktibitatea edo biodibertsitatea mantentzea, (2) hornidura-zerbitzuak, esate baterako elikagaiak edo zuntzak, (3) erregulazio-zerbitzuak, hala nola klimaren erregulazioa edo karbonoa bahitzea eta (4) kultura-zerbitzuak –turismoa edo balorazio estetikoak, besteak beste–.

**Eskualde:** lurreko edo ozeanoko azalera erlatiboki handia, propietate geografiko eta klimatologiko espezifikoek bereizten dutena. Lehorreko eskualde bateko kliman eragina dute eskualdeko eta tokiko ezaugarriek, hala nola topografiak, lurraren erabilerearen ezaugarriak eta ur-gorputz handiek, klima-baldintza globalez gain.

**Estratifikazio:** ura nahasteko hesi gisa jarduten duten hainbat propietate –hala nola gazitasuna, dentsitatea eta tenperatura– dituzten (ozeanoko) ur-geruzak sortzeko prozesua. Kuasigainazaleko estratifikazioa indartzeak azaleko urak beroagoak izatea dakar gehienetan, baita ur sakonagoko oxigeno-mailak murriztea eta ozeanoaren goiko parteko azidotzea areagotzea ere.

**Hondartzaren batez besteko zabalera:** kosta-lerroaren puntu bakoitzaren eta oinarri-lerroaren artean kostaldearekiko nahiko perpendikularean dagoen distantzia garbi gisa definitzen da.

**Isoterma:** tenperatura bera duten puntuak konektatzen dituzten lerroa, itsasoko gainazalean nahiz geruza sakonetan.

**Itsas mailaren aldaketa (itsas mailaren igotzea/jaitsiera):** itsas mailaren altueran izandako aldaketak, mundu-mailan nahiz tokiko mailan izandakoak urtaro-eskaletan, urtekoetan edo denbora luzeagokoetan, honako faktore hauen ondorioz: (1) ozeanoaren bolumenaren aldaketa, ozeanoko ur-masa aldatzearen ondorioz

**Cambio climático:** Un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (ej. utilizando pruebas estadísticas) mediante cambios en la media o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, décadas o más.

**Cambio del nivel del mar (aumento/descenso del nivel del mar):** cambios en la altura del nivel del mar, tanto a nivel mundial como local en escalas estacionales, anuales o de tiempo más largo debido a (1) un cambio en el volumen del océano como resultado de un cambio en la masa del agua en el océano (ej. debido a la fusión de glaciares y capas de hielo), (2) cambios en el volumen del océano como resultado de cambios en la densidad del agua del océano (expansión en condiciones más cálidas), (3) cambios en la forma de las cuencas oceánicas y cambios en los campos gravitacionales y rotacionales de la Tierra, y (4) subsidencias o elevaciones de la tierra.

**Cambio global:** El concepto de cambio global hace referencia al conjunto de cambios y transformaciones a gran escala producto de las actividades antropogénicas y que afectan a nuestro planeta.

**Cambio local del nivel del mar:** cambio del nivel del mar en relación con un dato (como el nivel medio actual del mar) a escalas espaciales menores de 10 km.

**Capa de mezcla:** capa superficial muy mezclada por la acción del viento, en la que las propiedades hidrográficas (temperatura y salinidad) suelen ser uniforme.

**Ciclo hidrológico:** ciclo en el que el agua se evapora desde el océano y la superficie terrestre, se transporta sobre la Tierra en la circulación atmosférica como vapor de agua, se condensa para formar nubes, precipita sobre el océano y la tierra como lluvia o nieve, que en la tierra puede ser interceptada por los árboles y la vegetación, potencialmente acumulada como nieve o hielo, proporciona escorrentía en la superficie terrestre, recarga aguas subterráneas, descargas en arroyos polares y, evaporar de nuevo.

**Circulación meridional de vuelco del atlántico (AMOC):** Principal sistema de corrientes en los océanos Atlántico Sur y Norte. AMOC transporta en superficie agua caliente del océano hacia el norte y agua fría en profundidad hacia el sur.

(adibidez, glaziarren eta izotz-geruzak urtzearen ondorioz), (2) ozeanoaren bolumenaren aldaketak, ozeanoko uraren dentsitatean izandako aldaketen ondorioz (espantsioa baldintza beroagoetan), (3) aldaketak ozeanoko arroetan, eta aldaketak Lurraren grabitazio- eta errota-zio-eremuetan, eta (4) lurraren subsidentziak edo goratzeak.

**Itsas mailaren tokiko aldaketa:** itsas mailaren aldaketa datu bati dagokionez (adibidez, itsasoaren egungo batez besteko mailari) 10 km-tik beherako espazio-eskaletan.

**Jarraipen eta ebaluazio:** berotegi-efektuko gasen isuriak murrizteko eta/edo klima-aldaketaren inpaktuetara egokitzeko ahaleginak gainbegiratzeko eta ebaluatzeko ezarritako mekanismoak, aurrerapenak denboran zehar sistematikoki identifikatzeko, karakterizatzeko eta ebaluatzeko helburuarekin.

