



Itsasoko eta kostako txostena
Informe marino-costero

Klima-aldaketaren adierazleen joera eta bilakaera eta etorkizuneko proiektzioak

Tendencia y evolución
de indicadores de cambio
climático y proyecciones
futuras

Laburpena	4	Resumen	4
1. Sarrera	6	1. Introducción	6
1.1. Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisi	7	1.1. Análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático	7
1.2. IPCCren klima-agertokiak	8	1.2. Escenarios climáticos del IPCC	8
2. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa	9	2. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático	9
2.1. Itsasoko tenperatura	9	2.1. Temperatura del mar	9
2.2. Itsas maila	11	2.2. Nivel del mar	11
2.3. Kostaldeko higadura hondartzetan	14	2.3. Erosión costera en playas	14
2.4. Azidotzea (pH-a)	17	2.4. Acidificación (pH)	17
3. IPCCren klima-agertokiak	22	3. Escenarios climáticos del IPCC	22
3.1. Klima-agertokiak eguneratzea: RCP, SSP eta SSP-RCP	22	3.1. Actualización de escenarios climáticos: RCP, SSP y SSP-RCP	22
3.2. Proiektzio globalen eta eskualde- mailakoen arteko alderaketa	28	3.2. Comparativa de proyecciones globales y regionales	28
3.2.1. Itsasoaren batez besteko maila	29	3.2.1. Nivel medio del mar	29
3.2.2. Tenperatura	31	3.2.2. Temperatura	31
3.2.3. Gazitasuna	31	3.2.3. Salinidad	31
3.2.4. Azidotzea (pH-a)	32	3.2.4. Acidificación (pH)	32
3.2.5. Oxigenoa	33	3.2.5. Oxígeno	33
3.2.6. Klorofila	33	3.2.6. Clorofila	33
4. Ondorioak	37	4. Conclusiones	37
Adierazleetan behatutako joerak	40	Tendencias observadas en los indicadores	40
Glosarioa	41	Glosario	41
Erreferentziak	45	Referencias	45



Laburpena

Resumen

Zein aldaketa behatzen dira?

- Bizkaiko golkoan eta euskal kostaldean, 1980ko hamarkadatik aurrera itsasoa berotzen ari dela nabaritzen da. Berotze-tasa handiagoa da gainazalean, 0-100 m-ko zutabearekin alderatuta.
- Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila hamarkada bakoitzeko 0,99 eta 3,7 cm arteko tasan igotzen ari da 90eko hamarkadaz geroztik. Itsas mailaren igoera bizkortzen ari da eremuan azken hiru hamarkadetan.
- Kostaldeko uretan, kostaldetik 100 kilometro-ra eta 100 metroko sakoneran, itsasoko uraren pH-aren $0,123 \pm 0,002$ unitateko jaitsiera ikusi da hamarkada bakoitzeko. Prozesu hori azido-tze-prozesu globalari lotuta egon liteke, baina, edonola ere, beharrezkoa da pH-ak ur-zutabearen duen aldakuntza aztertzen jarraitzea.
- Zarauzko hondartzak nolabaiteko higadura-maila du, 2010-2021 aldian itsasgorako kosta-lerroaren barrualderanzko atzerakadan islatzen dena. Joera hori olatuen batez besteko baldintzen hazkunde arinarekin eta olatuen muturreko baldintza batzuekin lotuta egongo litzateke, hala nola 2013-2014ko neguko ekaitzen sekuentziarekin.

Zer gerta liteke etorkizunean?

IPCCren 6. txostenari dagozkion klima-ereduek adierazten dutenez, berotzeak, itsas mailaren igoerak eta azidotzeak jarraitu egingo dute datozen hamarkadetan. Aldaketa horien tasa eta magnitudea etorkizuneko isuri-agertokien arabera izango da. Eskualde-mailan, Bizkaiko golkorako proiektzioek, tarteko agertokian (SSP2-4.5) eta goiko muturrekoan -'Erregai fosilek bultzatutako garapena' (SSP5-8.5)- mende-amaierarako (2080-2099) adierazten dute, erreferentzia-aldiarekiko (1993-2021):

¿Qué cambios se observan?

- En el golfo de Bizkaia y la costa vasca se aprecia un calentamiento del mar a partir de los años 80. La tasa de calentamiento es mayor en superficie, en comparación con la columna de 0-100 m.
- El nivel medio del mar en el golfo de Bizkaia está ascendiendo a una tasa de entre 0,99 y 3,7 cm por década desde los años 90. El ascenso del nivel del mar se está acelerando en la zona en las tres últimas décadas.
- En las aguas costeras, a 100 km de costa y 100 m de profundidad, se observa un descenso del pH del agua de mar de $0,123 \pm 0,002$ unidades por década. Este proceso podría estar asociado al proceso de acidificación global, aunque es necesario continuar con el análisis de la variación de pH a lo largo de la columna de agua.
- La playa de Zarautz está sujeta a cierto grado de erosión, reflejado en un retroceso hacia el interior de la línea de costa de pleamar en el periodo 2010-2021. Esta tendencia estaría asociada al ligero incremento en las condiciones medias del oleaje y de ciertas condiciones extremas de oleaje, como la secuencia de tormentas del invierno de 2013-2014.

¿Qué podría suceder en el futuro?

Los modelos climáticos correspondientes al 6º Informe del IPCC, indican que el calentamiento, la subida del nivel del mar y la acidificación continuarán en las próximas décadas. La tasa y magnitud de estos cambios dependerá de los escenarios futuros de emisiones. A escala regional, las proyecciones para el golfo de Bizkaia, bajo los escenarios intermedio (SSP2-4.5) y extremo superior 'Desarrollo impulsado por combustibles fósiles' (SSP5-8.5), para finales de siglo (2080-2099) con respecto al periodo de referencia (1993-2021) indican:



- Itsas mailaren 50–65 cm-ko igoera 1995–2014 aldiarekiko.
- Itsasoaren 1,44–2,41 °C-ko berotzea gainazalean.
- Ozeanoaren azidotzea (–0,19 eta –0,38 artekoa).
- Oxigeno-kontzentrazioa murriztea (–0,13 eta –0,23 ml/l artean).
- Klorofila murriztea (–0,05 eta –0,06 mg/m³ artean).
- Ascenso en el nivel del mar de 50–65 cm respecto al periodo 1995–2014.
- Calentamiento del mar en superficie de 1,44–2,41 °C.
- Acidificación del océano (–0,19 a –0,38).
- Disminución de la concentración de oxígeno (–0,13 a –0,23 ml/l).
- Disminución de la clorofila (–0,05 a –0,06 mg/m³).



1. Sarrera

Aurreikuspenen arabera, XXI. mendean zehar ozeanoak eta kostaldeak azken mende edo milurtekoetan ikusi ez diren baldintzei egin beharko diete aurre (Fox-Kemper et al.; 2021; Lee et al., 2021). Aldaketa horien artean sartzen dira tenperaturaren igoera, ozeanoaren goiko aldeko estratifikazio handiagoa, itsasoaren batez besteko mailaren etengabeko igoera, azidotze handiagoa edo oxigeno disolbatuaren kontzentrazioaren murrizketa. Ozeanoaren baldintza fisiko eta kimikoen aldaketa horiek, bakoitza bere aldetik eta guztiak batera, aldarazten ari dira ozeanoko eta kostaldeko organismoen banaketa, fenologia eta ugaritasuna lurreko eskualde guztietan, hasi mikrobioetatik eta ugaztunetara arte, hasi banakoetatik eta ekosistemetara arte. Kostaldean higadurari ere eragiten diote, eta kostako azpiegiturak arriskuan jartzen dituzte. Aldaketa horien tasak eta magnitudeak eta lotutako arriskuak berotegi-efektuko gasen etorkizuneko isuriaren araberakoak izango dira, neurri handi batean.

Behaketa historikoei erakutsi dute funtsezkoak direla klimaren bilakaera eta klimak itsas sisteman dituen ondorioak detektatzeko eta ulertzeko. Horregatik, prozesu horietako bakoitza tokiko mailan hobeto ulertu ahal izateko, klimaren, ingurumenaren eta biologiaren esparruko parametro-multzotako buruzko behaketak/datu sendoak izan behar dira, kalitate handikoak. Adierazle horien jarraipenak aukera emango du behatutako aldakortasunaren kausak behar bezala esleitzeko, eta klimaren bilakaera ulertzeko, modelatzeko eta proiektatzeko behar den informazioa emango du, bai eta arintzeko eta egokitzeko estrategien plangintza egiteko behar dena ere.

Hori da Gipuzkoako Itsasoko eta Kostako Behatokiaren helburua, klima-aldaketaren jarraipen-sistema integratua izatea, helburu hauekin: (1) klima-aldaketaren eta haren eraginaren etengabeko zaintza, klima-aldaketaren adierazle batzuk monitorizatuz, eta (2) etorkizuneko balizko agertoki eta inpaktu eguneratuaren jarraipena egitea, eta horiek eguneratzea eta ulertzea. Bi helburu horiek funtsezkoak dira arriskuei aurrea hartzeko eta kostaldean

1. Introducción

A lo largo del siglo XXI, se prevé que el océano y las costas se enfrenten a condiciones sin precedentes en los últimos siglos o milenios (Fox-Kemper et al., 2021; Lee et al., 2021). Estos cambios incluyen el incremento de la temperatura, mayor estratificación del océano superior, un aumento continuo del nivel medio del mar, una mayor acidificación o la disminución de la concentración de oxígeno disuelto. Estos cambios en las condiciones físicas y químicas del océano, de forma individual y conjunta, están cambiando la distribución, fenología y abundancia de organismos oceánicos y costeros, de microbios a mamíferos y de individuos a ecosistemas, en todas las regiones de la tierra. También afectan a la erosión de las costas y ponen en peligro infraestructuras costeras. Las tasas y magnitudes de estos cambios y los riesgos asociados dependerán en gran medida de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero.

Las observaciones históricas han demostrado ser esenciales para detectar y comprender la evolución del clima y sus consecuencias en el sistema marino. Por ello, para poder comprender mejor cada uno de estos procesos a escala local, es necesario disponer de observaciones/datos consistentes, de alta calidad, sobre un conjunto de parámetros climáticos, ambientales y biológicos. El seguimiento de estos indicadores permitirá la correcta atribución de las causas de la variabilidad observada y proporcionará la información necesaria para comprender, modelar y proyectar la evolución del clima, así como la planificación de estrategias de mitigación y adaptación.

Este es el objetivo del Observatorio marino-costero de Gipuzkoa, ser un sistema integrado de seguimiento del cambio climático que permita: (1) la vigilancia continua del cambio climático y sus efectos a través de la monitorización de una serie de indicadores de cambio climático, y (2) el seguimiento, actualización y comprensión de los posibles escenarios e impactos regionalizados futuros más actualizadas. Ambos objetivos son clave para anticiparnos a los riesgos y definir los criterios de adaptación que

egin beharreko egokitzapen-irizpideak definitzeko, Gipuzkoa klima-aldaketaren aurrean erresilientea goa izan dadin. Hori guztia, Gipuzkoako Klima Aldaketaren Aurkako Borroka Estrategiaren –Gipuzkoa Klima 2050en– helburuekin bat etorritz.

Txosten honen helburuak bi dira: (1) 2022ko Itsasoko eta Kostako Txostenean¹ definitutako klima-aldaketaren adierazle garrantzitsuenen jarraipenarekin eta analisiarekin jarraitzea, adierazle horiek klima-aldaketaren testuinguru batean duten bilakaerari dagokionez, eta (2) IPCCk 2021ean argitaratutako azken txosteneko klima-aldaketaren agertoki berrien ondorio nagusiak laburbiltzea.

1.1. Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisia

Helburua da 2022ko Itsasoko eta Kostako txostenean Gipuzkoako itsasertzerako definitutako klima-aldaketaren adierazle fisiko-kimikoen eta biologikoen jarraipena eta analisia egitea, eta tokiko klima-aldaketarekin lotutako joerak hobeto ulertzea. Zehazki, klima-aldaketaren lau adierazle adierazgarrien joerak aztertu dira: itsasoko temperatura, itsasoaren batez besteko maila, higadura eta kosta-lerroa. Aldagai atmosferikoen eta hidrológikoen (airearen temperaturaren, prezipitazioaren, haizearen eta emariaren) jarraipena “Klima-aldaketaren inpaktua eta harekiko kalteberatasuna Gipuzkoan” txostenean aurkezten da.

Adierazleen kalkulua plataforma kontinentalean egindako behaketa-multzo zabal batean oinarritzen da. Horietan sartzen dira mareografoek eta buiek denbora errealean egindako neurketak, bai eta kanpaina ozeanografikoetan *in situ* hartutako neurriak ere, hala nola ‘Aldaketak’² proiektuari lotutakoak, 2022an jarraipena izan dutenak Behatokiaren eta EAEko tarteko uren eta kostaldeko uren egoera ekologikoaren jarraipen-sarearen esparruan.

1 <https://www.naturklima.eus/itsasoko-eta-kostako-txostena.htm>

2 Hileko kanpaina ozeanografikoak Gipuzkoako D2 erreferentziako estazioan, ur-zutabearen tenperatura, gazitasuna, estratifikazioa eta nahastea, fitoplanktona eta bakterioak neurtzeko.

deben llevarse a cabo en la costa, para hacer de Gipuzkoa un territorio más resiliente ante el cambio climático. Todo ello alineado con los objetivos de la Estrategia guipuzcoana de Lucha Contra el Cambio Climático, Gipuzkoa Klima 2050.

El objetivo de este informe es (1) continuar con el seguimiento y análisis de los principales indicadores de cambio climático más representativos, definidos en el Informe marino-costero de 2022¹, en relación a la evolución de dichos indicadores en un contexto de cambio climático y (2) sintetizar las principales conclusiones para nuestras costas de los nuevos escenarios de cambio climático del último informe del IPCC publicado en 2021.

1.1. Análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático

El objetivo es el seguimiento y análisis de los indicadores fisicoquímicos y biológicos del cambio climático, definidos para el litoral de Gipuzkoa en el Informe marino-costero de 2022, y ahondar en la comprensión de las tendencias en relación con el cambio climático local. En concreto, se han analizado las tendencias de los cuatro indicadores de cambio climático más representativos: temperatura del mar, nivel medio del mar y erosión y línea de costa. El seguimiento de las variables atmosféricas e hidrológicas (temperatura del aire, precipitación, viento y caudal) se presenta en el Informe de Impacto y Vulnerabilidad al Cambio Climático en Gipuzkoa.

El cálculo de los distintos indicadores se basa en un amplio conjunto de observaciones realizadas sobre la plataforma continental. Estas incluyen las mediciones en tiempo real realizadas por mareógrafos y boyas, así como medidas *in situ* recogidas en campañas oceanográficas, como las asociadas al proyecto ‘Variaciones’² que han continuado en 2022 en el marco de este Observatorio o la Red de

1 <https://www.naturklima.eus/informe-marino-costero.htm>

2 Campañas oceanográficas mensuales en la estación guipuzcoana de referencia D2 para las medidas en la columna de agua de temperatura, salinidad, estratificación y mezcla, fitoplancton y bacterias.



Gainera, Itsasertzeko Bideometria Foru Sareko datuak erabiltzen dira hondartzen jarraipena egiteko, eta baita satelite-sentsoreen bidezko behaketak.

Gure itsasertzean eskuragarri dauden behaketak osatzeko, 2021ean eskuratutako pH-sentsore bat ezartzen jarraitu da. Helburua da sentsore horrek Gipuzkoako kostaldean pH-aren neurketak modu erregularrean ematea. Bizkaiko golkoko zenbait puntutan neurketa puntualak badaude ere, guk ikertu ahal izan dugunaren arabera ez dago pH-neurketa erregularrak dituen denbora-serierik. Sentsore berri horri esker, klima-aldaketaren funtsezko aldagai bat eta horrek itsas fauna kaltzifikatzailean izango dituen inpaktuak monitorizatu ahal izango dira.

Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisia 2022ko Itsasoko eta Kostako Txostenean xehetasunez azaldutako bera da. Analisia aldagai-mota bakoitzaren eta espazio-dimentsio desberdinetan eskuragarri dauden datuen arabera da. Azterketan erabilitako metodoen helburua da adierazlea denboran zehar aldatzen den zehaztea, bai eta aldakuntza hori gure eremuari dagokion klima-aldaketarekin lotuta ote dagoen ere. Klima-aldaketak, oro har, denboran zeharreko progresio oso pixkanakakoa duenez, klima-aldaketarekin izan daitekeen harremanaren azarnak denboran zeharreko joera lineal gisa ezarri dira. Laburbilduta, denbora-serieen metodologia integratua eta malgua erabili da, eredu gehigarri orokor mistoetan (GAMM) oinarritua, seriea urtaroko osagaien eta joeran deskonposatzeko aukera ematen duena (Chust et al., 2022).

1.2. IPCCren klima-agertokiak

Helburua da IPCCren azken (6.) txosteneko (AR6-IPCC, 2021) klima-agertoki berrien sintesia aurkeztea, bai eta etorkizuneko klima-proiektzioei buruzko esplorazio-ebaluazioa ere. Zehazki, (1) agertoki berri bakoitzaren esanahia zehazten da, eta (2) agertoki berri horietarako eta denbora-tarte desberdinetarako proiektzio globalen eta eskualdekoen alderaketa bat aurkezten da.

seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la CAPV. Además, se utilizan datos de la Red Foral de Videometría Costera para el seguimiento de playas y observaciones mediante sensores de satélite.

Para completar las observaciones disponibles en nuestro litoral se ha continuado con la implementación de un sensor de pH adquirido en 2021. El objetivo es que este sensor proporcione medidas de pH en la costa de Gipuzkoa de manera regular. Aunque existen medidas puntuales en diferentes puntos del golfo de Bizkaia, hasta donde nosotros hemos podido averiguar, no existe una serie temporal con medidas regulares de pH. Este nuevo sensor permitirá la monitorización de una variable esencial del cambio climático y sus impactos en la fauna marina calcificante.

El análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático es la misma que la explicada en detalle en el Informe marino-costero de 2022. El análisis es específico de cada tipo de variable y los datos disponibles en las diferentes dimensiones espaciales. Los métodos empleados tienen como objetivo establecer si el indicador varía en el tiempo y si esa variación está relacionada con el cambio climático correspondiente a nuestra zona. Dado que, en general, el cambio climático tiene una progresión muy gradual en el tiempo, los indicios de la posible relación con el cambio climático se han establecido como una tendencia lineal en el tiempo. De forma resumida, se ha utilizado una metodología integrada y flexible de series temporales basada en modelos aditivos generalizados mixtos (GAMMs) que permiten descomponer la serie en la componente estacional y en la tendencia (Chust et al., 2022).