**Klima-aldaketa:** klimaren egoeraren aldaketa, batezbestekoaren aldaketen edo bere propietateen aldakortasunaren bidez identifika daitekeena (adibidez, proba estatistikoak erabiliz), eta epe luze batean irauten duena, hamarkadetan edo luzaroago. Kostalde: itsasotik gertuko lurra. 'kostaldeko' terminoak erreferentzia egin diezaioke lehorreko zatiari edo lehorreko prozesuen eragin handia duen itsas ingurunearen zatiari. Horrela, kostaldea ez da oso sakona izaten, eta lurretik gertu egoten da.

**Klima-aldakortasun:** aldagaien desbideratzeak batez besteko egoera jakin batekin alderatuta (muturreko kasuak eta abar barne), banakako gertakari meteorologikoetatik haragoko espazio- eta denbora-eskala guztietan. Aldakortasuna intrintsekoa izan daiteke, klima-sistemako barne-prozesuen gorabeherak direla-eta (barne-aldakortasuna), edo estrintsekoa, kanpoko behartze natural edo antropogenikoaren aldaketen ondoriozkoa (aldakortasun behartua).

**Klima-mutur edo muturreko klima-gertakari:** aldagai ozeanografiko edo meteorologiko baten balioa aldagaiaren balio-tarte behatuaren goiko (edo beheko) muturretatik gertu dagoen atalase-balio baten goitik (edo behetik). Sinpletasunagatik, muturreko gertakari meteorologikoei zein muturreko klima-gertakari 'klima-mutur' esaten zaie.

como parte del sistema de circulación oceánica global. Los cambios en la intensidad de la AMOC pueden afectar a otros componentes del sistema climático.

**Costa:** tierra cerca del mar. El término 'costero' puede referirse a la parte terrestre o la parte del medio marino que está fuertemente influenciada por procesos terrestres. Así, la zona costera es generalmente poco profunda y cercana a tierra.

**Desoxigenación del océano:** pérdida de oxígeno en el océano. Resulta del calentamiento del océano, que reduce la solubilidad de oxígeno y aumenta su consumo y la estratificación, reduciendo así la mezcla de oxígeno en el interior del océano. La desoxigenación también puede agravarse por la adición de nutrientes excesivos en la zona costera.

**Estratificación:** proceso de formación de capas de agua (oceánica) con diferentes propiedades, como salinidad, densidad y temperatura, que actúan como barrera para la mezcla de agua. El fortalecimiento de la estratificación cuasi-superficial generalmente da lugar a aguas superficiales más cálidas, disminución de los niveles de oxígeno en el agua más profunda e intensificación de la acidificación del océano superior.

**Extremo climático o evento climático extremo:** el valor de una variable oceanográfica o meteorológica superior (o por debajo) de un valor umbral cerca de los extremos superiores (o inferiores) del rango de valores observados de la variable. Por simplicidad, tanto a eventos meteorológicos extremos como eventos climáticos extremos se les denomina 'extremos climáticos'.

**Gases de efecto invernadero:** componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación emitida por el océano y la superficie terrestre de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) son los principales gases de efecto invernadero de la atmósfera terrestre.

**Índice termal de comunidad (CTI):** media ponderada de las preferencias de temperatura de las



**Komunitatearen indize termal (CTI):** komunitate bateko espezieen temperatura-lehentasunen batezbesteko haztatua; bestela esanda, komunitate bateko espezieek nahiago duten tenperaturaren batezbestekoa.

**Marearteko eremu:** batez besteko itsasgora-eta itsasbehera-koten artean dagoen hondartza eremua.

**Mareaz gaindiko eremu:** batez besteko itsasgora-kotaren gainetik dagoen hondartza-eremua, lortutako kosta-lerroak eta oinarri-lerro esaten zaion erreferentziatzko lerroak mugatua.

**Nahaste-geruza:** haizearen eraginez asko nahasitako azaleko geruza; propietate hidrografikoak (tenperatura eta gazitasuna) uniformeak izaten dituenak.

**Oinarri-lerro:** hondartzaren goialdean dauden ingerada zurrunen bidez eta 'iraunkortzat' jotzen diren elementuen posizioaren bidez definitutako erreferentzia-lerroa, hala nola duna-oina, pasabideak edo perimetroko urbanizazioko beste elementu batzuk.

**Ozeanoaren azidotze:** ozeanoaren pH-a murriztea, beste aldaketa kimiko batzuekin batera gertatzen dena (batez ere karbonato- eta bikarbonato-ioien mailenak), epe luze batean –normalean hamarkada batzuetan edo luzaroago–, atmosferako karbono dioxidoa (CO<sub>2</sub>) hartzeak eragindakoa nagusiki, baina substantzia kimiko batzuk ozeanora gehitzearen edo bertatik kentzearen ondorioz ere gerta daitekeena. Ozeanoaren azidotze antropogenikoak giza jarduerak eragindako pH-aren murrizketaren osagaiari egiten dio erreferentzia.

**Ozeanoaren desoxigenazio:** oxigeno-galera ozeanoan. Ozeanoaren berotzearen ondorioa da, eta haren eraginez oxigenoaren disolbagarritasuna murrizten eta kontsumoa eta estratifikazioa handitzen dira, ozeano barruko oxigeno-nahasketa murriztuz. Desoxigenazioa ere larriagotu daiteke kostaldean mantenugaiak neurritz kanpo gehitzeagatik.

**Pelagiko:** eremu pelagikoa ozeano irekiko ur-zutabe osoa da. Pelagiko terminoak eremu pelagikoan bizi diren organismoek ere egin diezaieke erreferentzia.

especies en una comunidad; en otras palabras, la preferencia media de temperatura de las especies en una comunidad.

**Isoterma:** línea que conectan puntos con igual temperatura, ya sea en la superficie del mar como en capas profundas.

**Línea base:** línea de referencia definida por medio de los contornos rígidos existentes en la parte alta de la playa, así como por la posición de los elementos considerados 'permanentes' como puede ser el pie de duna, pasarelas u otros elementos de urbanización perimetral.

**Pelágico:** la zona pelágica consiste en toda la columna de agua del océano abierto. El término pelágico también puede referirse a organismos que viven en la zona pelágica.

**Producción primaria:** síntesis de compuestos orgánicos por plantas y microorganismos, en tierra y océano, principalmente mediante fotosíntesis utilizando luz y dióxido de carbono como fuentes de energía y carbono, respectivamente.

**Región:** superficie terrestre u oceánica relativamente grande caracterizada por propiedades geográficas y climatológicas específicas. El clima de una región terrestre se ve afectada por características regionales y locales como la topografía, las características de uso de la tierra y los grandes cuerpos de agua, además de las condiciones climáticas globales.

**Seguimiento y evaluación:** mecanismos establecidos para supervisar y evaluar los esfuerzos por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y/o adaptarse a los impactos del cambio climático con el objetivo de identificar, caracterizar y evaluar sistemáticamente los progresos a lo largo del tiempo.

**Servicios ecosistémicos:** procesos o funciones ecológicas que tienen valor monetario o no monetario para los individuos o la sociedad en general. A menudo se clasifican como (1) servicios de soporte, tales como la productividad o el mantenimiento de la biodiversidad, (2) servicios de aprovisionamiento, tales como alimentos o fibras, (3) servicios de regulación tales como regulación del clima o el secuestro de carbono y (4) servicios culturales como el turismo o la apreciación estética.

**Telekonexio:** geografikoki bereizitako kokapen finkoetako klima-aldagaien arteko elkarketa estatistikoa.

**Ziklo hidrológico:** urak ozeanotik eta lur-azaleratik lurruntzen denetik jarraitzen duen zikloa, barne hartzen dituena Lurraren gainean ur-lurrun gisa zirkulazio atmosferikoaren bitartez garraiatzea, kondentsatu ondoren hodeiak sortzea, ozeanoan eta lurrian euri edo elur gisa prezipitazioa, zuhaitzek eta landarediak xurgatzea, elur edo izotz gisa pilatzea, lur gaineko jariatzea, lurpeko urak kargatzea, erreka polarretan deskargatzea eta berriro lurruntzea.

**Superficie supramareal:** área de la playa que se encuentra por encima de la cota de pleamar media, y está limitado por el contorno definido por la línea de costa obtenida y la línea de referencia llamada línea base.

**Superficie intermareal:** área de la playa que se encuentra entre las cotas de pleamar y bajamar medias.

**Teleconexión:** asociación estadística entre variables climáticas en ubicaciones fijas geográficamente separadas.

**Variabilidad climática:** desviaciones de variables respecto a un estado medio determinado (incluidos los casos extremos, etc.) en todas las escalas espaciales y temporales más allá de eventos meteorológicos individuales. La variabilidad puede ser intrínseca, debido a fluctuaciones de los procesos internos al sistema climático (variabilidad interna), o extrínseca, debido a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad forzada).

## Erreferentziak / Referencias

Chust, G., M. González, A. Fontán, M. Revilla, P. Alvarez, M. Santos, M. Chifflet, A. Borja, I. Muxika, Y. Sagarminaga, A. Caballero, I. De Santiago, I. Epelde, P. Liria, A. Lanzén, L. Alonso, L. Ibaibarriaga, R. Garnier, J. Franco, E. Villarino, M. Valle, U. Cotano (2021). Servicios de Asistencia técnica para el seguimiento y análisis de indicadores fisicoquímicos y biológicos del cambio climático en el litoral de Gipuzkoa en relación a la evolución de dichos indicadores, así como posibles escenarios, impactos y adaptación futuros. Informe Final elaborado por AZTI para Naturklima. 147 pp.

Abram, N., Gattuso, J.-P., Prakash, A., Cheng, L., Chidichimo, M.P., Crate, S., Enomoto, H., Garschagen, M., Gruber, N., Harper, S., Holland, E., Kudela, R.M., Rice, J., Steffen, K., and von Schuckmann, K. (2019). Framing and Context of the Report. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 73-129.

Alcock, R. (2003). The effects of climate change on rocky shore communities in the Bay of Biscay, 1895-2050. PhD. Thesis, University of Southampton, 296.

Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Boss, E.S., Westberry, T.K., Graff, J.R., Halsey, K.H., Milligan, A.J., Siegel, D.A., and Brown, M.B. (2016). Reevaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nature Climate Change*, 6, 323-330.

Bindoff, N.L., Cheung, W.W.L., Kairo, J.G., Arístegui, J., Guinder, V.A., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M.S., Levin, L., O'Donoghue, S., Cuicapusa, S.R.P., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., and Williamson, P. (2019). Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte,

P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 447-587.

Bird, E.C.F. (1985). *Coastline Changes*. New York: Wiley & Sons.

Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J.C., Doney, S.C., Dunne, J.P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Séférian, R., Tjiputra, J., and Vichi, M. (2013). Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, 10, 6225-6245.

Borja, A., Chust, G., Fontán, A., Garmendia, J.M., and Uyarra, M.C. (2018). Long-term decline of the canopy-forming algae *Gelidium corneum*, associated to extreme wave events and reduced sunlight hours, in the southeastern Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 205, 152-160.

Borja, Á., Chust, G., Rodríguez, J.G., Bald, J., Belzunce-Segarra, M.J., Franco, J., Garmendia, J.M., Larreta, J., Menchaca, I., Muxika, I., Solaun, O., Revilla, M., Uriarte, A., Valencia, V., and Zorita, I. (2016). 'The past is the future of the present': Learning from long-time series of marine monitoring. *Science of The Total Environment*, 566-567, 698-711.

Borja, Á., Fontán, A., and Muxika, I. (2013). Interactions between climatic variables and human pressures upon a macroalgae population: Implications for management. *Ocean & Coastal Management*, 76, 85-95.

Boyd, P., Lennartz, S., Glover, D., and Doney, S.C. (2015). Biological ramifications of climate-change-mediated oceanic multi-stressors. *Nature Climate Change* 5, 71-79.

Breitbart, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G.S., Limburg, K.E., Montes, I., Naqvi, S.W.A., Pitcher, G.C., Rabalais, N.N., Roman, M.R., Rose, K.A., Seibel, B.A., Telszewski, M., Yasuhara, M., and Zhang, J. (2018). Declining oxygen

in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371).

Carls, M.G., Rice, S.D., and Hose, J.E. (1999). Sensitivity of fish embryos to weathered crude oil: Part I. Low-level exposure during incubation causes malformations, genetic damage, and mortality in larval pacific herring (*Clupea pallasii*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18, 481–493.

Casado-Amezúa, P., Araújo, R., Bárbara, I., Bermejo, R., Borja, Á., Díez, I., Fernández, C., Gorostiaga, J.M., Guinda, X., Hernández, I., Juanes, J.A., Peña, V., Peiteiro, C., Puente, A., Quintana, I., Tuya, F., Viejo, R.M., Altamirano, M., Gallardo, T., and Martínez, B. (2019). Distributional shifts of canopy-forming seaweeds from the Atlantic coast of Southern Europe. *Biodiversity and Conservation*, 28, 1151–1172.

Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., and Scott, T. (2017). A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe: The West Europe Pressure Anomaly. *Geophysical Research Letters*, 44, 1384–1392.

Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., and Scott, T. (2018). Increased winter mean wave height, variability, and periodicity in the Northeast Atlantic over 1949–2017. *Geophysical Research Letters*, 45, 3586–3596.

Cavaleri, L., Fox-Kemper, B., and Hemer, M. (2012). Wind Waves in the Coupled Climate System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(11), 1651–1661.

Cazenave, A., Meyssignac, B., Ablain, M., Balmaseda, M., Bamber, J., Barletta, V., Beckley, B., Benveniste, J., Berthier, E., Blazquez, A., Boyer, T., Caceres, D., Chambers, D., Champollion, N., Chao, B., Chen, J., Cheng, L., Church, J.A., Chuter, S., Cogley, J.G., Dangendorf, S., Desbruyeres, D., Doell, P., Domingues, C., Falk, U., Famiglietti, J., Fenoglio-Marc, L., Forsberg, R., Galassi, G., Gardner, A., Groh, A., Hamlington, B., Hogg, A., Horwath, M., Humphrey, V., Husson, L., Ishii, M., Jaeggi, A., Jevrejeva, S., Johnson, G., Kolodziejczyk, N., Kusche, J., Lambeck, K., Landerer, F., Leclercq, P., Legresy, B., Leuliette, E., Llovel, W., Longuevergne, L., Loomis, B. D., Luthcke, S. B., Marcos, M., Marzeion, B., Merchant, C., Merrifield, M., Milne, G., Mitchum, G., Mohajerani, Y., Monier, M., Monselesan, D., Nerem, S., Palanisamy, H., Paul, F., Perez, B., Piecuch, C. G., Ponte, R. M., Purkey, S. G., Reager, J. T., Rietbroek, R., Rignot, E., Riva, R., Roemmich, D.

H., Sorensen, L. S., Sasgen I., Schrama, E. J. O., Senviratne, S. I., Shum, C. K., Spada, G., Stammer, D., Van De Wal, R., Velicogna, I., von Schuckmann, K., Wada, Y., Wang, Y., Watson, C., Wiese, D., Wijffels, S., Westaway, R., Woppelmann, G., and Wouters, B. (2018). Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data*, 10(3), 1551–1590.