1.2. Escenarios climáticos del IPCC

El objetivo es presentar una síntesis de los nuevos escenarios climáticos del último (6º) Informe del IPCC (AR6-IPCC, 2021), así como una evaluación exploratoria sobre las proyecciones climáticas futuras. En concreto, (1) se detalla el significado de cada uno de los nuevos escenarios y (2) se presenta una comparativa de las proyecciones globales y regionales para estos nuevos escenarios y distintos horizontes temporales.

2. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa

2. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático

2.1. Itsasoko temperatura

Ozeanoaren lehen metroek atmosfera osoak bezainbeste energia dute, eta, beraz, itsasoaren gainazaleko tenperatura funtsezko adierazlea da klima monitorizatzeko. Ozeanoak berotegi-efektuko gasen isuri antropogenikoak eragindako bero gehigarriaren % 90 arte xurgatu du (Abram et al., 2019; Cheng et al., 2019; von Schuckmann et al., 2020; Foster et al., 2022; Johnson & Lumpkin, 2022). Horrek ozeanoko arro guztiak berotzea eragin du, eta berotze hori atzeraezina izango da datozen mendeetan. IPCCk ondorioztatu du ia segurua dela ozeanoko goi-geruzak (0-700 m) 1970az geroztik berotu direla, eta seguruenik gizakiaren eragina kausa nagusia dela (IPCC, 2021).

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

Ozeanoaren batez besteko gainazaleko tenperatura handitu egin da industriaurreko garaitik. Berehala hasi zen handitzen 70eko hamarkadaren amaieran, eta gaur egun gora egiten jarraitzen du. Batez beste, azken lau hamarkadetan (1980-2020) tenperatura 0,6 °C igo da (Fox-Kemper et al., 2021). 1950-2021 aldirako, igoera-tasa $0,10 \pm 0,01$ °C-koa da hamarkada bakoitzeko (Johnson & Lumpkin, 2022). Hazkunde hori ez da uniforme eskualde guztietan. Horrela, Ipar Atlantikoko igoera-tasa batezbesteko globala baino 1,1 aldiz handiagoa da, $0,11 \pm 0,04$ °C hamarkada bakoitzeko (Johnson & Lumpkin, 2022). Gainazaleko berotze hori sakonera guztietara zabaltzen da (Cheng et al., 2020; Meinen et al., 2020).

2.1. Temperatura del mar

Los primeros metros del océano contienen tanta energía como toda la atmosfera, por lo que la temperatura superficial del mar es un indicador clave para la monitorización del clima. El océano ha absorbido hasta el 90% del calor adicional inducido por la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero (Abram et al., 2019; Cheng et al., 2019; von Schuckmann et al., 2020; Foster et al., 2022; Johnson & Lumpkin, 2022). Esto ha provocado el calentamiento de todas las cuencas oceánicas, calentamiento que será irreversible en los próximos siglos. El IPCC ha concluido que 'es prácticamente seguro que las capas superiores del océano (0-700 m) se han calentado desde 1970 y muy probablemente la influencia humana sea la principal causa' (IPCC, 2021).

La temperatura es, además, una variable oceanográfica de gran importancia ecosistémica. Ello se debe a que condiciona la supervivencia, la distribución, metabolismo de especies, las corrientes oceánicas, el ciclo del agua, 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 la oxigenación de las aguas.

La temperatura media superficial del océano se ha incrementado desde la época preindustrial. Comenzó a incrementarse rápidamente a finales de los 70 y continua hasta la actualidad. De media, el incremento de temperatura durante las últimas cuatro décadas (1980-2020) es de 0,6 °C (Fox-Kemper et al., 2021). Para el periodo 1950-2021 la tasa de incremento es de $0,10 \pm 0,01$ °C por década (Johnson & Lumpkin, 2022). Este incremento no es uniforme en todas las regiones. Así, en el Atlántico Norte la tasa de ascenso es 1,1 veces mayor que la media global, $0,11 \pm 0,04$ °C por década (Johnson & Lumpkin, 2022). Este calentamiento en superficie se extiende a todas las profundidades (Cheng et al., 2020; Meinen et al., 2020).

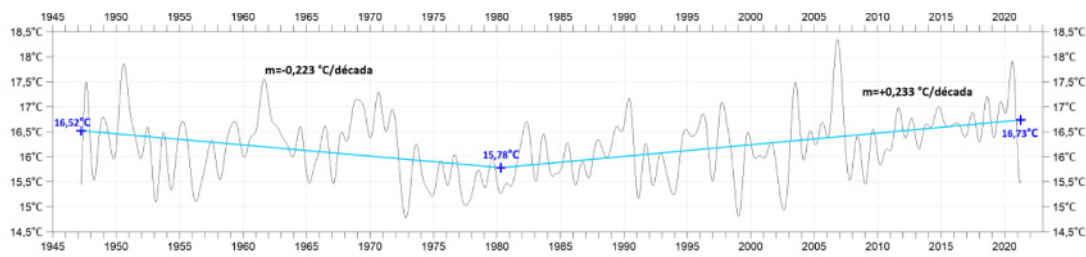


Bizkaiko golkoko eskalan (OSTIA –Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis–sentsorearen datuak) 1981–2021 aldirako gainazaleko tenperaturaren joera $0,19 \pm 0,035^{\circ}\text{C}$ -koa da hamarkada bakoitzeko. 2003–2021 aldi berriagorako, MODIS/Aqua sentsoreak erregistratutako Bizkaiko golkoko itsasoaren gainazaleko tenperaturaren denbora-seriearen analisiak $0,08 \pm 0,034^{\circ}\text{C}$ -ko goranzko joera esanguratsua ere erakusten du.

Donostiako Aquariumean erregistratutako itsasoaren gainazaleko tenperaturak bi joera desberdin dituzten bi aldi erakusten ditu: (1) 1946tik 1980ra bitartean tenperaturak beheranzko joera du ($-0,19 \pm 0,06^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko) eta (2) 1980tik 2021era, joera positiboa, goranzkoa, $0,24 \pm 0,032^{\circ}\text{C}$ -koa hamarkada bakoitzeko. Goranzko joera hori Bizkaiko golgorako behatutakoa baino zertxobait handiago da.

A escala del golfo de Bizkaia (datos del sensor OSTIA: Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis), la tendencia de la temperatura superficial para el periodo 1981–2021 es de $0,19 \pm 0,035^{\circ}\text{C}$ por década. Para un periodo más reciente, 2003–2021, el análisis de la serie temporal de temperatura superficial del mar del golfo de Bizkaia recogida por el sensor MODIS/Aqua muestra también una tendencia creciente significativa de $0,08 \pm 0,034^{\circ}\text{C}$ por década.

La temperatura superficial del mar registrada en el Aquarium de Donostia-San Sebastián presenta dos periodos con dos tendencias diferentes: (1) de 1946 a 1980 la temperatura presenta una tendencia decreciente ($-0,19 \pm 0,06^{\circ}\text{C}$ por década) y (2) de 1980 a 2021, con una tendencia positiva, creciente, de $0,24 \pm 0,032^{\circ}\text{C}$ por década. Esta tendencia creciente es ligeramente superior a la observada para el golfo de Bizkaia.



1. ir. Donostiako Aquariumeko uraren gainazaleko temperatura 1946–2021 aldirako. Datu iragaziak ($T < 1$ urte gabe) eta bat-bateko joera-aldaketaren analisisa.

1. Fig. Temperatura superficial del agua del Aquarium de Donostia-San Sebastián para el periodo 1946–2021. Datos filtrados (sin $T < 1$ año) y análisis de cambio abrupto de tendencia.

1986–2021 aldiko ur-zutabeko (0–100 m-ko sakonerako) tenperaturaren denbora-serieek, Pasaia tik 13,1 km ingurura kokatutako L-RF10 estazioari dagozkionek (D2), batezbesteko goranzko joera esanguratsua erakusten dute sakonera desberdinetan, $0,137 \pm 0,036^{\circ}\text{C}$ -koa hamarkada bakoitzeko.

Laburbilduz, Bizkaiko golkoan eta Gipuzkoako kostaldean, itsasoa 1980ko hamarkadatik aurrera berotzen hasi dela nabaritzen da. 1980tik aurrera aztertutako adierazleen berotze-tasak $0,13^{\circ}\text{C}$ -tik

Las series temporales de la temperatura en la columna de agua (0–100 m de profundidad) en el periodo 1986–2021 en la estación L-RF10 (D2) situada aproximadamente a 13,1 km de Pasaia, presenta una tendencia creciente promedio significativa, a diferentes profundidades, de $0,137 \pm 0,036^{\circ}\text{C}$ por década.

En resumen, en el golfo de Bizkaia y la costa guipuzcoana se aprecia un calentamiento del mar a partir de los años 80. Las tasas de calentamiento de

0,25 °C-ra bitartekoak dira hamarkada bakoitze-ko. Tasa altuenak azaleko temperaturari dagozkio, 0–100 m-ko zutabearekin alderatuta. Eraitza horiek aurretiazko azterketetan detektatutako joerak berresten dituzte (Valencia et al., 2004; Goikoetxea et al., 2009; González et al., 2008; Costoya et al., 2015; Castro et al., 2009; Chust et al., 2022). Bizkai-ko golkoko itsasoaren berotze hori lotuta egongo litzateke Atlantikoaren iparraldeko berotzearekin, klima-aldaketari lotutako ozeano-atmosfera interakzio-patroiekin lotuta dagoenarekin.

2.2. Itsas maila

Itsasoaren batez besteko mailaren aldaketa klima-aldaketaren funtsezko adierazle bat da; izan ere, ozeanoaren berotzearen ondoriozko hedapen termikoa islatzen du, bai eta izotz- eta glaziar-geruzak galtzearen ondoriozko ozeanoko masaren handitzea ere.

Itsas mailaren igoera klima-aldaketaren mehatxu garrantzitsuetako bat da kostaldean. Itsasoaren batez besteko mailak eta muturreko gertakariak gora egiteak, eta horien ondorioz kostal-lerroak atzera egiteak, hondartzen aire-azalera murriztea edo desagertzea eragin dezakete, baita kostaldeko azpiegituren eta eraikinen muturreko gertakarien eta uholdeen aurreko esposizioa handitzea ere. Itsas maila nola eta zergatik aldatzen ari den jakiteko etengabeko jarraipena garrantzitsua da, gora egiten jarraituko baitu, jada gertatutako berotzeari ozeanoak emandako erantzun iraunkorra dela-eta (IPCC, 2021).

Itsasoaren batez besteko maila globala azkarrago igo zen XX. mendean azken hiru milurtekoetan baino, 20 cm [15–25 cm] igoz 1901–2018 aldian (IPCC, 2021). 1971–2018 aldian, igoera hori 7,2 eta 11,7 cm artekoa izan zen seguruenik, eta ekarpen handienak ozeanoaren hedapen termikoaren (% 50) eta izotz- eta glaziarren geruzen desizoztearen (% 42) ondoriozkoak izan ziren (IPCC, 2021). Satelite-neurketetan oinarrituta, itsas mailak 1993–2022 aldirako eskala globalan izandako igoera-tasa urtean $3,4 \pm 0,4$ mm-koa izan dela estimatzen da. 2013–2022 aldirako tasa hori urtean 4,4 mm-ra arte igo da, hau da, urtean 1,5 mm gehiago 2003–2012 aldiarekin alderatuta (urtean 2,9

los distintos indicadores analizados a partir de 1980 oscilan entre 0,13 °C y 0,25 °C por década. Las tasas más altas corresponden con la temperatura superficial, en comparación con la columna de 0–100 m. Estos resultados confirman las tendencias detectadas en estudios previos (Valencia et al., 2004; Goikoetxea et al., 2009; González et al., 2008; Costoya et al., 2015, de Castro et al., 2009, Chust et al., 2022). Este calentamiento del mar en el golfo de Bizkaia estaría asociado al calentamiento del Atlántico Norte, vinculado a patrones de interacción océano-atmósfera, asociados al cambio climático global.

2.2. Nivel del mar

El cambio en el nivel medio del mar es un indicador esencial del cambio climático, ya que refleja tanto la expansión térmica del océano en respuesta a su calentamiento como el aumento de la masa oceánica debido a la pérdida de capas de hielo y glaciares.

El aumento del nivel del mar es una de las amenazas más importantes del cambio climático en las zonas costeras. El aumento del nivel medio del mar y los eventos extremos, 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 continuará aumentando debido a la respuesta sostenida del océano al calentamiento que ya ha ocurrido (IPCC, 2021).

El nivel medio del mar global aumentó más rápido en el siglo XX que en cualquier siglo anterior en los últimos tres milenios, con un aumento de 20 cm [15 a 25 cm] en el periodo 1901–2018 (IPCC, 2021). Durante el periodo 1971–2018 este ascenso fue muy probablemente de entre 7,2 y 11,7 cm, con las mayores contribuciones debidas a la expansión térmica del océano (50%) y el deshielo de capas de hielo y glaciares (42%) (IPCC, 2021). A partir de las medidas satelitales se estima que la tasa de ascenso del nivel del mar a escala global para el periodo 1993–2022 es de $3,4 \pm 0,4$ mm por año. Para el periodo 2013–2022 esta tasa se incrementa hasta 4,4 mm



mm-ko tasa). Europa-mailan, itsasoaren batez beste-ko mailaren igoera orokorra ikusten da, zeina urtean 2 eta 4 mm artekoa izan den azken 30 urteetan.

Bizkaiko golkoan, kostaldeko mareografoetan erregistratutako denbora-serieen analisiak adierazten du itsasoaren batez besteko maila nabarmen igotzen ari dela, Gijóngo seriean izan ezik, azken horren goranzko joera esangura-mailatik hurbil baitago. 1992–2021 aldirako, igoera-tasak urtean $1,87 \pm 0,5$ mm-koak dira Vigon (1993–2021) eta urtean $3,72 \pm 0,59$ mm-koak Coruñan (1992–2021). Brest-eko mareografoari dagokion serierik luzeenarekin alderatuta, ikusten da tasarik handienak azken aldiari dagozkiola (90eko hamarkadatik aurrerakoari). Horrela, mareografo horretan 1992–2021 aldirako igoera-tasa (urtean $2,99 \pm 0,44$ mm) seriearen aldi osoari dagokionaren bikoitza baino handiagoa da (1946–2021; urtean $1,28 \pm 0,05$ mm).

AZTI-Pasaia³ estazio geodesikoak mareografo bat du, 2007az geroztik minutuero erregistratzen duena itsas maila. 2007–2020 aldian behatutako itsas mailaren igoera urtean $4,89 \pm 0,87$ mm-koa da. Hala ere, serie hori oraingoz laburregia da Bizkaiko golkoko gainerako mareografoetako datu-serieekin alderatzeko moduko ondorioak atera ahal izateko. Hala ere, lortutako datuak Bilboko mareografoan lortutakoen oso antzekoak dira, batez ere 2013, 2016 eta 2018ko maximoiei eta 2008, 2012 eta 2017ko minimoiei dagokienez.

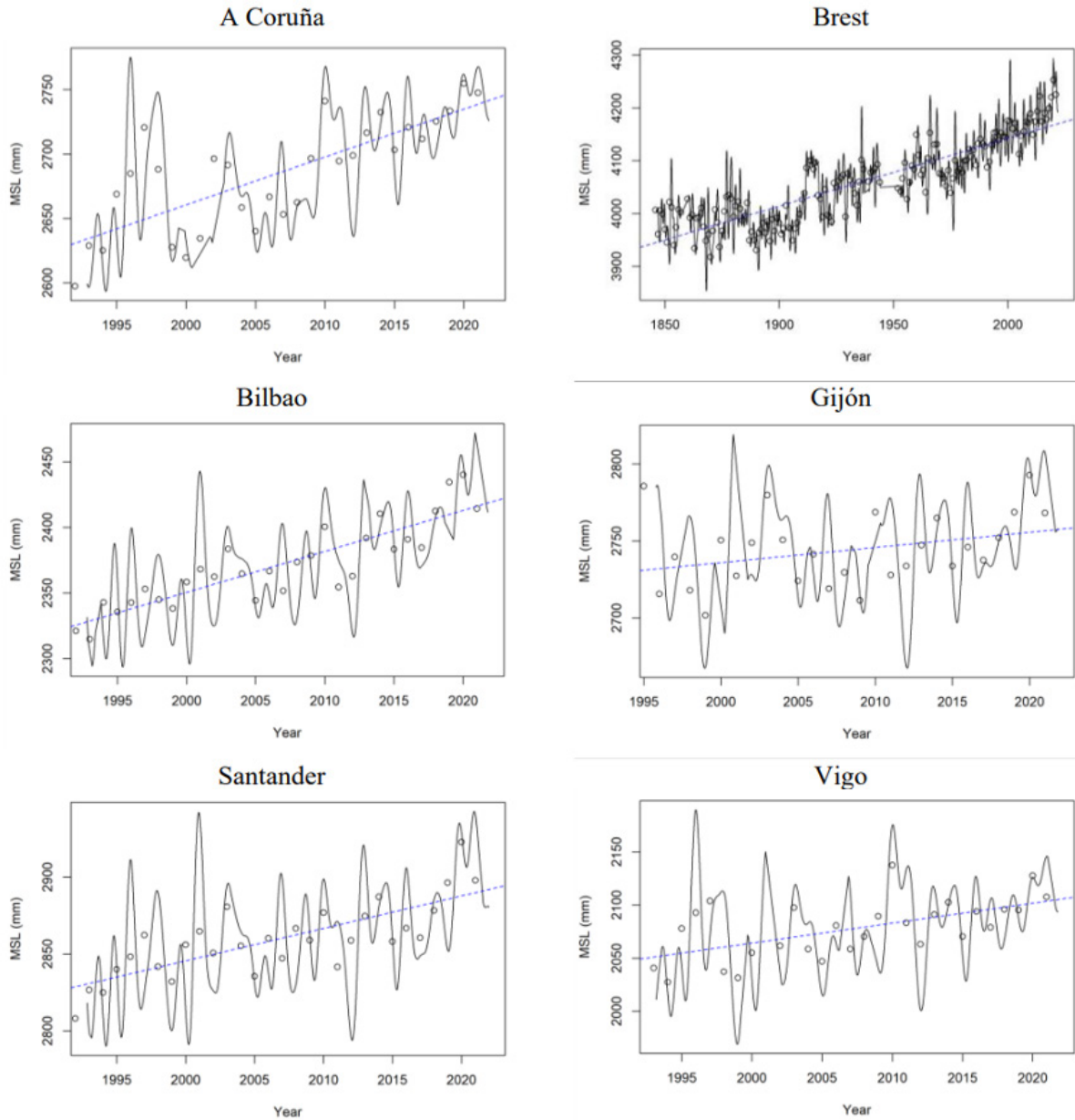
por año, lo que supone 1,5 mm más al año respecto a periodo 2003–2012 (tasa de 2,9 mm por año). A escala europea se observa un ascenso generalizado del nivel medio del mar que oscila entre 2 y 4 mm por año para los últimos 30 años.