Cheng, L. J., Abraham, J., Hausfather, Z., and Trenberth, K. E. (2019). How fast are the oceans warming? *Science*, 363, 128–129

Cheng, L., Trenberth, K. E., Gruber, N., Abraham, J. P., Fasullo, J. T., Li, G., Mann, M. E., Zhao, X., and Zhu, J. (2020). Improved Estimates of Changes in Upper Ocean Salinity and the Hydrological Cycle. *Journal of Climate*, 33(23), 10357–10381.

Cheung, W.W.L., Watson, R., and Pauly, D. (2013). Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497, 365–368.

Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., and Borja, Á. (2010). Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87, 113–124.

Chust, G., Allen, J.I., Bopp, L., Schrum, C., Holt, J., Tsiaras, K., Zavatarelli, M., Chifflet, M., Cannaby, H., Dadou, I., Daewel, U., Wakelin, S.L., Machu, E., Pushpadas, D., Butenschon, M., Artioli, Y., Petihakis, G., Smith, C., Garçon, V., Goubanova, K., Le Vu, B., Fach, B.A., Salihoglu, B., Clementi, E., and Irigoien, X. (2014). Biomass changes and trophic amplification of plankton in a warmer ocean. *Global Change Biology*, 20, 2124–2139.

CIEM. (2018). Massé, J., Uriarte, A., Angélico, M. M., and Carrera, P. (Eds.). (2018). Pelagic survey series for sardine and anchovy in ICES subareas 8 and 9 – Towards an ecosystem approach. ICES Cooperative Research Report No. 332. 268 pp.

Costoya, X., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., and Santos, F. (2015). Changes in sea surface temperature seasonality in the Bay of Biscay over the last decades (1982–2014). *Journal of Marine Systems*, 150, 91–101.

Dangendorf, S., Marcos, M., Müller, A., Zorita, E., Riva, R., Berk, K., and Jensen, J. (2015). Detecting anthropogenic footprints in sea level rise. *Nature Communications*, 6, 7849.

Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F., Marcos, M., Piecuch, C., Berk, K., and Jensen, J. (2019). Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, 9, 705–710.

Dave, A.C., and Lozier, M.S. (2013). Examining the global record of interannual variability in stratification and marine productivity in the low-latitude and mid-latitude ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 3114–3127.

de Santiago, I., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., and González, M. (2020). Estudio de inundabilidad por Cambio Climático en el entorno de las playas del municipio de Donostia-San Sebastián.

Devictor, V., Julliard, R., Couvet, D., and Jiguet, F. (2008). Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society B*, 275, 1652.

Díez, I., Mugerza, N., Santolaria, A., Ganzedo, U., and Gorostiaga, J.M. (2012). Seaweed assemblage changes in the eastern Cantabrian Sea and their potential relationship to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 99, 108–120.

Díez, I., Santolaria, A., Mugerza, N., and Gorostiaga, J.M. (2014). Capacity for recovery of rocky subtidal assemblages following pollution abatement in a scenario of global change. *Marine Pollution Bulletin*, 86, 197–209.

Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A., and Kleypas, J.A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192.

Doray, M., Petitgas, P., Huret, M., Duhamel, E., Romain, J.B., Authier, M., Dupuy, C., and Spitz, J. (2018). Monitoring small pelagic fish in the Bay of Biscay ecosystem, using indicators from an integrated survey. *Progress in Oceanography*, 166, 168–188.

Duarte, L., Viejo, R.M., Martínez, B., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., and Gallardo, T. (2013). Recent and historical range shifts of two canopy-forming seaweeds in North Spain and the link with trends in sea surface temperature. *Acta Oecologica*, 51, 1–10.

Durack, P.J. (2015). Ocean salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 28, 1, 20–31.

Eker-Develi, E., Kieys, A.E., Mikaelyan, A., Devlin, M.J., and Newton, A. (2022). Editorial: Phytoplankton

Dynamics Under Climate Change. *Frontiers in Marine Science*, 9.

Escribano, A., Aldanondo, N., Cotano, U., Boyra, G., and Urtizberea, A. (2019). Size- and density dependent overwinter mortality of anchovy juveniles in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 183, 28–37.

Fernández, C. (2016). Current status and multidecadal biogeographical changes in rocky intertidal algal assemblages: The northern Spanish coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 171, 35–40.

Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Durieux, J.-L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., and Zhang, H. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054.

Friedlingstein, P., O' Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S., Aragão, L.E.O.C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N.R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Evans, W., Florentie, L., Foster, P.M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R.A., Ilyana, T., Jain, A.K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metz, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P.I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A.J.P., Sutton, A.J., Tanhua, T., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A.P., Wanninkhof, R., Watson, A.J., Willis, D., Wiltshire, A.J., Yuan, W., Yue, X., and Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340.

Garmendia, M., Borja, A., and Muxika, I. (2008). Long-term environmental, climatic and anthropogenic factors affecting subtidal soft-bottom benthic communities, within the Basque coast. *Revista de Investigación Marina, AZTI-Tecnalia*, 2, 1-28.