A escala del golfo de Bizkaia, el análisis de las series temporales registradas en los mareógrafos costeros, indica que el nivel medio del mar está ascendiendo significativamente, salvo en la serie de Gijón, cuya tendencia creciente está cercana al nivel de significación. Para el periodo 1992–2021, las tasas de ascenso oscilan entre $1,87 \pm 0,5$ mm por año en Vigo (1993–2021) y $3,72 \pm 0,59$ mm por año en A Coruña (1992–2021). Comparando con la serie más larga, correspondiente al mareógrafo de Brest, se aprecia que las tasas más elevadas corresponden al periodo más reciente (desde los años 90). Así, en dicho mareógrafo para el periodo 1992–2021 la tasa de ascenso ($2,99 \pm 0,44$ mm por año) es más del doble que para el periodo completo de la serie (1946–2021; $1,28 \pm 0,05$ mm por año).

La estación geodésica de AZTI-Pasaia³ dispone de un mareógrafo que registra el nivel del mar cada minuto desde 2007. Para el periodo 2007–2020 se observa el ascenso del nivel del mar a una tasa de $4,89 \pm 0,87$ mm por año. Sin embargo, esta serie es aún demasiado corta para poder extraer conclusiones comparables con las series de datos del resto de mareógrafos en el golfo de Bizkaia. No obstante, los resultados son muy similares a los obtenidos para la serie del mareógrafo de Bilbao, sobre todo en cuanto a los valores más altos del nivel de los años 2013, 2016, y 2018 y los mínimos de 2008, 2012 y 2017.

3 Gipuzkoako Foru Aldundiaren, Aranzadiren, Institutu Geografiko Nazionalaren eta Aztiren jabetzakoa. <http://geolabpasaia.org/>

3 Propiedad de la Diputación Foral de Gipuzkoa, Aranzadi, Instituto Geográfico Nacional y Azti. <http://geolabpasaia.org/>



2. ird. Bizkaiko golkoko mareografoetako itsasoaren batez besteko mailaren denbora-serie aztertuak.

2. Fig. Series temporales del nivel medio del mar en mareógrafos del golfo de Bizkaia analizadas.

Bizkaiko golko osoaren eskalan, satellite-sentsoreekin lortutako itsas mailaren bilakaera aztertu da 1993–2021 aldirako. Emaitzak iguera adierazten du urtean $2,68 \pm 0,36$ mm-ko tasarekin, eskala globalean behatutako tasa baino zertxobait txikiagoa.

A escala de todo el golfo de Bizkaia se ha analizado la evolución del nivel del mar obtenido con sensores satelitales para el periodo 1993–2021. El resultado indica un ascenso a una tasa de $2,68 \pm 0,36$ mm por año, ligeramente inferior a la tasa observada a escala global.



Laburbilduz, Bizkaiko Golkoko kostaldearen eta itsasoaren batez besteko maila urtean 0,99 eta 3,7 mm arteko tasarekin igotzen ari da (urtean 2,5 mm batez beste) 90eko hamarkadaz geroztik. Tasa hori aldi bererako tasa globala baino apur bat txikiagoa da (urtean 3,2–3,6 mm –IPCC, 2019–). Hala ere, kon-tuan hartu behar da itsas mailaren igoera ez dela planeta osoan homogenea izan (Cazenave et al., 2018). Horregatik, ondoriozta daiteke detektatutako igoera bat datorrela maila globaleko igoerarekin. Análisiak 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).

En resumen, el nivel medio del mar en la costa y mar del golfo de Bizkaia está ascendiendo a una tasa de entre 0,99 y 3,7 mm por año (2,5 mm por año en promedio) desde los años 90. Esta tasa es ligeramente inferior a la tasa global para el mismo periodo (3,2–3,6 mm por año, (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). Por ello, se puede concluir que el ascenso detectado es consistente con el ascenso a nivel global. El análisis confirma también que el ascenso del nivel del mar se está acelerando en la zona en las últimas tres décadas con respecto al ascenso medio en el siglo XX, en coherencia con estudios que analizan periodos más largos (Woppelmann et al., 2006; Dangendorf et al., 2019).

2.3. Kostaldeko higadura hondartzetan

Klima-aldaketari lotutako itsas mailaren igoerak eta olatuen aldaketek inpaktua dute kostaldeko higaduran eta geomorfologian. Itsas maila igotzearen eta olatuak areagotzearen konbinazioaren ondorioz (azkenek sedimentua daramate), hareatzek atzera egiten dute eta, beraz, kostaldeak inpaktu handiagoa jasaten du. Munduko kostalde hareatsu asko higatzen ari dira jada (Bird, 1985; Luijendijk et al., 2018; Mentaschi et al., 2018), eta, klima-aldaketaren ondorioz, haien egoera larriagotu egin liteke (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe et al., 2016).

Hondartzak eta harea-eremuak dira Gipuzkoako kostaldeko klima-aldaketarekiko elementurik kalteberenetako bat (Chust et al., 2010). Ereduek % 21 eta % 29 arteko higadura-tasak proiektatzen dituzte mende-amaierarako gure itsasertzeko hondartzetarako, itsas mailaren igoeraren eta ekaitz-olatuaren efektu konbinatuaren ondorioz (Santiago et al., 2021).

Kostaldeko higaduraren Adierazle geomorfologikoen joerak zehazteko, Gipuzkoako Itsasertzeko Bideometria Foru Sareak hartutako irudiak erabiltzen dira. Zarauzko hondartzako datu-seriea luzee-na da (2010–2021) eta, beraz, hura erabiltzen da hondartzaren bilakaera historikoa aztertzeke.

2.3. Erosión costera en playas

El incremento del nivel del mar y los cambios en el oleaje asociados al cambio climático tienen un impacto en la erosión y geomorfología costera. 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 un mayor impacto en la costa. Gran parte de las costas arenosas del mundo ya están 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).

Las playas y zonas de arena son uno de los elementos costeros en Gipuzkoa más vulnerables al cambio climático (Chust et al., 2010). Los modelos proyectan para las playas de nuestro litoral tasas de erosión, por el efecto combinado del aumento del nivel del mar y el oleaje de tormenta, de entre 21% y 29% a finales de siglo (de Santiago et al., 2021).

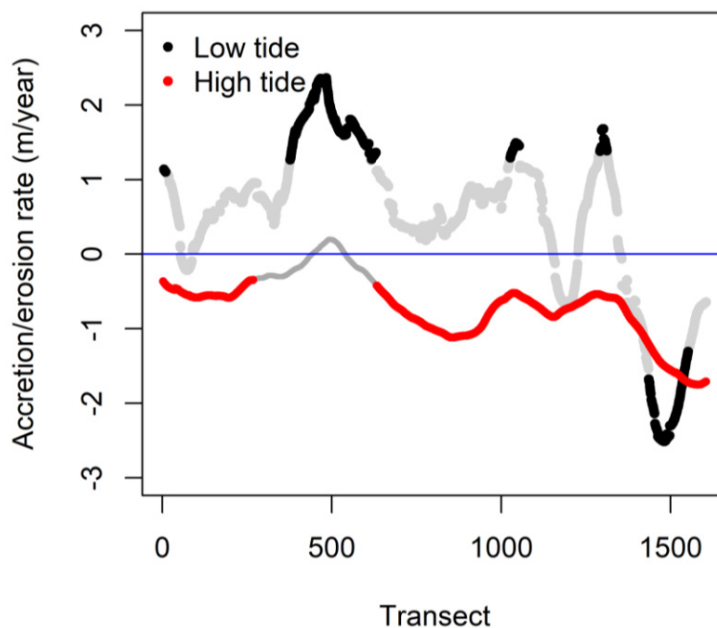
Para determinar las tendencias de los indicadores geomorfológicos de erosión costera se utilizan imágenes capturadas por la Red Foral de Videometría Litoral de Gipuzkoa (RFVLG). La serie de datos de la playa de Zarautz es la más larga (2010–2021) y la que, por tanto, se utiliza para el análisis de la evolución histórica de la playa.

Mareaz gaindiko eta marearteko eremuaren 2010–2021 aldirako denbora-seriearen analisiak mareaz gaindiko eremuaren beheranzko joera ez-esanguratsua adierazten du ($-8.448,24 \pm 5.733,7 \text{ m}^2$ hamarkada bakoitzeko, $p=0,1431$) eta marearteko eremuaren goranzko joera esanguratsua ($18.571,87 \pm 9.195,70 \text{ m}^2$ hamarkada bakoitzeko, $p=0,045$). Emaitza horiek, modu integratuan, hondartzaren izaera disipatiboaren areagotzea iradokitzen dute, seriearen azken aldiko olatu energetikoagoak direla-eta, bereziki.

Hondartzaren batez besteko zabalerari dagokionez, akrezio- edo uzkuetze-joerak aztertu dira hainbat trantsektutarako, bai itsasgoran bai itsasbeheran. Itsasgora-lerroak nabarmen egin du atzera, urtean $-0,5 \text{ m}$ -tik urtean $-2,0 \text{ m}$ -ra bitarteko balioekin, eta atzerakada handiagoa izan da hondartzaren ekialderantz. Aitzitik, itsasbeheran profilek aurrera egiten dute itsasorantz, baina, oro har, aurrerapena ez da esanguratsua, hondartzaren erdialdean izan ezik (urtean $+1,5 \text{ m}$ eta urtean $+2,5 \text{ m}$ artekoa aurrerapen handieneko eremuan). Bi emaitzak integratuz, ikusten da marearteko hondartza-profila leunagoa izaten dela oro har, hau da, disipatiboagoa izaten dela.

El análisis de la serie temporal del área supramareal e intermareal para el periodo 2010–2021 indica una tendencia decreciente no significativa del área supramareal ($-8.448,24 \pm 5.733,7 \text{ m}^2$ por década, $p=0,1431$) y una tendencia creciente sí significativa del área intermareal ($18.571,87 \pm 9.195,70 \text{ m}^2$ por década, $p=0,045$). Estos resultados, de forma integrada, sugieren un aumento del carácter disipativo de la playa debido, en particular, a un oleaje más energético en el periodo más reciente de la serie.

En cuanto a la anchura media de la playa, se han analizado tendencias de acreción o retracción para distintos transectos, tanto en pleamar como en bajamar. La línea de pleamar retrocede significativamente con valores de $-0,5 \text{ m}$ por año a $-2,0 \text{ m}$ por año, siendo mayor el retroceso hacia el este de la playa. Por el contrario, en la bajamar los perfiles avanzan hacia el mar, pero en general el avance no es significativo, excepto en la zona central de la playa ($+1,5 \text{ m}$ por año a $+2,5 \text{ m}$ por año en la zona de mayor avance). Integrando ambos resultados, se observa que en general el perfil de playa en intermareal tiende a ser más suave, esto es, tiende a ser más disipativo.



3. ird. Kosta-lerroaren akrezioa (balio positiboak) eta higadura (balio negatiboak) itsasgoran (gorria) eta itsasbeheran (beltza), trantsektuaren joeratik abiatuta kalkulaturik (mendebaldetik ekialdera) 2010–2021 aldiran zehar. Malda ez-esanguratsuen kolorea ($p < 0,05$) grisez dago adierazita.

3. Fig. Acreción (valores positivos) y erosión (valores negativos) de la línea de costa de pleamar (rojo) y la bajamar (negro) estimada a partir de la tendencia del transecto (de oeste a este) a lo largo del periodo 2010–2021. El color de la pendiente no significativa ($p < 0,05$) se indica en gris.



Garrantzitsua da azpimarratzea itsasgora-leerroaren atzerakada esanguratsurik ez dagoen hondartzako eremua dela itsasbehera-lerroan aurrerapen esanguratsua izan duen eremua. Emaizta hori Zarauzko hondartzaren hiru dimentsioko morfologiatik abiatuta azal daiteke. Hondartza horren ezaugarria tarteko egoera morfodinamikoa da, eta bertan zeharkako barra-sistema eta itzulera-korronteen kanalak daude. Zehazki, modu adierazgarrian atzera egiten ez duen itsasgora-lerroa babes gisa jokatzeko duen zeharkako barra iraunkor bat duen eremu bati dagokio.

Laburbilduz, itsasbeheraren itsasoranzko hazkundea ikusten da, urtean 0,47 m-koa batez beste, eta itsasgoraren barnealderanzko higadura, urtean 0,68 m-koa batez beste. Balantze garbia, beraz, hondartza lehorraren lerroaren barneranzko atzerapena da (urtean 0,68 m), eta marearteko hondartzaren batez besteko zabaleraren handitzea (urtean 1,15 m). Emaizta horiek bat datoz Behatokiaren 2022ko txostenean aurkeztutakoekin; txosten horretan 2010-2020 aldirako seriea aztertzen zen.

2020ra arteko seriearekin egindako analisiak korrelazio positiboa adierazten zuen Zarauzko hondartzaren higaduraren eta Bilbo-Bizkaiko buian erregistratutako olatu-altuera adierazgarriaren aldaketan artean. Olatuetan eta ekaitzetan behatutako joerak ezin zaizkio zuzenean klima-aldaketari esleitu, aldakortasun handia eta inplikaturako prozesu desberdinak direla-eta. Ekaitz eta olatuen epe luzeko aldaketak lotuta daude zirkulazio atmosferikoaren aldaketekin, aldakortasun naturalaren ondorioa edo klima-aldaketaren aurreko erantzuna izan daitezkeenekin. Muturreko olatuen epe luzerako joerarik handiena azal daiteke WEPA (West Europe Pressure Anomaly, Castelle et al., 2017) bezalako urruneko konexioen patroiak areagotzeagatik. Izan ere, 2022ko txostenean aurkeztutako analisisan erakusten da WEPA indizearen korrelazioa neguko olatu-altuera adierazgarriarekin eta neguko mareaz gaindiko batez besteko azalerarekin. Horrek esan nahi du behatutako joerak olatuen hazkunde arinarekin lotuta egongo lirakeela, eta, bereziki, muturreko gertakari jakin batzuekin (adibidez, 2013-2014ko neguko ekaitzen sekuentziarekin).

Kontuan izan behar da, halaber, aztertutako seriea laburregia dela eskala handiko joerak adierazteko, hondartzaren aldakortasun naturalari buruzko datu garrantzitsuak ematen dituen arren. Gainera,

Es importante señalar que la zona de la playa donde no hay un retroceso significativo de la línea de pleamar corresponde con la zona donde hay un avance significativo de la línea de bajamar. Este resultado se puede explicar a partir de la morfología tridimensional de la playa de Zarautz. Esta playa se caracteriza por un estado morfodinámico intermedio donde se encuentra un sistema de barras transversales y canales de corrientes de retorno. En particular, la zona supramareal que no retrocede significativamente corresponde a una zona con una barra transversal persistente que actúa como protección de la línea de pleamar.

En resumen, se observa un crecimiento de la bajamar hacia el mar, 0,47 m al año en promedio y una erosión de la pleamar hacia el interior, 0,68 m al año en promedio. El balance neto es por tanto un retroceso hacia el interior de la línea de playa seca (0,68 m al año) y un aumento de la anchura media de la playa intermareal (1,15 m al año). Estos resultados son consistentes con los presentados en el informe del Observatorio en 2022, en el que se analizaba la serie para el periodo 2010-2020.

El análisis con la serie hasta 2020 indicaba una correlación positiva entre la erosión de la playa de Zarautz y los cambios en la altura de ola significativa registrada en la boya de Bilbao-Bizkaia. Las tendencias observadas en el oleaje y tormentas no pueden atribuirse directamente al cambio climático debido a la gran variabilidad y a los distintos procesos involucrados. Los cambios a largo plazo en tormentas y oleaje están relacionados con cambios en la circulación atmosférica, que pueden deberse a la variabilidad natural o una respuesta al cambio climático. La tendencia más significativa a largo plazo del oleaje extremo puede explicarse por la intensificación de los patrones de teleconexiones como el WEPA (West Europe Pressure Anomaly, Castelle et al., 2017). De hecho, en el análisis presentado en el Informe de 2022 se muestra una correlación entre el índice WEPA con la altura de ola significativa de invierno y con la superficie supramareal media de invierno. Esto indica que las tendencias observadas estarían asociadas al ligero incremento del oleaje y, en particular, a ciertos eventos extremos (p. ej. la secuencia de tormentas del invierno 2013-2014).

Hay que tener en cuenta también que la serie analizada es demasiado corta para representar tendencias a gran escala, aunque proporciona datos

hondartzen higadura-prozesua ordu eta egun arteko epeetan gerta daiteke, baina susperraldiak hila-bete, urte edo hamarkada asko har ditzake. Beraz, aztertutako seinalearen aldakortasuna izaera eta denbora-eskala desberdineko prozesuak teilakatzeari zor zaio, eta ezin zaio prozesu bakar bati egotzi.

2.4. Azidotzea (pH-a)

Ozeanoaren azidotzea CO₂-ren kontzentrazio atmosferikoa handitzearen ondorio zuzena da (Doney et al., 2009). Ozeanoak CO₂ isuri antropogeniko guztien laurden bat xurgatu du (McKinley et al., 2016; Gruber et al., 2019; Friedlingstein et al., 2022). Behin CO₂ itsasoko uretan disolbatzen denean, erreakzio kimiko batzuk gertatzen dira, hidrogeno ioiak handitzea eta karbonato-ioiak murriztea eragiten dutenak. Prozesu horrek karbonatoaren kimika aldatzen du basikotasun txikiagoko egoera baterantz, eta ozeanoaren azidotzea esaten zaiona gertatzen da. Prozesu hau independentea da klima-aldaketaren beste efektu batzuekiko (Pelejero et al., 2010).

2000. urtera arte, litekeena da ozeanoaren azidotzeak azalean 0,1 pH-unitate jaistea ekartzea (8,2 pH-unitatetik 8,1 pH-unitatera), edo industriaurreko baldintzekin alderatuta % 30 azidoagoa izatea (IPCC, 2021). 1985–2021 aldian, pH-a urtean $0,0017 \pm 0,00004$ unitateko tasan jaitsi da eskala globalean (Copernicus Marine Service Information, 2023). Horrela, 2020rako, ozeanoaren azalera industriaurreko garaiakoa baino % 40 azidoagoa zen batez beste.

Ozeanoaren azidotzeak hainbat modutan eragin dezake itsas espezieetan, barne-fisiologian zuzeneko inpaktuak barne, edo zeharka kate trofikoetako aldaketan bidez (Fundlay & Turley, 2021). Ozeanoaren azidotzeak inpaktu positiboa, neutroa edo negatiboa izan dezake (Kroeker et al., 2013). Itsasoko ornogabeen eta arrain-espezie batzuen kasuan, azidotzearen aurreko erantzun zuzena neutroa edo negatiboa da normalean (Kroeker et al., 2013). Zuzeneko inpaktu fisiologikoaz gain, beren eskeletoak edo egiturak CaCO₃ duten mineraletatik abiatuta eraikitzen dituzten espezieen kasuan (hala nola gure kostaldean molusku bibalbioak –muskuilua, ostra, txirla, berberetxoak– edo plankton-talde garantzitsu batzuk), azidotzearen arriskua handiagoa

relevantes sobre la variabilidad natural de la playa. Además, mientras que el proceso de erosión de las playas puede ocurrir en plazos que van desde horas a días, la recuperación puede tardar meses, años o décadas. Por lo tanto, la variabilidad de la señal analizada se debe a la superposición de procesos de diferente naturaleza y escala de tiempo y no es atribuible a un único proceso.

2.4. Acidificación (pH)

La acidificación del océano es debido al efecto directo del aumento de la concentración atmosférica de CO₂ (Doney et al., 2009). El océano ha absorbido una cuarta parte de todas las emisiones antropogénicas de CO₂ (McKinley et al., 2016; Gruber et al., 2019; Friedlingstein et al., 2022). Una vez el CO₂ se disuelve en el agua de mar, tienen lugar una serie de reacciones químicas que dan lugar al aumento de iones de hidrógeno y una disminución de iones de carbonato. Este proceso ha cambiado la química del carbonato hacia un estado menos básico, denominado acidificación del océano. Este proceso es independiente de otros efectos del cambio climático (Pelejero et al., 2010).

Hasta el año 2000, es probable que la acidificación del océano provocara un descenso en la superficie de 0,1 unidades de pH (de 8,2 a 8,1 unidades de pH), o que fueran un 30% más ácido respecto a las condiciones preindustriales (IPCC, 2021). Para el periodo 1985–2021, el pH ha descendido a una tasa de $0,0017 \pm 0,00004$ unidades por año a escala global (Copernicus Marine Service Information, 2023). Así, para el año 2020 la superficie del océano era de media un 40% más ácido que en la época preindustrial.

La acidificación oceánica puede influir en las especies marinas de distintas maneras, incluyendo impactos directos en la fisiología interna o indirectamente a través de cambios en las cadenas tróficas (Fundlay & Turley, 2021). La acidificación oceánica puede tener un impacto positivo, neutro o negativo (Kroeker et al., 2013). En el caso de los invertebrados marinos y algunas especies de peces, la respuesta directa a la acidificación es generalmente neutra o negativa (Kroeker et al., 2013). Además del impacto fisiológico directo, las especies que construyen sus esqueletos o estructuras a partir de minerales



da egitura horiek CaCO_3 maila baxuagoak dituzten uren eraginpean badaude. Era berean, aldaketa garrantzitsuak gerta daitezke komunitateen egituran (Sunday et al., 2017).

Ozeanoaren azidotzearen magnitudea ebaluatzeko funtsezko aldagaia pH-a da. Orain arte, neurketa puntualak egin arren, Gipuzkoako kostaldean ez zegoen pH-aren neurketa erregularrekin denbora-serieak emango zituen pH-a monitorizatzeko sistemarik. Azidotzearen bilakaera monitorizatu ahal izateko, 2021ean pH-sentsore bat eskuratu zen, eta ekipoa martxan jartzeko eta probak egiteko lanak egin dira. Joerak aztertzeak aukera ematen duen serie luzerik oraindik ez badago ere, neurketek aukera eman dute kostaldeko uretako pH-aren eguneko bilakaera karakterizatzeko. Kostaldeko pH-aren eguneko bilakaeraren analisia osatzeko, EAeko tarteko uren eta kostaldeko uren egoera ekologikoaren jarraipen-sarearen (URA) itsasertzeko, estuarioetako eta kostaldeko estazioetan neurtutako pH-serie historikoen bilakaeraren analisia egin da.

pH-aren eguneko aldakortasuna euskal kostaldean

Ozeano irekian, pH-ak ez du gorabehera handirik izan denboraren eta espazioaren aldetik. Kostaldean, berriz, pH-a aldakortasun handia izaten ari da, jarduera biologikoari eta ibaien eraginari lotuta, besteak beste. Horregatik, SAMI sentsoreak erregistratutako pH-aren eguneko zikloa ulertzea izan da lehenengo urratsa. Horretarako, bi hilabete ingururi (2022ko ekainaren 22tik abuztuaren 31ra arteko tarteari) dagozkion datuak aztertu dira; aldi horretan pH-sentsorea kostaldetik 3 km-ra ainguratuta egon zen, 20 m inguruko sakoneran 50 m-ko hondoen gainean.

pH-aren 0,003 unitateko aldakuntza duen eguneko ziklo bat ikusten da: pHa gauetz jaitxi egiten da, eta goizeko 10ak inguruan igotzen hasten da, hau da, argirik ez dagoen orduetan behera egiten du (19:00etatik hurrengo eguneko 9:00etara), eta eguzki-argiko orduetan, aldiz, gora egiten du

de CaCO_3 , como pueden ser en nuestras costas los moluscos bivalvos (mejillón, ostra, almeja, berberecho) o varios grupos importantes de plancton, el riesgo de la acidificación es mayor si estas estructuras se exponen a aguas que contienen niveles más bajos de CaCO_3 . También se pueden producir cambios significativos en la estructura de las comunidades (Sunday et al., 2017).

El pH es la variable clave para evaluar la magnitud de la acidificación del océano. Hasta el momento, a pesar de contar con medidas puntuales, no se disponía de un sistema de monitorización de esta variable en la costa guipuzcoana que proporcionara series temporales con medidas regulares de pH. Para poder monitorizar la evolución de la acidificación, se adquirió en el año 2021 un sensor de pH y se ha trabajado en la puesta en marcha y pruebas del equipo. A pesar de que todavía no se dispone de una serie larga que permita el análisis de tendencias, las medidas han permitido caracterizar la evolución diaria del pH en las aguas costeras. El análisis de la evolución diaria del pH en la costa se ha completado con el análisis de la evolución de las series históricas de pH medidas en las estaciones litorales, estuáricas y costeras de la Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la CAPV (URA).

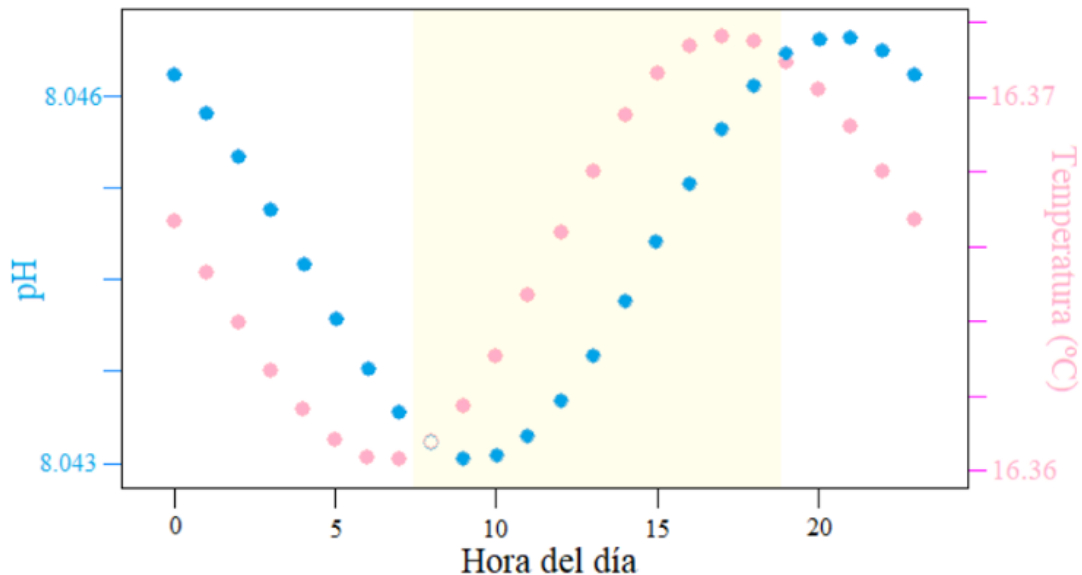
Variabilidad diaria del pH en la costa vasca

En el océano abierto el pH no presenta grandes fluctuaciones ni temporales ni espaciales. En la zona costera, en cambio, el pH presenta gran variabilidad, asociado a la actividad biológica y a la influencia de ríos, entre otros. Por ello, el primer paso ha sido comprender el ciclo diario del pH registrado por el sensor SAMI. Para ello, se analizan los datos de aproximadamente dos meses (22 junio - 31 agosto 2022) en los que el sensor de pH estuvo fondeado a una distancia de 3 km de la costa y a una profundidad aproximada de 20 m sobre fondos de 50 m.

Se observa un ciclo diario en el que el pH varía 0,003 unidades a lo largo del día, disminuye durante la noche y comienza a aumentar alrededor de las 10 de la mañana, esto es, disminuye en las horas en las que no había luz (de 19:00 a 9:00 del día siguiente) y aumenta durante las horas de luz (de 10:00 a 19:00). Distintos factores podrían explicar

(10:00etatik 19:00etara). Zenbait faktorek azal dezakete eguneko aldaketa hori. Kasu honetan, tenperaturaren eguneko zikloaren eragina aztertu da. Bi aldagaien arteko korrelazio zuzena ikusten da, eta bi zikloak gainjartzean ikusten da pH-aren eguneko zikloa eskuinerantz desplazatuta dagoela tenperaturaren zikloarekiko. Beraz, neurri batean behintzat tenperaturak azal lezake pH-aren eguneko zikloa. Naturan itsas ingurunearen tenperaturan eragina izan dezaketen hainbat faktore daude, hala nola ur-masen nahasketa edo eguzki-argiko orduetan geruza fotikoa berotzea (Herring et al., 1990). Beste faktore batzuek ere eragin diezaiokete pH-aren eguneko aldakortasunari; adibidez, ekoizpen primarioak, eguzki-argiko ordu-kopuruaren eta tenperaturaren mendekoa denak. Argi-orduetan fotosintesia egiten da: prozesu horretan, CO₂-a xurgatu egiten da eta ingurunera oxigenoa askatzen da; horren ondorioz, itsas inguruneko pH-ak gora egiten du. Gauetz, aldiz, arnasketa egiten da: prozesu horretan, CO₂-a itsas ingurunera askatzen da, eta, horren ondorioz, gauetz pH-ak behera egiten du (Hurd et al., 2011).

esta variación diaria. En este caso, se ha analizado la influencia del ciclo diario de la temperatura. Se observa una correlación directa entre ambas variables y al superponer ambos ciclos se observa que el ciclo diario del pH se encuentra desplazado hacia la derecha del ciclo de la temperatura. Por tanto, la temperatura podría explicar, por lo menos en parte, el ciclo diario del pH. En la naturaleza existen diferentes factores que pueden afectar a la temperatura del medio marino, como puede ser la mezcla de masas de agua o el calentamiento de la capa fótica durante las horas de luz (Herring et al., 1990). Otros factores como la producción primaria, dependiente de las horas de luz como la temperatura, pueden afectar también a la variabilidad diaria del pH. Durante las horas de luz, se lleva a cabo la fotosíntesis, proceso en el que se absorbe CO₂ y libera oxígeno al medio provocando que el pH del medio marino aumente. En contra, durante la noche se lleva a cabo el proceso de respiración, liberando al medio marino CO₂ y produciendo así un descenso del pH durante la noche (Hurd et al., 2011).



4. ir. pH-aren eguneko zikloaren aldakuntza, SAMI sentsorearekin erregistratutako eguneko tenperaturaren aldaketarekin batera. Tarte laranja eguzki-argiko orduak erakusten dira.

4. Fig. Variación del ciclo diario del pH junto con la variación del ciclo diario de la temperatura registrados con el sensor SAMI. En el intervalo naranja se muestran las horas de luz del día.



Itsasertzeko estazioetako pH-neurketak

EAEko tarteko uren eta kostaldeko uren egoe-
ra ekologikoaren jarraipen-sareak oxigeno disolba-
tuak, mantenugaiek eta klorofilaren kontzentrazioak
ur-zutabeen duten bilakaeraren jarraipena egiten
du. Hamabi laginketa-estazio hautatu dira kostal-
deko uretan 35 m-ko hondoen gainean Nerbioi
estuarioan, eta bi estazio itsasertzeko plataforman,
110 m-ko hondoen gainean. Kostaldeko estazio
gehienetan 1995ean abiatu ziren laginketak, eta
2003an gehitu ziren berrienak. Sakonera handiene-
ko estazioen artetik, 1986an abiatu ziren laginketak
L-RF10 (D2) estazioan, eta 2006an bestean. Estazio
horietan kalitate-aldagai fisiko-kimikoen laginketak
(gardentasuna, tenperatura, oxigeno disolbatua,
gazitasuna, mantenugaia, pHa, klorofila, etab.) hiru
hilean behin egiten dira.

Plataforma kontinentalaren gainean, ur sakone-
tan, kokatutako bi estazioek pH-aren beherakada
erakusten dute denboran zehar. Jaitsiera-tasa 0,1
pH-unitate ingurukoa da, hamarkada bakoitzeko,
estazio bakoitzean. Aldiz, aztertutako kostaldeko eta
estuarioko uretan pH-ak denbora-serie osoan zehar
gora egin duela ikusten da. Joera positibo horiek
bat datoz Gipuzkoako ibaietan ur-kalitatea kontro-
latzeko estazioetan behatutako pH-aren joeraren
zeinuarekin (OHZN-GFA).

Medidas de pH en estaciones litorales

La Red de seguimiento del estado ecológico de
las aguas de transición y costeras de la CAPV rea-
liza el seguimiento del oxígeno disuelto, nutrientes
y concentración de clorofila en la columna de agua.
Se han seleccionado doce estaciones de muestreo
en aguas costeras sobre fondos de 35 m en el es-
tuario del Nervión y dos estaciones en la platafor-
ma litoral sobre fondos de 110 m. La mayoría de es-
taciones costeras comenzaron a muestrearse en 1995,
con las más recientes incorporadas en 2003. De las
estaciones sobre mayor profundidad L-RF10 (D2)
comenzó a muestrearse en 1986 y la otra en 2006.
Las variables de calidad fisicoquímicas (transpa-
rencia, temperatura, oxígeno disuelto, salinidad,
nutrientes, pH, clorofila, etc.) se muestrean en estas
estaciones con una periodicidad trimestral.

Las dos estaciones ubicadas sobre la platafor-
ma continental, en aguas profundas, muestran un
descenso del pH a lo largo del periodo de tiempo.
La tasa de descenso es aproximadamente de 0,1
unidades de pH por década en cada una de las es-
taciones. En cambio, en aguas costeras y estuarinas
analizadas se observa un aumento del pH a lo largo
de toda la serie temporal. Estas tendencias positi-
vas son consistentes con el signo de la tendencia
del pH observada en las estaciones de control de
calidad del agua más próximas a la desembocadura
en los ríos guipuzcoanos (DGOH-DFG).

Estazioa Estación	Kokapena Localización	p balioa p-valor	pH tasa Tasa de pH
L-RF20	Debako itsasertza Litoral Deba	$5,18 \times 10^{-10}$	0,1237 unitateko beherakada hamarkada bakoitzeko Descenso de 0,1237 unidades por década
L-RF10	Oiartzungo itsasertza Litoral Oiartzun	$1,09 \times 10^{-8}$	0,1106 unitateko beherakada hamarkada bakoitzeko Descenso de 0,1106 unidades por década

1. taula. pH-aren denboran zeharreko aldaketa-tasak itsasertzeko estazio sakonertarako, ereduaren estazio bakoitzerako p-balioarekin batera.

1. Tabla. Tasas de cambio temporal de pH para las estaciones litorales profundas junto con el p-valor del modelo para cada estación.



Kostaldeko sistemetan pH-aldaketak detektatzea eta esleitzea ozeano irekian baino zailagoa da, karbonoaren kimikaren espazioan eta denboran zeharreko aldakortasun handiagoaren ondorioz (Duarte et al., 2013; Laruelle et al., 2017; Torres et al., 2021), eta beste natura-faktore batzuen eraginagatik, hala nola ibai-ekarpenengatik (Cai et al., 2011; Laurent et al., 2017; Fennel et al., 2019; Cai et al., 2020). Kasu zehatz honetan, estuarioko eta kostaldeko estazioetan behatutako pH-aren igoera saneamendu-prozesuak hobetzeari eta uraren ingurumen-kalitatea hobetzeari esker gertatu dela esan daiteke.

Itsasertzeko estazio sakonen kasuan, oso antzeko jaitsiera ikusi da guztietan, 0,2 pH-unitate ingurukoa 2002. eta 2021. urteen artean, hau da, 0,12 pH-unitateko jaitsiera-tasa, batez beste, hamarkada bakoitzeko. Nabarmendu behar da tasa horiek kalkulatzeko nolabaiteko ziurgabetasuna dagoela; izan ere, hartutako neurketen zehaztasuna $\pm 0,1$ pH-unitatekoa da, eta, gainera, kontuan hartu behar da ez dela kostaldeak duen efektua zuzendu datuetan (ondorioz, besteak beste, datuek ziurgabetasun-maila handia dute, eta, beraz, kalkulatu-tako eta jakinarazitako datuen konfiantza-maila oso txikia da). pH-aren jaitsiera-tasak zertxobait handiagoak dira eskala globalean behatutakoak baino ($-0,02$ unitate hamarkada bakoitzeko), baita ozeano Atlantikoan ($-0,013$ unitate hamarkada bakoitzeko) eta Bizkaiko Golkoko mendebaldeko kostaldean behatutakoak baino ($-0,016$ unitate hamarkada bakoitzeko). Emaitza horrek adierazten du Gipuzkoako kostaldean behatutako azidotze-prozesua ozeano globalaren azidotze-prozesuari lotuta egon daitekeela; edonola ere, beharrezkoa da ur-zutabeen zeharreko pH-aren aldakuntzari buruzko ikerketa- eta analisi-lanak egiten jarraitzea.

La detección y atribución de los cambios de pH en sistemas costeros es más difícil que en el océano abierto debido a la mayor variabilidad espacio-temporal de la química del carbono (Duarte et al., 2013; Laruelle et al., 2017; Torres et al., 2021), y debido a la influencia de otros factores naturales, como los aportes fluviales (Cai et al., 2011; Laurent et al., 2017; Fennel et al., 2019; Cai et al., 2020). En este caso concreto, el aumento del pH observado en las estaciones estuáricas y costeras podría atribuirse a la mejora de los procesos de saneamiento y mejora de la calidad ambiental del agua.