Goikoetxea, N., Borja, A., Fontán, A., González, M., and Valencia, V. (2009). Trends and anomalies in sea-surface temperature, observed over the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research, 100 Years of Research within the Bay of Biscay - XI International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay*, 29, 1060-1069.

González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, A., A., D.C., Ferrer, L., and Revilla, M. (2008). Análisis de la tendencia de la temperatura atmosférica en Donostia-San Sebastián (SE del golfo de Vizcaya) a partir del estudio de la serie del Observatorio del Monte Igeldo (1928- 2007). *Revista de Investigación Marina*, 7, 7.

González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, A., and Ferrer, L. (2008). Análisis de la tendencia de la temperatura superficial del agua del mar en Donostia-San Sebastián a partir del estudio de la serie del Aquarium (1946-2007). *Revista de Investigación Marina*, 4, 7.

González-Gil, R., González Taboada, F., Cáceres, C., Largier, J.L., and Anadón, R. (2018). Winter-mixing preconditioning of the spring phytoplankton bloom in the Bay of Biscay. *Limnology and Oceanography*, 63, 1264-1282.

González-Pola, C., Lavín, A., Díaz del Río, G., Cabanas, J.M., Ruiz-Villarreal, M., Somavilla, R., Rodríguez, C., González-Nuevo, G., and Nogueira, E. (2012). Hidrografía y circulación. En: *Cambio climático y oceanográfico en el Atlántico del norte de España*. Instituto Español de Oceanografía. 69-98 pp.

Gould, W.J., and Cunningham, S.A. (2021). Global-scale patterns of observed sea surface salinity intensified since the 1870s. *Communications Earth & Environment*, 2, 76.

Gruber, N., Clement, D., Carter, B.R., Feely, R.A., Vab Heuven, S., Hoppema, M., Ishii, M., Key, R.M., Kozyr, A., Lauvset, S.K., Lo Monaco, C., Mathis, J.T., Murata, A., Olsen, A., Perez, F.F., Sabine, C.L., Tanhua, T., and Vanninkhof, R. (2019). The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub> from 1994 to 2007. *Science*, 363(6432), 1193-1199.

Hanslow, D. J. (2007). Beach Erosion Trend Measurement: A Comparison of Trend Indicators. *Journal of Coastal Research*, 588-593.

Hendriks, I.E., Duarte, C.M., and Álvarez, M. (2010). Vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification: A meta-analysis. *Estuarine Coastal & Shelf Sciences*, 86, 157-164.

Hinder, S.L., Hays, G.C., Edwards, M., Roberts, E.C., Walne, A.W., and Gravenor, M.B. (2012). Changes in marine dinoflagellate and diatom abundance under climate change. *Nature climate change*, 2, 271-275.

Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton, J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., Ganopolski, A., and Klein, R.J.T. (2013). A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary Change*, 111, 150-158.

Ibaibarriaga, L. (2021) Predicción operacional de anchoa en el golfo de Vizcaya mediante modelos de nicho ecológico y herramientas big data (ANICHO). Informe Final para Gobierno Vasco. 266pp

IPCC-AR5. (2013). *The Physical Science Basis*. Working Group I. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 1535pp.

IPCC. (2019). *Technical Summary* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.

Johnson, G. C., and Lumpkin, R. L. (eds.). 2022: *Global Oceans*. In: *State of the Climate in 2021*.

Bulletin of American Meteorological Society, 103 (8), S143–S191.

Jonkers, L., Hillebrand, H., and Kucera, M. (2019). Global change drives modern plankton communities away from the pre-industrial state. *Nature*, 570, 372–375.

Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R.N., and Singh, G.G. (2010). Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology Letters*, 13, 1419–1434.

Laffoley, D., and Baxter, J.M. (eds.). (2019). *Ocean deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions*. Full report. Gland, Switzerland: IUCN. 580pp.

Li, G., Cheng, L., Zhu, J., Trenberth, K.E., Mann, M.E., and Abraham, J.P. (2020). Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nature Climate Change*, 10, 1116–1123.

Liria, P., Chust, G., Epelde, I., and Caballero, A. (2011). Extreme Wave Flood-Risk Mapping Within the Basque Coast. *Journal of Coastal Research*, 225–229.

Ljungström, G., Claireaux, M., Fiksen, Ø., and Jørgensen, C. (2020). Body size adaptations under climate change: zooplankton community more important than temperature or food abundance in model of a zooplanktivorous fish. *Marine Ecology Progress Series*, 636, 1–18.

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Fedor, B., Donchysts, G., and Aarninkhorf, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8, 6641.

Martínez, B., Afonso-Carrillo, J., Anadón, R., Araújo, R., Arenas, F., Arrontes, J., Borja, A., Díez, I., Duarte, L., Fernández, C., Tasende, M.G., Gorostiaga, J.M., Peteiro, C., Puente, A., Rico, J.M., Sangil, C., Sansón, M., Tuya, F., Bárbara, I., Juanes, J.A., and Viejo, R.M. (2015). Regresión de las algas marinas en la costa atlántica de la Península ibérica y en las Islas Canarias por efecto del cambio climático. *ALGAS, Boletín Informativo de la Sociedad Española de Ficología*, 49, 5–12.