En el caso de las estaciones litorales profundas, en todas ellas se ha determinado un descenso muy similar, aproximadamente 0,2 unidades de pH desde 2002 hasta 2021, equivalentes a una tasa promedio de descenso de 0,12 unidades de pH por década. Cabe destacar la existencia de cierta incertidumbre en el cálculo de dichas tasas, ya que la exactitud de las medidas realizadas es de $\pm 0,1$ unidades de pH y, además, hay que tener en cuenta que no se ha corregido el efecto costero a los datos, que entre otras cosas hace que los datos tengan un alto grado de incertidumbre y por tanto hacen que el nivel de confianza de los datos calculados y reportados sea muy bajo. Las tasas de descenso del pH son ligeramente superiores a las observadas a escala global ($-0,02$ unidades por década), en el océano Atlántico ($-0,013$ unidades por década) y en la costa occidental del golfo de Bizkaia ($-0,016$ unidades por década). Este resultado indica que el proceso de acidificación observado en nuestra costa podría estar asociado al proceso de acidificación oceánica global, si bien es necesario ahondar en el análisis de la variación del pH a lo largo de la columna de agua.



3. IPCCren klima-agertokiak

Klima-agertokiak erabiltzen dira klimaren XXI. mendeko bilakaera eredu klimatikoetan proiektatzeko. Lurreko klimaren etorkizuna zein izan daitekeen zehaztu ahal izateko, beharrezkoa da behartze antropogeniko desberdinen etorkizuneko bilakaera desberdin posibleak ezagutzea. Horretarako, agertoki horiek erabiltzen dira etorkizuna nola gara daitekeen deskribatzeko, eta oinarritzen dira funtsezko faktore sozioekonomikoei (demografia, ekonomia, aldaketa teknologikoa, gobernantza eta bizi-estiloak barnean hartzen dituztenei) eta behartze horien guztien arteko harremani buruzko hipotesi-multzoko koherente batean (O'Neill et al., 2014; IPCC, 2021). Agertokiak, halaber, defini daitezke behartze geografikoen bilakaeraren arabera soilik, hala nola berotegi-efektuko gasen kontzentrazioaren, aerosolen edo lurzuaren erabileren bilakaeraren arabera. Klima-agertokiak ez dira iragarpenak; etorkizuneko agertokiaren alternatiba posibleak deskribatzen dituzte munduko biztanleriaren bilakaerari, bilakaera sozioekonomikoari eta berotegi-efektuko gasen isuriaren bilakaerari buruzko hipotesi desberdinetan oinarrituta.

3.1. Klima-agertokiak eguneratzea: RCP, SSP eta SSP-RCP

Kontzentrazio-ibilbide adierazgarriak (RCP ingelesezko siglak, Representative Concentration Pathway) IPCCren 5. txostenean garatu ziren klima-agertokiaren multzo bat dira (IPCC-AR5, 2013). 7 ibilbide taldekatzen dituzte etorkizuneko berotegi-efektuko gasen isurietarako eta atmosferako kontzentrazioetarako, airearen kutsatzaileen isurietarako eta lurzuaren erabilerarako. Agertoki horiek ez dute barnean hartzen erradiazio bidezko behartze horiek eragiten dituzten agertoki sozioekonomikoen narratibarik. Definitutako RCPak hauek

3. Escenarios climáticos del IPCC

Los escenarios climáticos se utilizan para proyectar la evolución del clima durante el siglo XXI en los modelos climáticos. Para poder determinar cuál puede ser el futuro del clima de la tierra es necesario conocer la evolución futura de los distintos forzamientos antropogénicos. Para ello se utilizan estos escenarios entendidos como una descripción de cómo puede desarrollarse el futuro, sobre la base de un conjunto coherente de supuestos sobre los factores socioeconómicos clave, incluidos la demografía, economía, el cambio tecnológico, la gobernanza, los estilos de vida y las relaciones entre todos estos forzamientos (O'Neill et al., 2014; IPCC, 2021). Los escenarios también pueden definirse únicamente por la evolución de los forzamientos geofísicos, como la concentración de gases de efecto invernadero, aerosoles o usos del suelo. Los escenarios climático no son predicciones, describen posibles alternativas de escenarios futuros en base a diferentes asunciones en la evolución de la población mundial, socioeconómica y de emisiones de gases de efecto invernadero.

3.1. Actualización de escenarios climáticos: RCP, SSP y SSP-RCP

Las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés, Representative Concentration Pathway) son un conjunto de escenarios climáticos que se desarrollaron bajo el 5º informe del IPCC (IPCC-AR5, 2013). Agrupan 7 trayectorias para las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y concentraciones atmosféricas, emisiones de contaminantes atmosféricos y uso del suelo. Estos escenarios no incluyen narrativas de los escenarios socioeconómicos que dan lugar a dichos forzamientos radiativos. Los RCP definidos fueron:

izan ziren: RCP1.9, RCP2.6, RCP3.4, RCP4.5, RC 6.0, RCP7.0 eta RCP8.5. RCP akronimoari jarraitzen dion zenbakiak adierazten du 2100. urteko erradiazio bidezko behartzea (hau da, 1,9; 2,6; 3,4; 4,5; 6,0; 7,0 eta 8,5 W m⁻², hurrenez hurren), industriaurreko garaiari dagokiona. Horrela, RCP2.6 BEGen isuri-maila baxuenari dagokion agertokia da, eta RCP8.5, aldiz, isuri-maila altuenari dagokiona. Industriaurreko mailekiko gaur egungo erradiazio bidezko behartzea 2,5 W m⁻² ingurukoa da, RCP2.6tik oso gertukoa.

IPCCren 6. txostenaren testuinguruan (IPCC-AR6, 2021) ezarri dira Ibilbide Sozioekonomiko Partekatutak (SSP, ingelesezko siglak, Shared Socioeconomic Pathways), berotegi-efektuko gasen isuriaren agertokiak klima-politika desberdinen arabera bideratzeko erabiliak. SSPak garapen sozioekonomikoaren etorkizun alternatiboak deskribatzen dituzten narratibak dira, munduak datozen hamarkadetan hainbat alderditan nola eboluziona dezakeen erakusten dutenak (hazkunde ekonomikoa, etorkizuneko desberdinkeria-mailak, aldaketa demografikoa, hezkuntza eta garapen teknologikoaren maila), baita aldaketa horiek arintzearen eta egokitzearen ikuspegitik zer erronka ekarriko lituzketen ere. SSP bakoitzari dagozkion narratibak eta behartzeak erabili ziren energiaren, airearen kutsaduraren kontrolaren, lurzorua erabileren eta berotegi-efektuko gasen isuriaren bilakaeraren agertokiak garatzeko. Agertoki horiek etorkizuneko klima gertagarrien gama bat deskribatzen dute, karbono-maila altuak dituen agertoki ezkor batetik hasi eta Parisko Akordioaren helburuak betetzea lortzen duen isuri gutxi agertokiraino. Bost etorkizun sozioekonomiko alternatiboek barnean hartzen dituzte garapen jasagarria (SSP1), tarteko garapena (SSP2), eskualdeen arteko norgehiagoka (SSP3), desberdinkeria (SSP4) eta erregai fosilen bidezko garapena (SSP5):

- **SSP1 ('Jasangarritasuna')**: biztanleriaren hazkunde txikia, hazkunde ekonomiko handia, hezkuntza-maila handiak, gobernagarritasuna, gizarte globalizatua, nazioarteko lankidetzeta, garapen teknologikoa eta ingurumen-kontzientzia oinarri dituen agertokia. Kasu horietan, agertoki horrek arintze- eta egokitzapen-erronka txikiak ditu.
- **SSP2 ('Erdibidea')**: SSP1 eta SSP3 kasuen arteko tarteko agertokia.

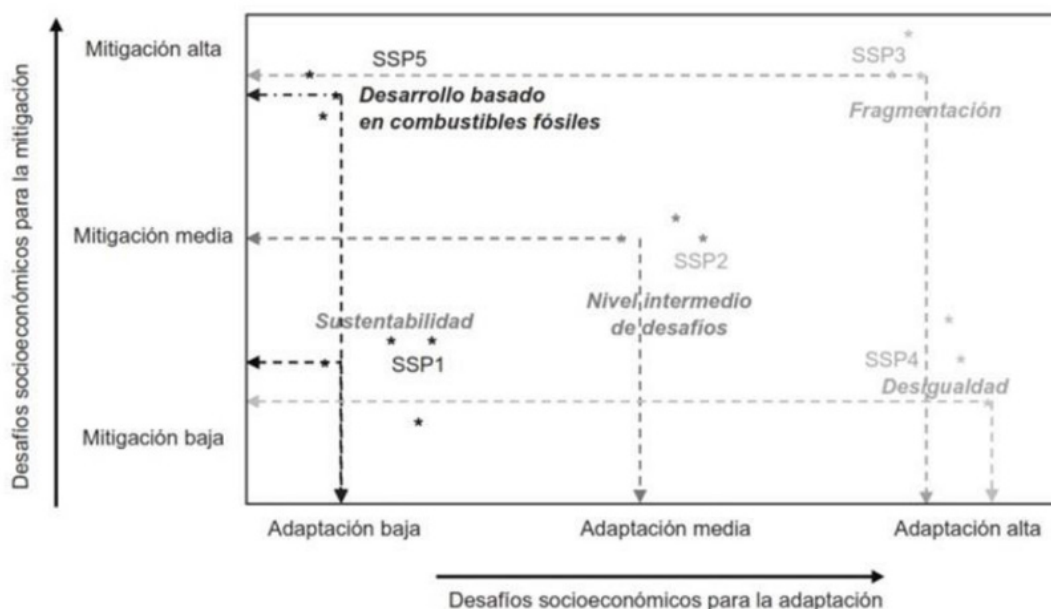
RCP1.9, RCP2.6, RCP3.4, RCP4.5, RC 6.0, RCP7.0 y RCP8.5. El número que sigue al acrónimo RCP indica el forzamiento radiativo en el año 2100 (es decir, 1,9; 2,6; 3,4; 4,5; 6,0; 7,0 y 8,5 W m⁻², respectivamente), relativo a la época preindustrial. Así, RCP2.6 corresponde al escenario más bajo de emisiones, mientras que RCP8.5 es considerado como el de mayor tasa de emisiones de GEI. El actual forzamiento radiativo en relación a los niveles preindustriales es de unos 2,5 W m⁻², muy cercano al RCP2.6.

En el contexto del 6º informe del IPCC (IPCC-AR6, 2021) se han establecido las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés, Shared Socioeconomic Pathways) usados para derivar escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero según diferentes políticas climáticas. Los SSP son narrativas que describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico que muestran cómo podría evolucionar el mundo en las siguientes décadas en diferentes aspectos (crecimiento económico, niveles de desigualdad futuros, el cambio demográfico, educación y nivel de desarrollo tecnológico), y qué desafíos suponen esos cambios para la mitigación y la adaptación. Las narrativas y forzamientos de cada SSP se utilizaron para desarrollar escenarios de energía, control de contaminación atmosférica, uso del suelo y evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos escenarios describen una gama de futuros climas plausibles, desde un escenario pesimista con niveles elevados de carbono, hasta un escenario de bajas emisiones en el que se logra cumplir las metas del Acuerdo de París. Los cinco futuros socioeconómicos alternativos comprenden el desarrollo sostenible (SSP1), un desarrollo intermedio (SSP2), la rivalidad regional (SSP3), la desigualdad (SSP4) y el desarrollo con combustibles fósiles (SSP5):

- **SSP1 ('Sostenibilidad')**: escenario basado en un bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, gobernabilidad, una sociedad globalizada, cooperación internacional, desarrollo tecnológico y conciencia ambiental. Bajo estos supuestos, este escenario presenta bajos desafíos de mitigación y adaptación.
- **SSP2 ('Mitad de camino')**: escenario intermedio entre los supuestos SSP1 y SSP3.



- **SSP3 ('Zatiketa/Eskualdeen arteko lehia')**: biztanleriaren hazkunde handia, garapen ekonomiko txikia, hezkuntza-maila txikia eta ingurumen-kontzientzia maila txikiko eskualdeko gizartea oinarri dituen agertokia; beraz, erronka-maila handia adierazten du arintzeari eta egokitzeari dagokienez.
- **SSP4 ('Desberdinkeria')**: agertoki honetan, teknologiak aurrera egiten du herrialde garatuetan, baina ez dute biztanle guztiek lortzen horretaz gozatzea, eta horrek erronka handia dakar egokitzapenerako.
- **SSP5 ('Erregai fosiletan oinarritutako garapena')**: agertoki horrek onartzen du oraindik oso mendekotasun handia dagoela erregai fosilekiko, eta biztanleriaren hazkundera txikia dela eta hazkunde ekonomikoa eta giza garapena, berriz, handiak; beraz, erronka handia litzateke arintzeari dagokionez.
- **SSP3 ('Fragmentación / Rivalidad regional')**: escenario basado en un alto crecimiento de la población y bajo desarrollo económico, niveles inferiores de educación, y una sociedad regionalizada con poca conciencia ambiental, por lo que representa un nivel alto de desafío para la mitigación y adaptación.
- **SSP4 ('Desigualdad')**: bajo este escenario, la tecnología avanza en los países desarrollados, pero no toda la población logra beneficiarse de ello, lo cual representa un nivel alto de desafío para la adaptación.
- **SSP5 ('Desarrollo basado en combustibles fósiles')**: este escenario asume que aún se tiene muy alta dependencia de los combustibles fósiles, y se tendría un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano, por lo que representa un elevado nivel de desafío para la mitigación.



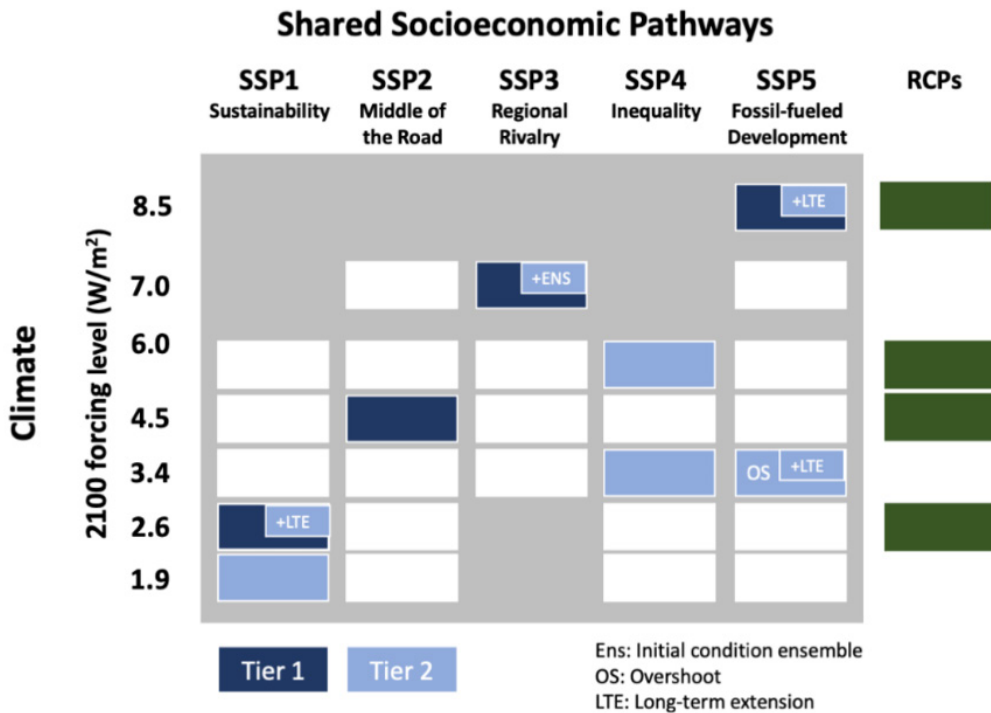
5. ird. SSP agertokiak klima-aldaketa arintzeko erronken (berotegi-efektuko gasen isuriak murriztea eta bahitzea) eta klima-aldaketara egokitzeko erronken arabera. Iturria: Escoto et al. (2021).

5. Fig. Escenarios SSP en función de los retos de mitigación (reducción y secuestro de emisiones de gases de efecto invernadero) y adaptación al cambio climático. Fuente: Escoto et al. (2021).



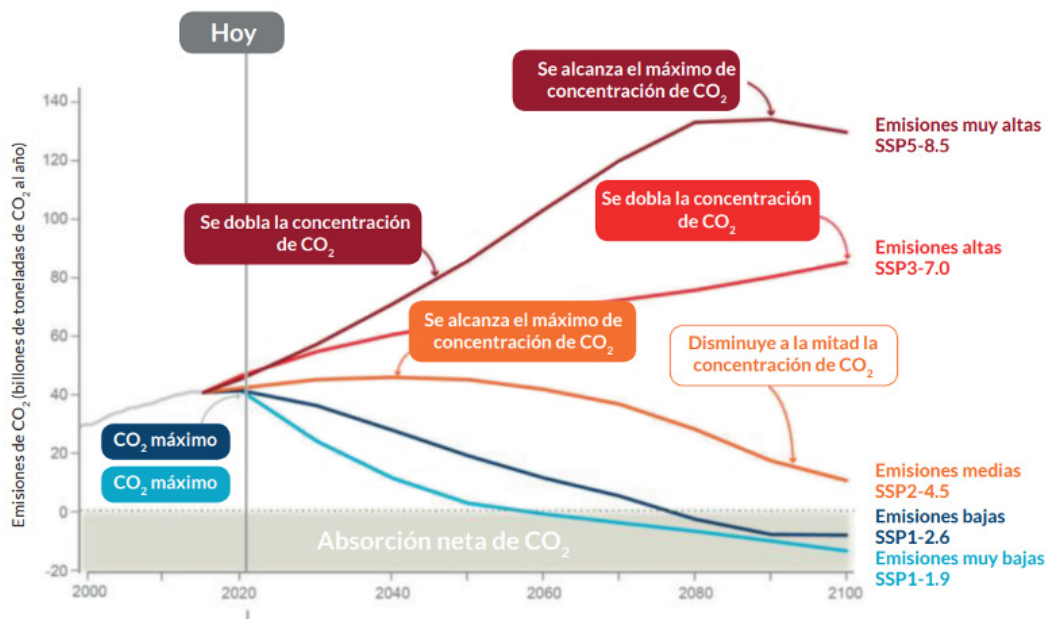
SSPak RCPen osagarri gisa garatu dira, XXI. mendean zehar garapen sozioekonomikoko bide desberdinei lotutako isurien ibilbideari buruzko informazioa emanez, RCPek isuri-maila desberdinen eta lotutako klima-aldaketaren berri ematen duten bitartean. Horrela, bi agertoki-mota horiek batera erabil daitezke, eta, espezifikoki bat ez badatoz ere, konbinazio batzuk beste batzuk baino gertagarriagoak dira. Horrela, SSPak erradiazio bidezko behar-tzeekin konbinatzen dira SSP-RCP agertoki berrien multzo zabal bat lortzeko; agertoki horiek kontuan hartzen dituzte batetik BEG isurien ondoriozko erradiazio bidezko behartzea, eta, bestetik, mundu osoko biztanleriak XXI. mendean zehar arintze- eta egokitze-neurriekin hari aurre egiteko izan dezakeen gaitasuna. AR6n (IPCC, 2021) aztertutako agertoki integratu nagusiak SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 eta SSP5-8.5 izan dira; horietan, lehenengo zenbakia SSP agertokiari dagokio, eta bigarrena, aldiz, RCP agertokiari. SSP bakoitzak adierazten du nola lortu ahal izango diren RCP desberdinak ezaguri sozioekonomikoen eta klima-politiken testuinguruan. Agertoki berri horiek klima-aldaketaren inpaktua ebaluatzeko erabilitakoak dira.