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R., and Campos, E. (2020). Observed ocean bottom temperature variability at four sites in the Northwestern Argentine basin: Evidence of decadal deep/abyssal

warming amidst hourly to interannual variability during 2009–2019. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089093.

Melet, A., Almar, R., Hemer, M., Le Cozannet, G., Meyssignac, B., and Ruggiero, P. (2020). Contribution of wave setup to projected coastal sea level changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2020JC016078.

Melet, A., Meyssignac, B., Almar, R., and Le Cozannet, G. (2018). Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise. *Nature Climate Change*, 8, 234–239.

Melzner, F., Mark, F.C., Seibel, B.A., and Tomanek, L. (2020). Ocean Acidification and Coastal Marine Invertebrates: Tracking CO<sub>2</sub> Effects from Seawater to the Cell. *Annual Review of Marine Science*, 12, 499–523.

Mentaschi, L., Vousedoukas, M.I., Pekel, J.F., Voukouvalas, E., and Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8, 12876.

Mikaelyan, A.S., Pautosa, L.A., Chasovnikov, V.K., Mosharov, S.A., and Silkin, V.A. (2015). Alternation of diatoms and coccolithophores in the north-eastern Black Sea: a response to nutrient changes. *Hydrobiologia*, 755, 89–105.

Muguerza, N., Díez, I., Quintano, E., Bustamante, M., and Gorostiaga, J.M. (2017). Structural impoverishment of the subtidal vegetation of southeastern Bay of Biscay from 1991 to 2013 in the context of climate change. *Journal of Sea Research*, 130, 166–179.

Nerem, R.S., Beckley, B.D., Fasullo, J.T., and Mitchum, G.T. (2018). Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 9.

Paris, F., Lecacheux, S., Idier, D., and Charles, E. (2014). Assessing wave climate trends in the Bay of Biscay through an intercomparison of wave hindcasts and reanalyses. *Ocean Dynamics*, 52.

Pauly, D., and Cheung, W.W.L. (2018). Sound physiological knowledge and principles in modeling shrinking of fishes under climate change. *Global Change Biology*, 24, e15–e26.

Pelejero, C., Calvo, E., and Hoegh-Guldberg, O. (2010). Paleo-perspectives on ocean acidification. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 332-344.

Pérez, L., Borja, A., Rodríguez, J.G., and Muxika, I. (2009). Long-term environmental, anthropogenic and climatic factors explaining spatial and temporal distribution of softbottom benthic communities within the Basque estuaries. *Revista de Investigación Marina*, 14, 1-22.

Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R., and Reynolds, J.D. (2005). Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes. *Science*, 308, 1912-1915.

Poloczanska, E.S., Brown, C.J., Sydeman, W.J., Kiessling, W., Schoeman, D.S., Moore, P.J., Brander, K., Bruno, J.F., Buckley, L.B., Burrows, M.T., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C.V., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F., Thompson, S.A., and Richardson, A.J. (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3, 919-925.

Poloczanska, E.S., Burrows, M.T., Brown, C.J., Garcia Molinos, J., Halpern, B.S., Hoegh-Guldberg, O., Kappel, C.V., Moore, P.J., Richardson, A.J., Schoeman, D.S., and Sydeman, W.J. (2016). Responses of marine organisms to climate change across oceans. *Frontiers in Marine Science*, 3.

Ramos, E., Guinda, X., Puente, A., de la Hoz, C.F., and Juanes, J.A. (2020). Changes in the distribution of intertidal macroalgae along a longitudinal gradient in the northern coast of Spain. *Marine Environmental Research*, 157, 104930.

Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, 160, 320-332.

Reguero, B.G., Losada, I.J., and Méndez, F.J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10, 205.

Rhein, M., Rintoul, S.R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R.A., Gulev, S., Johnson, G.C., Josey, S.A., Kostianoy, A., Mauritzen, C., Roemmich, D., Talley, L.D. and Wang, F. (2013). Observations: Ocean. In: *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., Qin, D., Plattner,

G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Rose, K.A., Cowan Jr, J.H., Winemiller, K.O., Myers, R.A., and Hilborn, R. (2001). Compensatory density dependence in fish populations: importance, controversy, understanding and prognosis. *Fish and Fisheries*, 2, 293-327.

Ryabinin, V., Barbière, J., Haugan, P., Kullenberg, G., Smith, N., McLean, C., Troisi, A., Fisher, A., Aricò, S., Aarup, T., Pissierssens, P., Viscbeck, M., Enovoldsen, H.O., and Rigaud, J. (2019). The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development. *Frontiers in Marine Science*, 6.

Siegel, D.A., Behrenfeld, M.J., Maritorena, S., McClain, C.R., Antoine, D., Bailey, S.W., Bontempi, P.S., Boss, E.S., Dierssen, H.M., Doney, S.C., Eplee, R.E., Evans, R.H., Feldman, G.C., Fields, E., Franz, B.A., Kuring, N.A., Mengelt, C., Nelson, N.B., Patt, F.S., Robinson, W.D., Sarmiento, J.L., Swan, C.M., Werdell, P.J., Westberry, T.K., Wilding, J.G., and Yoder, J.A. (2013). Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission. *Remote Sensing of Environment*, 135, 77-91.