Los SSP se han desarrollado como complemento de los RCP, proporcionando información de la trayectoria de emisiones a lo largo del siglo XXI asociadas a distintas vías de desarrollo socioeconómico, mientras que los RCP informan de los diferentes niveles de emisiones y del cambio climático asociado. Así, ambos tipos de escenarios se pueden utilizar conjuntamente y, aunque no coinciden específicamente, algunas combinaciones son más probables que otras. Así, los SSP se combinan con los forzamientos radiativos para derivar un conjunto amplio de nuevos escenarios SSP-RCP que tienen en cuenta tanto el forzamiento radiativo derivado de las emisiones de GEI como la capacidad de la población mundial de hacer frente a ello con medidas de mitigación y adaptación a lo largo del siglo XXI. Los principales escenarios integrados analizados en el AR6 (IPCC, 2021) han sido SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5, donde el primer número corresponde al escenario SSP y el segundo al RCP. Cada SSP indica cómo se podrán lograr los diferentes RCPs en el contexto de las características socioeconómicas y las políticas climáticas. Estos nuevos escenarios son los utilizados para la evaluación del impacto del cambio climático.



6. ird. SSP eta RCP agertokiak konbinazioak eta horietatik sortzen diren agertoki berriak. Iturria: Tebaldi et al. (2021).

6. Fig. Combinación de los escenarios SSP y los RCP para derivar los nuevos escenarios. Fuente: Tebaldi et al. (2021).



7. ird. IPCCren 6. txostenak planteatutako etorkizuneko BEG isuriari ibilbideak. Iturria: IPCC (2021).

7. Fig. Trayectorias de emisiones de GEI futuras planteadas por el 6º Informe del IPCC. Fuente: IPCC (2021).

SSP-RCP agertoki berriak:

- **SSP1-2.6:** etorkizuneko behartze-ibilbideen tartearen beheko muturra irudikatzen du. 2100. urterako 2°C baino esanguratsuki txikiagoa den eredu anitzeko batezbestekoa izatea aurreikusten da, eta, beraz, Parisko Akordioaren analisei babesa eman diezaike. SSP1 hautatu zen lurzorua erabileran funtsezko aldaketa dakarrelako, eta LUMIPeko (Lurzorua erabileraren ereduak aldatzeko proiektua, ingelesezko siglen arabera) adituek aukeratu zuten galdera zientifikoei heltzen laguntzeko.
- **SSP2-4.5:** etorkizuneko behartze-ibilbideen tartearen erdiko partea adierazten du. Erreferentziako esperimendu gisa erabiltzen da lurzorua eta aerosolak erabiltzeko bere bideak ez direlako muturrekoak beste SSP batzuekin alderatuta, eta garrantzitsua delako tarteko kalteberatasun soziala eta tarteko behartze-maila konbinatzen dituen agertoki gisa.
- **SSP3-7.0:** etorkizuneko behartze-ibilbideen tartearen erdiko-goiko muturra irudikatzen du. Erreferentziako agertokiak dira 'saihestutako inpaktuak' kuantifikatzeko, eta aukera ematen

Los nuevos escenarios SSP-RCP:

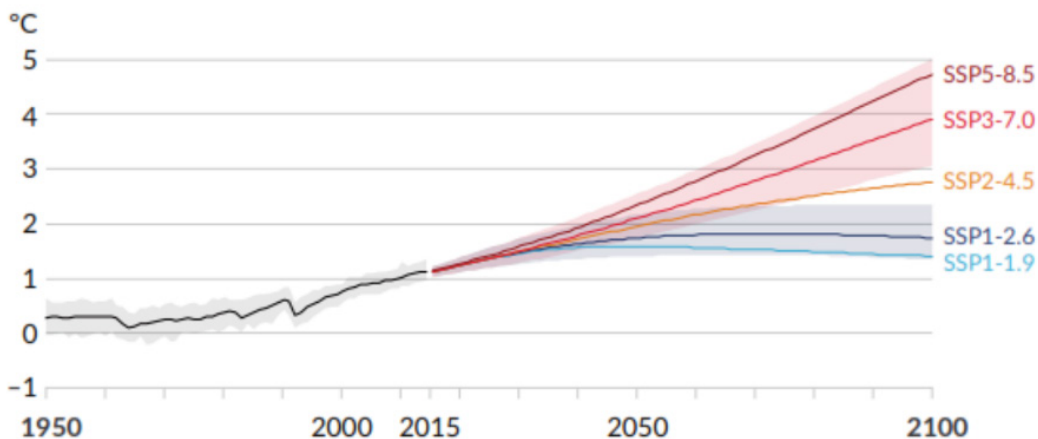
- **SSP1-2.6:** representa el extremo inferior del rango de las trayectorias de forzamiento futuras. Se prevé que produzca una media multi-modelo significativamente inferior a 2°C para 2100, por lo que puede apoyar los análisis del Acuerdo de París. El SSP1 se eligió porque tiene un cambio sustancial en el uso de la tierra y será utilizado por los expertos del LUMIP (Proyecto de comparación de modelos de uso de la tierra, por sus siglas en inglés) para ayudar a abordar preguntas científicas.
- **SSP2-4.5:** representa la parte media del rango de las trayectorias de forzamiento futuras. Se utiliza como experimento de referencia porque sus vías de uso de la tierra y de aerosoles no son extremas en relación con otras SSP y también porque es relevante como escenario que combina la vulnerabilidad social intermedia con un nivel del forzamiento intermedio.
- **SSP3-7.0:** representa el extremo medio-alto del rango de las trayectorias de forzamiento futuras. Son escenarios de referencia para cuantificar los 'impactos evitados', permitiendo comparar

dute arintze-agertoki bateko inpaktuak (SSP2-4.5) alderatzeko arintzerik gabeko oinarri-lerro bat duen agertoki batean gertatzen denarekin (SSP3-7.0). SSP3-7.0 kategoria hautatu zen lurzoruaren erabileran aldaketa nabarmenak eta isuri handiak dituen agertokia delako, eta, beraz, zeregin garrantzitsua izango duelako eskualdeko klimak lurzoruaren eta aerosolen erabileraren aurrean duen sentikortasunari buruzko gai garrantzitsuak jorrazteko garaian.

- **SSP4-6.0:** behartze-ibilbide ertainen tartea osatzen du. SSP4 hautatu zen munduko batez besteko behartze-ibilbideen inpaktuen desberdintasunak ikertzeko erabil litekeelako, baita lurzoruaren erabileraren eta aerosolen eskualdeko klima-efektuak indartsuak izanez gero ere.
- **SSP5-8.5:** etorkizuneko ibilbideen tartearen goiko muturra irudikatzen du. SSP5 ibilbidea aukeratu zen 2100ean $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ -ko erradiazio bidezko behartzea sortzeko behar adinako isuri altuak dituen bakarra delako.

los impactos en un escenario de mitigación (SSP2-4.5) con lo que ocurre en un escenario de línea de base no mitigado (SSP3-7.0). Se optó por la categoría SSP3-7.0 porque se trata de un escenario con cambios sustanciales en el uso de la tierra y altas emisiones y, por lo tanto, desempeñará un papel importante abordando cuestiones relevantes sobre la sensibilidad del clima regional al uso de la tierra y los aerosoles.

- **SSP4-6.0:** completa el rango de las trayectorias de forzamiento medias. Se eligió el SSP4 porque podría utilizarse para investigar las diferencias en los impactos en las trayectorias de forzamiento medias mundiales, incluso si los efectos climáticos regionales del uso de la tierra y los aerosoles resultan ser fuertes.
- **SSP5-8.5:** representa el extremo superior del rango de las trayectorias futuras. Se eligió la ruta SSP5 ya que es la única con emisiones lo suficientemente altas como para producir un forzamiento radiativo de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100.



8. ird. Gainazaleko tenperatura globalaren aldaketa AR6-IPCCren SSP-RCP agertoki desberdinetarako, 1850-1900 aldiari dagokionez. Iturria: IPCC (2021).

8. Fig. Cambio en la temperatura superficial global para los diferentes escenarios SSP-RCP del AR6-IPCC relativa al periodo 1850-1900. Fuente: IPCC (2021).

Nahiko erlazio lineala dago CO_2 isuriaren eta batez besteko tenperatura globalaren erantzunaren artean. Horrela, CO_2 isuri jarraituek berotze-maila handiagoak dakartzate, eta aldaketak eragiten dituzte klima-sistemaren osagai guztietan. Agertoki guztietan lurrazalaren batez besteko tenperatura

Existe una relación aproximadamente lineal entre las emisiones de CO_2 y la respuesta de la temperatura media global. Así, emisiones continuas de CO_2 implican mayores niveles de calentamiento y cambios en todos los componentes el sistema climático. En todos los escenarios se proyecta un



globala gutxienez XXI. mendearen erdialdera arte igotzea aurreikusten da. SSP1-1.9 agertokian, berotze globala Parisko Akordioak markatutako helburura mugatzen da, hau da, industriaurreko garaiarekiko 1,5 °C-ko igoerara. Isuri oso altuak dituen agertokian (SSP5-8.5) proiektatutako berotzea 4,4 °C-koa da batez beste.

3.2. Proiekzio globalen eta eskualde-mailakoen arteko alderaketa

Klima-ereduek aldaketa adierazgarriak proiektatzen dituzte ozeanoaren egoeran XXI. mendean zehar. Proiektatutako aldaketak handiagoak dira aldi luzerako (2081-2100) eta isuri handiagoko agertokietarako (SSP5-8.5) gainazaleko ozeanoan eta ozeano sakonean. Aldaketa horiek barnean hartzen dituzte: berotze ia segurua, ozeanoaren azidotzea, oxigenoaren galera, azpigainazaleko mantengaien kontzentrazioaren murrizketa, ekoizpen primarioaren murrizketa, arrainen ugartasunaren eta banaketaren aldaketak eta giza ongizaterako eta garapen jasangarrirako ezinbestekoak diren ekosistema-zerbitzuen galera.

Ondoren, itsasoaren batez besteko mailarako, tenperaturarako, gazitasunerako, oxigeno disolbatu-rako eta klorofilarako proiektio globalak eta eskualde-proiektioak aztertuko dira. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 eta SSP5-8.5 agertokietarako itsasoaren batez besteko mailaren proiektioak IPCCren Atlas interaktibotik lortu dira (Gutiérrez et al., 2021). Itsasoko tenperaturaren eskualde-bilakaeraren, gazitasunaren, pH-aren, oxigeno-kontzentrazioaren eta klorofila-kontzentrazioaren analisirako, Trond-ek (2022) Bizkaiko golkorako argitaratutako eskualdeko ereduak erabili dira. Zehazki, SSP2-4.5 eta SSP5-8.5 agertokiak aztertu dira. Eredu horiek GLORYS12V1 berranalisi globala (Dréville et al., 2021) erabiltzen dute, bai eta tenperatura- eta gazitasun-behaketak eta Global Ocean Biogeochemistry hindcast ere oxigenorako eta klorofilarako.

aumento de la temperatura media global de la superficie terrestre hasta al menos mediados del siglo XXI. Bajo el escenario SSP1-1.9 el calentamiento global se limita al objetivo de 1,5 °C, sobre la época preindustrial, marcado por el Acuerdo de París. En el escenario con emisiones muy altas, SSP5-8.5, el calentamiento proyectado es de media 4,4 °C.

3.2. Comparativa de proyecciones globales y regionales

Los modelos climáticos proyectan cambios significativos en el estado oceánico a lo largo del siglo XXI. Los cambios proyectados son mayores para el largo periodo (2081-2100) y para los escenarios de mayores emisiones (SSP5-8.5) en todo el océano superficial y profundo. Estos cambios incluyen: un calentamiento prácticamente seguro, la acidificación oceánica, pérdida de oxígeno, disminución de la concentración de nutrientes en subsuperficie, disminución de la producción primaria, cambios en la abundancia y distribución de peces y pérdida de servicios ecosistémicos imprescindibles para el bienestar humano y el desarrollo sostenible.

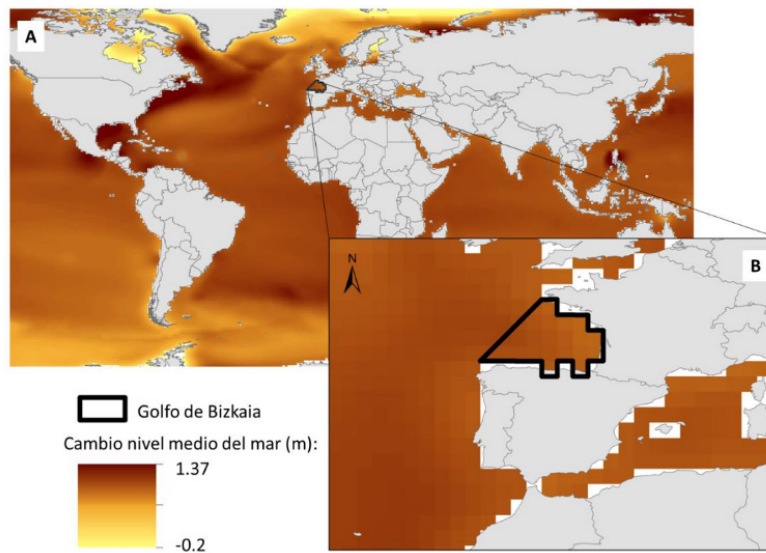
A continuación, se analizan las proyecciones globales y regionales para el nivel medio del mar, la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y la clorofila para distintos escenarios. Las proyecciones del nivel medio del mar para los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 se han obtenido del Atlas interactivo del IPCC (Gutiérrez et al., 2021). Para el análisis de la evolución regional de la temperatura del mar, la salinidad, pH, la concentración de oxígeno y la concentración de clorofila, se han utilizado los modelos regionalizados para el golfo de Bizkaia publicados por Trond (2022). En concreto, se han analizado los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Estos modelos utilizan el reanálisis global GLORYS12V1 (Dréville et al., 2021) como observaciones de temperatura y salinidad y el Global Ocean Biogeochemistry hindcast para el oxígeno y la clorofila.

3.2.1. Itsasoaren batez besteko maila

Itsasoaren batez besteko maila globalak gora egiten jarraituko du, gutxienez 2100era arte, agertoki guztietan. Proiekzio globalek adierazten dute itsasoaren batez besteko maila, 1995–2014 erreferentzia-aldiari dagokionez, 2050. urterako 18 [15–23] (SSP1–19.9) cm eta 23 [20–29] (SSP5–8.5) cm artean handituko dela, eta 2100. urterako, aldiz, 38 [28–55] (SSP1–1.9) cm eta 77 [63–101] cm artean (SSP5–8.5). Igoera hori hedapen termikoak eta glaziarren eta izotz-geruzen masa-galerak eragingo dute nagusiki, eta ur-biltegitratzean izandako aldaketen ekarpena txikiagoa izango da. Proiekzio gertagarri horiek ez dituzte barnean hartzen izotz-geruzekin lotutako prozesuak, ziurgabetasun handikoak. 2100. urtetik harago, itsasoaren batez besteko mailak gora egiten jarraituko du –mendeetan zehar ozeano sakonak beroa etengabe atzitzearen ondorioz eta Groenlandiako eta Antartikako izotz-geruzen masa-galera dela-eta–, eta altua izaten jarraituko du milaka urtez.

3.2.1. Nivel medio del mar

El nivel medio del mar global continuará aumentando hasta por lo menos 2100 en todos los escenarios. Las proyecciones globales indican que, respecto al periodo de referencia 1995–2014, el nivel medio del mar aumentará en 2050 entre 18 [15 a 23] (SSP1–19.9) cm y 23 [20 a 29] (SSP5–8.5) cm y en 2100 entre 38 [28 a 55] (SSP1–1.9) cm y 77 [63 a 101] cm (SSP5–8.5). Este ascenso estará causado principalmente por la expansión térmica y la pérdida de masa de glaciares y capas de hielo, con una contribución menor de los cambios en el almacenamiento terrestre de agua. Estas proyecciones probables no incluyen aquellos procesos relacionados con las capas de hielo que se caracterizan por una gran incertidumbre. Más allá de 2100, el nivel medio del mar seguirá aumentando durante siglos debido a la continua captación de calor del océano profundo y la pérdida de masa de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, y continuará elevado durante miles de años.



9. ir. (A) Atlas Interaktiboaren mapa, CMIP6ren⁴ itsasoaren batez besteko mailarako ereduaren proiektzio globalarekin (metroan), erreferentzia-aldiari dagokionez (1995–2014), 2081–2100erako eta SS5–8.5 agertokian. (B) Azterketa-eremurako zooma: beltzez nabarmentzen da proiektzio globaletatik Bizkaiko golkorako datuak ateratzeko erabili den maskara.

9. Fig. (A) Mapa del Atlas Interactivo con la proyección global de los modelos del CMIP6⁴ para el cambio del nivel medio del mar (en metros) relativo al periodo de referencia (1995–2014) para 2081–2100 y bajo el escenario SS5–8.5. (B) Zoom a la zona de estudio donde se resalta en negro la máscara utilizada para extraer datos de las proyecciones globales para el golfo de Bizkaia.

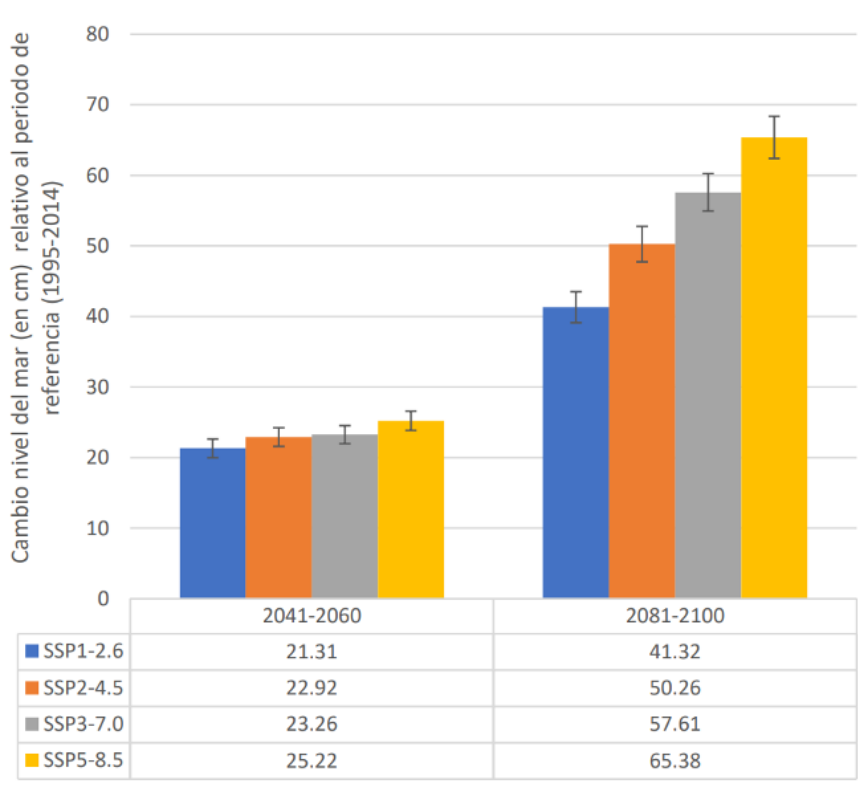
4 Coupled Model Intercomparison Project.

4 Coupled Model Intercomparison Project.



IPCCren atlas interaktiboan erabilgarri dauden proiektzio globalek (Gutiérrez et al., 2021) itsasoaren batez besteko mailaren igoera erakusten dute Bizkaiko golgorako, agertokiaren arabera: 21,31-25,22 cm-koa epe ertainerako (2041-2060) eta 41,32-65,38 cm-koa mende-amaierarako (2081-2100).

Las proyecciones globales disponibles en el Atlas interactivo del IPCC (Gutiérrez et al., 2021) muestran para el golfo de Bizkaia un aumento del nivel medio de mar, dependiendo del escenario, de 21,31 a 25,22 cm para el medio plazo (2041-2060) y un aumento de 41,32 a 65,38 cm para finales de siglo (2081-2100).



10. ird. Epe ertainerako (2041-2060) eta epe luzerako (2081-2100) espero diren itsasoaren batez besteko mailaren aldaketak, erreferentzia-aldiari dagokionez (1995-2014), SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 eta SSP5-8.5 agertokietarako. Datuen iturria: Gutiérrez et al. (2021).

10. Fig. Cambios en el nivel medio del mar esperados a medio plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100) relativos al periodo de referencia (1995-2014) para los diferentes escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Fuente de datos: Gutiérrez et al. (2021).

Kostaldeko sistemen itsas mailaren igoeraren aurreko erantzun naturala lurreranzko migrazioa da, hondartzaren behealdea higatuz eta goiko aldean hondarra biltegitratuz. Kostalde harritsuak berez egoten dira etengabeko higadura-egoeran, baita itsas mailaren baldintzak egonkorrak direnean ere. Etorkizuneko kostaldeko higadura, itsas mailaren igoeraz gain, tokiko faktore espezifikoek mende egongo da; faktore horiek, oro har, kostaldeko erantzuna baldintzatuko dute.

La respuesta natural de los sistemas costeros al aumento del nivel del mar es la migración hacia tierra, a través de la erosión de la parte inferior de la playa y el depósito de arena en la parte superior. Las costas rocosas están en un estado continuo de erosión por naturaleza, incluso en condiciones estables del nivel del mar. La erosión costera futura, además del aumento del nivel del mar, dependerá de factores locales específicos, que son los que generalmente determinarán la respuesta costera.



3.2.2. Temperatura

Eskala globaleko proiektzioek adierazten dute itsasoko uraren gainazaleko tenperaturaren igoera oso gertagarria dela datozen hamarkadetan (Gulev et al., 2021), baita ozeanoko zirkulazio motelaren ondorioz isuriak zerora iritsi ondoren ere (Larson et al., 2020). Hala ere, ziurgabetasun handiagoa dago eskualde-mailako proiektzio zehatzetan.

Proiektzioek adierazten dute uraren tenperaturak gora egingo duela agertoki, sakonera eta denbora-tarte guztietan, eta berotzerik nabarmenena gainazalean gertatuko dela, mende-amaieran eta SSP5-8.5 agertokian. Zehazki, uraren gainazaleko tenperaturari dagokionez, proiektzioek adierazten dute 2081-2100 aldiko 1995-2014 erreferentzia-aldiarekiko igoera 0,86 [0,43-1,47] °C-koa izango dela SSP1-2.6 agertokian; 1,51 [1,02-2,19] °C-koa SSP2-4.5en kasuan; 2,19 [1,56-3,30] °C SSP3-7.0n eta 2,89 [2,01-4,07] °C-koa SSP5-8.5en (IPCC, 2021).

Bizkaiko golkorako, eskualdeko ereduak igoera bat adierazten dute agertoki, sakonera eta denbora-tarte guztietan. Igoera nabarmenagoa da gainazalean mende-amaierarako eta SSP5-8.5 agertokirako: zehazki, +2,41 °C-koa 1993-2021 erreferentzia-aldiarekiko.

Igoera horrek eragina izango du itsas espezieen metabolismoan, fenologian eta banaketa geografikoan. Horrek, aldi berean, itsasoko ekosistemen funtzionamendu osasungarriaren mende dauden giza sistemei eta ekonomiei eragiten die.

3.2.3. Gazitasuna

Gainazaleko gazitasunak –eta, beraz, azpi-gainazalekoak ere bai– lotura estua du ziklo hidrológicoarekin. Proiektzioek ziklo hidrológikoa areagotzeko joera adierazten dutenez, gazitasunerako proiektzioek adierazten dute eskualdeen arteko kontrasteak areagotu egingo direla, hau da, gazitasun txikiagoko ozeanoko eskualdeetan gazitasunak behera egiten jarraituko duela, eta gazitasun-mailarik handiena duten eskualdeetan, aldiz, gora egiten jarraituko dutela (IPCC, 2021). Proiektzioek adierazten dute alde horiek handitzen jarraituko dutela agertoki desberdinetarako.

3.2.2. Temperatura

Las proyecciones a escala global indican un incremento muy probable de la temperatura superficial del agua del mar para las próximas décadas (Gulev et al., 2021), incluso después de que las emisiones alcancen cero debido a la lenta circulación oceánica (Larson et al., 2020). Sin embargo, existe una mayor incertidumbre en las proyecciones exactas a escala regional.

Las proyecciones indican un aumento de la temperatura del agua en todos los escenarios, profundidades y horizontes temporales, siendo el calentamiento más acusado en superficie a finales de siglo y en el escenario SSP5-8.5. En concreto, para la temperatura superficial del agua, las proyecciones indican para el periodo 2081-2100 incrementos, respecto al periodo de referencia 1995-2014, de 0,86 [0,43-1,47] °C para SSP1-2.6; 1,51 [1,02-2,19] °C para SSP2-4.5; 2,19 [1,56-3,30] °C para SSP3-7.0 y 2,89 [2,01-4,07] °C para SSP5-8.5 (IPCC, 2021).

Para el golfo de Bizkaia, los modelos regionalizados, indican un ascenso en todos los escenarios, profundidades y horizontes temporales. El ascenso es más acusado en superficie para finales de siglo y para el escenario SSP5-8.5, +2,41 °C respecto al periodo de referencia 1993-2021.

Este incremento tendrá efectos sobre el metabolismo, fenología y distribución geográfica de especies marinas. Esto a su vez afecta a los sistemas y economías humanas que dependen del funcionamiento saludable de los ecosistemas marinos.

3.2.3. Salinidad

La salinidad en superficie, y por tanto también en subsuperficie, está estrechamente relacionada con el ciclo hidrológico. Dado que las proyecciones indican una tendencia a la intensificación del ciclo hidrológico, las proyecciones para la salinidad indican que los contrastes entre regiones se intensificarán, en las regiones oceánicas de menor salinidad, esta seguirá disminuyendo y las regiones más salinas seguirán aumentando su salinidad (IPCC, 2021). Las proyecciones indican que estas diferencias continuarán aumentando para los distintos escenarios.



Eskualde mailan, ziklo hidrológicoaz gain, ozeanoko beste dinamika batzuek ere eragina dute gazitasunean, hala nola adbekzioak edo ibaien deskargak. Bizkaiko golkoaren eskalan, eredu desberdinek erakusten duten gazitasunaren etorkizuneko eboluzioak aldakortasun handiagoa du. Kontuan hartutako ereduaren batezbestekorako, agertoki eta denbora-tarte guztietan eta sakonera guztietarako, pixka bat jaitea aurreikusten da.

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 ekoizpen primarioan ere. Tenperaturak bezala, gazitasunak ere eragina du itsasoko espezie eta ekosistema jakin batzuen biziraupenean.

3.2.4. Azidotzea (pH-a)

Azaleko pH-ak jaisten jarraituko du XXI. mendean zehar, isuri txikienei dagokien agertokian izan ezik. Proiektzio globalek beherakadak adierazten dituzte SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 eta SSP5-8.5 agertokietarako: $0,08 \pm 0,03$; $0,17 \pm 0,003$; $0,27 \pm 0,005$ eta $0,37 \pm 0,007$ pH-unitate, hurrenez hurren, mende-amaieran (2081-2100) 1995-2014 aldiarekiko (IPCC, 2021).

Bizkaiko golkoaren eskalako proiektzioek adierazten dute, halaber, pH-a ere murriztu egin dela kasu guztietan, itsasoaren azidotzeko joera argiarekin, bereziki SSP5-8.5 agertokian mende-amaierarako, 25 m-ko sakoneran eta 5 m-ko sakoneran ($-0,39$ eta $-0,38$, hurrenez hurren).

Erreakzio biogeokimiko eta biokimiko askok ozeanoko uraren pH-an izandako aldaketen eragina izango dute. Gehien kaltetutako organismoetako batzuk kaltzifikatzaileak izango dira, hala nola koralak, foraminiferoak, pteropodoak edo kokolitoak, CaCO_3 -ren asetasun-maila murriztearen ondoriozko zuzeneko inpaktuekin (Feely et al., 2012).

A escala regional, además del ciclo hidrológico otras dinámicas oceánicas como la advección o la influencia de la descarga de ríos también influyen en la salinidad. A escala del golfo de Bizkaia, la salinidad presenta una evolución a futuro con mayor variabilidad entre los modelos. Para la media de los modelos considerados, en todos los escenarios y horizontes temporales y para todas las profundidades, se proyecta un ligero descenso.

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 supervivencia de determinadas especies y ecosistemas marinos.

3.2.4. Acidificación (pH)

El pH superficial continuará descendiendo a lo largo del siglo XXI, excepto para el escenario de menores emisiones. Las proyecciones globales indican descensos para los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 respectivamente de $0,08 \pm 0,03$; $0,17 \pm 0,003$; $0,27 \pm 0,005$ y $0,37 \pm 0,007$ unidades de pH a final de siglo (2081-2100) respecto al periodo 1995-2014 (IPCC, 2021).

Las proyecciones a escala del golfo de Bizkaia, indican también una disminución del pH en todos los casos, con una tendencia clara a la acidificación del mar, especialmente en el escenario SSP5-8.5 para finales de siglo a 25 m y 5 m de profundidad ($-0,39$ y $-0,38$, respectivamente).

Muchas reacciones biogeoquímicas y bioquímicas se verán influidas por los cambios en el pH del agua del océano. Algunos de los organismos más afectados serán los calcificantes como corales, foraminífera, pterópodos o cocolitos, con impactos directos debido a la reducción del grado de saturación de CaCO_3 (Feely et al., 2012).

3.2.5. 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 handiagoa eragiten du, ur-zutabearen eta atmosferaren arteko nahasketa murriztuz (Keeling et al., 2010; IPCC, 2019).

AR6n (IPCC, 2021) ondorioztatzen da ozeanoko oxigeno-edukiak murrizten jarraituko duela XXI. mendean zehar, aurrekaririk gabeko baldintzak lortuz (Canadell et al., 2021). Eskualde-mailan eta gainazal azpiko uretarako, proiektatutako aldaketak ez dira uniformeak espazialki, eta eskala globalerako erakutsitakoa baino ziurgabetasun handiagoa dago ereduaren artean.

Bizkaiko Golkoko eskalan, proiektzioek oxigeno-kontzentrazioaren beherakada erakusten dute ia agertoki guztietan, SSP5-8.5 agertokian mendearen erdialdean izan ezik, bertan igoera oso arina baita.

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.

3.2.6. Klorofila

Klorofilaren kontzentrazioa fitoplanktonaren ugaritasunaren/biomasaaren eta ekoizpen primarioaren adierazle bat da. Beraz, klorofila-kontzentrazioan izandako aldaketek ekoizpen primarioan izandako aldaketen berri emango dute.

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. Berotzeak eta estratifikazioa handitzeak eragin negatiboa izan dezakete itsas fitoplanktona hazteko eremu fotikoko mantenugaien

3.2.5. 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 (Keeling et al., 2010; IPCC, 2019).

En el AR6 (IPCC, 2021) se concluye que el contenido en oxígeno en el océano continuará disminuyendo durante el siglo XXI, alcanzando condiciones sin precedente (Canadell et al., 2021). A escala regional y para aguas subsuperficiales, los cambios proyectados no son espacialmente uniformes y existe mayor incertidumbre entre los modelos que la mostrada para la escala global.

A escala del golfo de Bizkaia, las proyecciones señalan una disminución de la concentración de oxígeno en prácticamente todos los escenarios, excepto a mediados de siglo del escenario SSP5-8.5 en el que el aumento es muy ligero.

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.

3.2.6. Clorofila

La concentración de clorofila es un indicador de la abundancia/biomasa de fitoplancton y de la producción primaria. Por lo tanto, cambios en la concentración de clorofila informarán de cambios en la producción primaria.

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. El calentamiento y aumento de la estratificación pueden afectar negativamente a la



kontzentrazioan, eta horrek beherakadak eragin ditzake ekoizpen primarioan (Steinacher et al., 2010; Bopp et al., 2013; Chust et al., 2014).

Eskala globaleko proiektzioek temperaturaren eta estratifikazioaren igoera adierazten dute, handiagoa izango dena SSP5-8.5 agertokian. Horrek ekoizpen primarioa eta, beraz, klorofila jaistea eragiten du 2081-2100 aldirako agertoki guztietan, eskualdeen artean aldakortasun handia dagoen arren. Ipar Atlantikorako jaitsiera orokorrak proiektatzen dira (Kwiatkowski et al., 2020). Klorofila-kontzentrazioaren eskualde-proiektzioek beherakada txiki bat adierazten dute agertoki guztietan, batez ere gainazalean eta SSP5-8.5 agertokirako.

Fitoplanktonaren ekoizpen primarioaren murrizketa sistematikoki zabaldu da goragoko maila trofikoetan, hala nola zooplanktonean (Chust et al., 2014; Stock et al., 2014; Kwiatkowski et al., 2018) eta arrainetan (Lotze et al., 2019); horrek inpaktu potentzialak izan ditzake arrantza-stocketan.

concentración de nutrientes en la zona fótica para el crecimiento del fitoplancton marino, provocando descensos en la producción primaria (Steinacher et al., 2010, Bopp et al., 2013, Chust et al., 2014).

Las proyecciones a escala global señalan un aumento de la temperatura y de la estratificación, mayor para el escenario SSP5-8.5. Esto da lugar a un descenso de la producción primaria, y por tanto de la clorofila, para el periodo 2081-2100 y todos los escenarios, aunque existe una gran variabilidad entre regiones. Para el Atlántico Norte se proyectan descensos generales (Kwiatkowski et al., 2020). Las proyecciones regionalizadas de la concentración de clorofila indican una ligera disminución en todos los escenarios, especialmente en superficie y para el escenario SSP5-8.5.

La disminución en la producción primaria del fitoplancton es sistemáticamente ampliada en niveles tróficos superiores como zooplancton (Chust et al., 2014; Stock et al., 2014; Kwiatkowski et al., 2018) y peces (Lotze et al., 2019), lo cual puede tener potenciales impactos en los stocks pesqueros.

		Glorys12v1 Berranalisi globala Reanálisis global	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
Aldagaia Variable	Sakonera Profundidad	1993-2021	2040-2060	2080-2099	2040-2060	2080-2099
T	5 m	15,094	15,842	16,537	15,867	17,502
	25 m	14,568	15,197	15,812	15,167	16,577
	Hondoa	7,167	7,486	7,702	7,436	7,995
G	5 m	35,323	34,987	34,796	34,979	34,423
	25 m	35,494	35,152	34,960	35,146	34,580
	Hondoa	35,132	35,061	35,019	35,047	34,942
pH	5 m	8,068	7,956	7,888	7,918	7,690
	25 m	8,079	7,965	7,897	7,929	7,693
	Hondoa	7,951	7,903	7,862	7,895	7,778
O ₂	5 m	5,756	5,689	5,624	5,708	5,523
	25 m	5,921	5,872	5,821	5,916	5,738
	Hondoa	5,146	5,039	4,939	5,086	4,854
Chl	5 m	0,366	0,332	0,311	0,329	0,303
	25 m	0,383	0,372	0,364	0,370	0,358

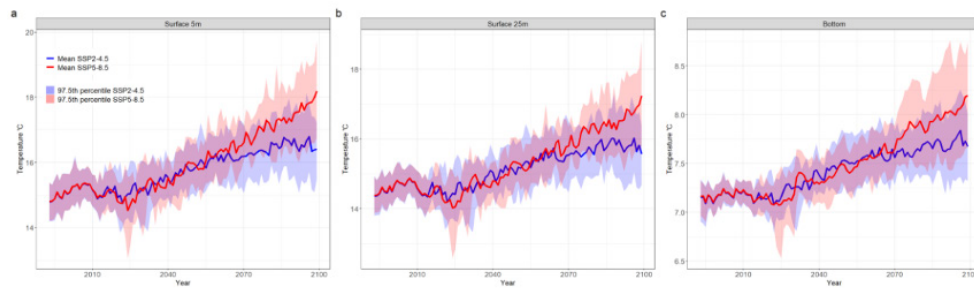
2. taula. 1993-2021 erreferentzia-aldirako eta 2040-2060 eta 2080-2099 denbora-tarterako batez besteko balioak. T: temperatura (°C), G: gazitasuna (psu), O₂: oxigenoa (ml/l), Chl: klorofila (mg/m³).