Simpson, G.L. (2018). Modelling Palaeoecological Time Series Using Generalised Additive Models. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6.

Somavilla, R., González-Pola, C., and Fernández-Díaz, J. (2017). The warmer the ocean surface, the shallower the mixed layer. How much of this is true? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 7698-7716.

Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T.L., Bopp, L., Cadule, P., Cocco, V., Doney, S.C., Gehlen, M., Lindsay, K., Moore, J.K., Schneider, B., and Segschneider, J. (2010). Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis. *Biogeosciences*, 7, 979-1005.

Staudinger, M.D., Mills, K.E., Stamieszkin, K., Record, N.R., Hudak, C.A., Allyn, A., Diamond, A., Friedland, K.D., Golet, W., Henderson, M.E., Hernandez, C.M., Huntington, T.G., Ji, R., Johnson, C.L., Johnson, D.S., Jordaan, A., Kocik, J., Li, Y., Liebman, M., Nichols, O.C., Pendleton, D., Richards, R.A., Robben, T., Thomas, A.C., Harvey J.W., and Yakola, K. (2019). It's about time: A synthesis of changing phenology in



the Gulf of Maine ecosystem. *Fisheries Oceanography*, 28: 532– 566.

Sunday, J.M., Fabricius, K.E., Kroeker, K.J., Anderson, K.M., Brown, N.E., Barry, J.P., Connell, S.D., Dupont, S., Gaylord, B., Hall-Spencer, J.M., Klinger, T., Milazzo, M., Munday, P.L., Russell, B.D., Sanford, E., Thiagarajan, V., Vaughan, M.L.H., Widdicombe, S., and Harley, C.D.G. (2017) Ocean acidification can mediate biodiversity shifts by changing biogenic habitat. *Nature Climate Change*, 7, 81–85.

Trombetta, T., Vidussi, F., Mas, S., Parin, D., Simier, M., and Mostakir, B. (2019). Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. *PLoS ONE*, 14(1), e0214933.

Ulazia, A., Penalba, M., Ibarra-Berastegui, G., Ringwood, J., and Saénz, J. (2017). Wave energy trends over the Bay of Biscay and the consequences for wave energy converters. *Energy*, 141, 624–634.

Valencia, V., Fontán, A., Goikoetxea, N., Chifflet, M., González, M., and López, A. (2019). Longterm evolution of the stratification, winter mixing and -S signature of upper water masses in the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 181, 124–134.

Valencia, V., Franco, J., Borja, A., and Fontán, A. (2004). Hydrography of the southeastern Bay of Biscay. Borja, A. and Collins, M. (eds.) *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*, Elsevier Oceanography Series, 70, 159–194.

Véron, M., Duhamel, E., Bertignac, M., Pawlowski, L., and Huret, M. (2020). Major changes in sardine growth and body condition in the Bay of Biscay between 2003 and 2016: Temporal trends and drivers. *Progress in Oceanography*, 182, 102274.

Villarino, E., Irigoien, X., Villate, F., Iriarte, A., Uriarte, I., Zervoudaki, S., Carstensen, J., O' Brien, T.D., and Chust, G. (2020). Response of copepod communities to ocean warming in three time-series across the North Atlantic and Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 636, 47–61.

Voerman, S.E., Llera, E., and Rico, J.M. (2013). Climate driven changes in subtidal kelp forest communities in NW Spain. *Marine Environmental Research*, 90, 119–127.

von Schuckmann, K., Cheng, L., Palmer, M. D., Hansen, J., Tassone, C., Aich, V., Adusumilli, S., Beltrami,

H., Boyer, T., Cuesta-Valero, F.J., Desbruyères, D., Domingues, C., García-García, A., Gentile, P., Gilson, J., Gorfer, M., Haimberger, L., Ishii, M., Johnson, G. C., Killick, R., King, B. A., Kirchengast, G., Kolodziejczyk, N., Lyman, J., Marzeion, B., Mayer, M., Monnier, M., Monselesan, D. P., Purkey, S., Roemmich, D., Schweiger, A., Seneviratne, S. I., Shepherd, A., Slater, D. A., Steiner, A. K., Straneo, F., Timmermans, M-L., and Wijffels, S. E., "Heat Stored in the Earth System: Where Does the Energy Go?" (2020). Publications, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce. 611.

Wang, X. L., and Swail, V. R. (2001). Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes, *Journal of Climate*, 14(10), 2204–2221.

Woppelmann, G., Pouvreau, N., and Simon, B. (2006). Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. *Ocean Dynamics*, 56, 487–497.

Young, I.R., and Ribal, A. (2019). Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science*, 364, 548–552.

Zika, J.D., Skliris, N., Blaker, A.T., Marsh, R., Nurser, A.J., and Josey, S.A. (2018). Improves estimates of water cycle change from ocean salinity: the key role of ocean warming. *Environmental Research Letters*, 13, 7