2. Tabla. Valores promedio para los periodos de referencia 1993-2021 y los horizontes temporales 2040-2060 y 2080-2099. T: temperatura (°C), S: salinidad (psu), O₂: oxígeno (ml/l), Chl: clorofila (mg/m³).

		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
Aldagaia Variable	Sakonera Profundidad	2040-2060	2080-2099	2040-2060	2080-2099
T	5 m	0,75	1,44	0,77	2,41
	25 m	0,63	1,24	0,60	2,01
	Hondoa	0,32	0,54	0,27	0,83
G	5 m	-0,34	-0,53	-0,34	-0,90
	25 m	-0,34	-0,53	-0,35	-0,91
	Hondoa	-0,07	-0,11	-0,09	-0,19
pH	5 m	-0,11	-0,18	-0,15	-0,38
	25 m	-0,11	0,18	-0,15	-0,39
	Hondoa	-0,05	-0,09	-0,06	-0,17
O ₂	5 m	-0,07	-0,13	-0,05	-0,23
	25 m	-0,05	0,10	0,00	-0,18
	Hondoa	-0,11	-0,21	-0,06	-0,29
Chl	5 m	-0,03	-0,05	-0,04	-0,06
	25 m	-0,01	-0,02	-0,01	-0,03

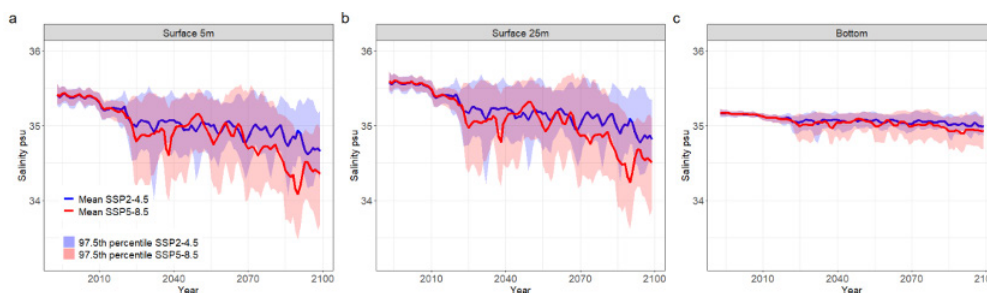
3. taula. Aldagaien batez besteko balioen aldea 2040-2060 eta 2080-2099 denbora-tarteetan, 1993-2021 erreferentzia-aldiarekiko. T: tenperatura (°C), G: gazitasuna (psu), O₂: oxigenoa (ml/l), Chl: klorofila (mg/m³).

3. Tabla. Diferencia de los valores promedio de las variables en los horizontes temporales 2040-2060 y 2080-2099, respecto al periodo de referencia 1993-2021. T: temperatura (°C), S: salinidad (psu), O₂: oxígeno (ml/l), Chl: clorofila (mg/m³).



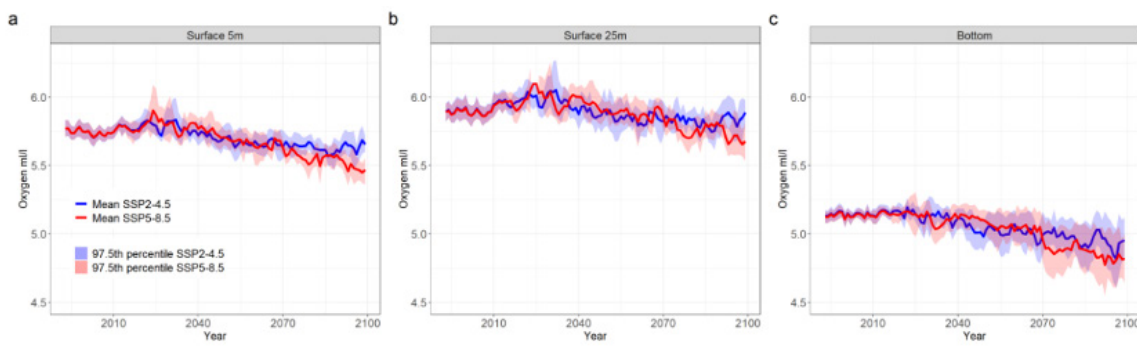
11. ird. Itsasoko tenperaturaren bilakaera sakonera eta klima-ager-toki desberdinetan.

11. Fig. Evolución de la temperatura del mar a diferentes profundidades en escenarios climáticos.



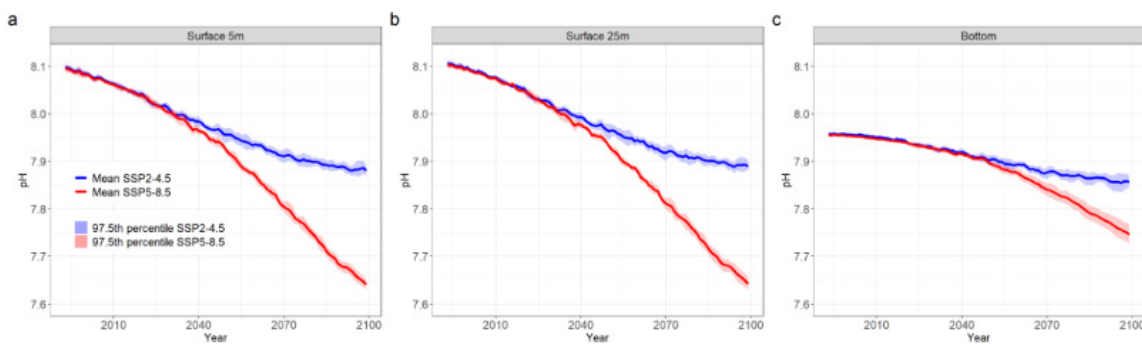
12. ird. Itsasoaren gazitasunaren bilakaera sakonera eta klima-ager-toki desberdinetan.

12. Fig. Evolución de la salinidad del mar a diferentes profundidades en escenarios climáticos.



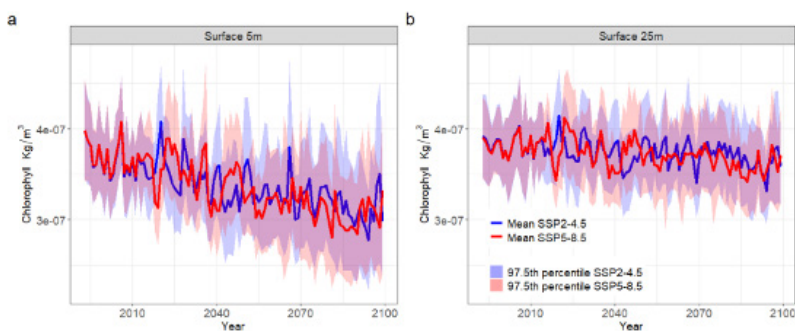
13. ird. Itsasoko oxigeno disolbatuaren kontzentrazioaren bilakaera sakonera eta klima-agertoki desberdinetan.

13. Fig. Evolución de la concentración de oxígeno disuelto del mar a diferentes profundidades en escenarios climáticos.



14. ird. Itsasoaren pH-aren bilakaera sakonera eta klima-agertoki desberdinetan.

14. Fig. Evolución del pH del mar a diferentes profundidades en escenarios climáticos.



15. ird. Klorofila-kontzentrazioaren bilakaera sakonera eta klima-agertoki desberdinetan.

15. Fig. Evolución de la concentración de clorofila a diferentes profundidades en escenarios climáticos.

4. Ondorioak

Klima-aldaketarekin zuzenean lotutako adierazleen aldaketa-tasak, hau da, itsasoko tenperaturaren igoera eta itsasoaren batez besteko mailaren igoera, Gipuzkoako Itsasoko eta Kostako Behatokiaren 2022ko txostenean aurkeztutakoen oso antzekoak dira. Horrek indartu egiten du klima-aldaketa globalak eremuko neurketa fisikoetan dituen efektuei buruzko ondorioa, eta aukera ematen du klima-aldaketaren adierazle fidagarri gisa identifikatzeko Gipuzkoako kostalderako.

Laburbilduz, adierazle desberdinen denbora-serieen analisiak hau adierazten du:

- **Itsasoaren berotzea:** Bizkaiko golkoan, 1980ko hamarkadatik aurrera itsasoa berotzen hasi dela nabaritzen da. Berotze-tasak azalean $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ /hamarkada (Donostiako Aquariumean) eta $0,19\text{ }^{\circ}\text{C}$ /hamarkada artean dabilta (Bizkaiko golko osoa kontuan hartuz gero). Berotze-tasa murriztu egiten da sakonera handitu ahala; horrela, Donostia parean ur-zutabearen lehen 100 metroak integratuzat jotz gero, berotze-tasa $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ -koa da hamarkada bakoitzeko. Emaizta horiek bat datoz aurretiazko azterketekin, eta aldaketa txikiak erakusten dituzte serie beretarako 2020ra arteko estimazioekin alderatuta. Bizkaiko golkoaren mailako itsasoaren berotzea lotuta egongo litzateke Ipar-ekialdeko Atlantikoaren berotzearekin, klima-aldaketari lotutako ozeano/atmosfera interakzio-patroiekin erlazionatuta dagoenarekin.
- **Itsas mailaren igoera:** Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila $0,99$ eta $3,7\text{ cm}$ /hamarkada arteko tasarekin igotzen ari da ($2,5\text{ cm}$ /hamarkada, batez beste) 90eko hamarkadaz geroztik. Tasa horiek bat datoz serie berberen 2020ra arte estimatutakoekin. Eremuko batez besteko igoera-tasa aldi bererako tasa globala baino apur bat txikiagoa da ($3,2\text{--}3,6\text{ cm}$ /hamarkada -IPCC, 2019-). Ondoriozta daiteke, beraz,

4. Conclusiones

Las tasas de cambio de los indicadores más directamente relacionados con el cambio climático, esto es, aumento de la temperatura del mar y ascenso del nivel medio del mar, se mantienen muy parecidas a las presentadas en el informe del Observatorio marino-costero de Gipuzkoa en 2022. Esto 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 guipuzcoana.

En resumen, el análisis de las series temporales de los distintos indicadores indica:

- **Calentamiento del mar:** En el golfo de Bizkaia se aprecia un calentamiento del mar a partir de los años 80. Las tasas de calentamiento oscilan en superficie entre $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década en el Aquarium de Donostia-San Sebastián y $0,19\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década al considerar todo el golfo de Bizkaia. La tasa de calentamiento disminuye en profundidad, así al considerar integrados los primeros 100 m de la columna de agua frente a Donostia la tasa de calentamiento es de $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década. Estos resultados son consistentes con estudios previos y muestran pequeñas variaciones con las estimaciones para las mismas series hasta 2020. El calentamiento del mar a nivel del golfo de Bizkaia observado estaría asociado al calentamiento del Atlántico noreste, ligado a los patrones de interacción océano-atmósfera, asociados al cambio climático.
- **Ascenso del nivel del mar:** El nivel medio del mar en el golfo de Bizkaia está ascendiendo a una tasa de entre $0,99$ y $3,7\text{ cm}$ por década (en promedio $2,5\text{ cm}$ por década) desde los años 90. Estas tasas son consistentes con las estimadas de las mismas series hasta 2020. La tasa promedio de ascenso en la zona es ligeramente inferior a la tasa global en el mismo periodo ($3,2\text{--}3,6\text{ cm}$ por década, (IPCC, 2019)). Se puede concluir



Bizkaiko Golkoko kostaldean eta itsasoan detektatutako igoera bat datorrela maila globaleko igoerarekin. Itsas mailaren igoera bizkortzen ari da eremuan azken hiru hamarkadetan XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta, aurretiazko azterlanekin bat etorri (Woppelmann et al., 2006; Dangendorf et al., 2019).

- **Ozeanoaren azidotzea (pH-a):** Bizkaiko golkoaren hego-ekialdeko kostaldeko estazioetan, kostaldetik 10 kilometrora eta 100 metroko sakoneran, itsasoko uraren pH-a hamarkada bakoitzeko $0,123 \pm 0,002$ unitate jaitsi dela detektatu da. Tasa hori zertxobait handiagoa da eskala globalean behatutakoa baino ($-0,02$ unitate hamarkada bakoitzeko), bai eta ozeano Atlantikoan ($-0,013$ unitate hamarkada bakoitzeko) eta Bizkaiko Golkoko mendebaldeko kostaldean behatutakoa baino ($-0,016$ unitate hamarkada bakoitzeko). Horrek adierazten du Gipuzkoako kostaldean ikusitako azidotze-prozesua maila globaleko azidotze-prozesuarekin lotuta egon daitekeela; edonola ere, beharrezkoa da pH-ak ur-zutabeen zehar duen aldakuntza aztertzen jarraitzea.
- **Hondartzen higadura:** Zarauzko hondartza nolabaiteko higadura-mailari lotuta ari da, eta horren isla da 2010–2021 aldian itsasgorako kostalderoan izandako barnealderanzko atzerakada (urtean 0,38 m). Tasa hori bat dator 2020ra arteko serie bereko estimazioarekin. Behatokiaren 2022ko txostenean adierazten den bezala, joera horiek olatuen hazkunde arinarekin lotuta egongo lirake, eta, bereziki, muturreko gertakari jakin batzuekin lotuta (adibidez, 2013–2014ko neguko ekaitzen sekuentziarekin).

Etokizuneko balizko agertoki eta inpaktuen jarraipena egitea, horiek eguneratzea eta ulertzea funtsezkoa da arriskuei aurrea hartzeko eta Gipuzkoako kostaldean jarraitu beharreko egokitzapen-irizpideak definitzeko. Bizkaiko golkorako eskualdeko proiektioek honako aldaketa hauek adierazten dituzte AR6-IPCCn (IPCC, 2021) definitutako tarteko agertokian (SSP2–4.5) eta erregai fosilek bultzatutako garapenak baldintzatutako goiko muturrekoan (SSP5–8.5) mende-amaierarako (2080–2100), gaur egungo aldiarekin alderatuta (1993–2021):

que el ascenso detectado en la costa y mar del golfo de Bizkaia es consistente con el ascenso a nivel 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).

- **Acidificación del océano (pH):** En las estaciones costeras del sureste del golfo de Bizkaia situadas a 10 km de la costa y a 100 m de profundidad, se detecta un descenso del pH del agua de mar de $0,123 \pm 0,002$ unidades por década. Esta tasa es ligeramente superior a las observadas a escala global ($-0,02$ unidades por década), en el océano Atlántico ($-0,013$ unidades por década) y en la costa occidental del golfo de Bizkaia ($-0,016$ unidades por década). Esto indica que el proceso de acidificación observado en la costa guipuzcoana podría estar asociado al proceso de acidificación global, si bien es necesario seguir analizando la variación del pH a lo largo de la columna de agua.
- **Erosión de playas:** La playa de Zarautz está siendo sujeta a un cierto grado de erosión reflejado en un retroceso hacia el interior de la línea de costa de la pleamar (0,38 m por año) en el periodo 2010–2021. Esta tasa es consistente con la estima de la misma serie hasta 2020. Como se indica en el informe del Observatorio de 2022, estas tendencias estarían asociadas al ligero incremento del oleaje y, en particular, a ciertos eventos extremos (p. ej. la secuencia de tormentas del invierno 2013–2014).

El seguimiento, actualización y comprensión de los posibles escenarios e impactos regionalizados futuros más actualizado es clave para anticiparnos a los riesgos y definir los criterios de adaptación que deben llevarse a cabo en la costa para hacer de Gipuzkoa un territorio más resiliente. Las proyecciones regionalizadas para el golfo de Bizkaia indican, bajo los escenarios intermedio (SSP2–4.5) y extremo superior basado en un desarrollo impulsado por los combustibles fósiles (SSP5–8.5) definidos en el AR6-IPCC (IPCC, 2021), para finales de siglo (2080–2100) con respecto al periodo actual (1993–2021):

- Itsas mailaren 50–65 cm-ko igoera 1995–2014 aldiarekiko.
- Itsasoaren 1,44–2,41 °C-ko berotzea gainazalean.
- Ozeanoaren azidotzea (–0,18 eta –0,38 artekoa).
- Oxigeno-kontzentrazioen beherakada.
- Klorofila-kontzentrazioa murriztea; horrek adierazten du lehen mailako ekoizpena txikiagoa izango dela eremuan, eta horrek inpaktu potentzialak izango dituela arrantza-stocketan.
- Ascenso en el nivel del mar de 50–65 cm respecto al periodo 1995–2014.
- Calentamiento del mar en superficie de 1,44–2,41 °C.
- Acidificación del océano (–0,18 a –0,38).
- Disminución de las concentraciones de oxígeno.
- Disminución de la concentración de clorofila, lo cual indica una menor producción primaria en la zona con potenciales impactos en los stocks pesqueros.



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
Itsasoko temperatura Temperatura del mar	SST Aquarium	Aquarium	°C	1946-1979	-0,1987 ± 0,0569	0,0005
	SST Aquarium			1980-2021	0,2363 ± 0,0324	0,0000
	SST satelitea AQUA SST satélite AQUA	Bizkaiko golkoa Golfo Bizkaia		2003-2021	0,0826 ± 0,0346	0,0171
	SST satelitea OSTIA SST satélite OSTIA			1981-2021	0,1920 ± 0,0360	0,0000
	T sak. 0-100 m T por Prof. 0-100 m	D2		1986-2021	0,1376 ± 0,0364	0,0002
Itsas maila Nivel del mar	IBBM Vigo NMM Vigo	Vigo2	cm	1993-2021	1,8728 ± 0,5129	0,0012
	IBBM Gijón 2 NMM Gijón 2	Gijón 2		1995-2020	0,9891 ± 0,5552	0,0870
	IBBM Santander 2 NMM Santander 2	Santander2		1992-2021	2,1083 ± 0,3272	0,0000
	IBBM Brest NMM Brest	Brest		1846-2021	1,2784 ± 0,0531	0,0000
				1992-2021	2,9875 ± 0,4366	0,0000
	IBBM Coruña NMM Coruña	Coruña 2		1992-2021	3,7158 ± 0,5872	0,0000
		Coruña		1943-2021	1,9292 ± 0,1934	0,0000
	IBBM Bilbo3 NMM Bilbao3	Bilbo3		1992-2021	3,1216 ± 0,3228	0,0000
	IBBM Pasaia NMM Pasaia	Pasaia		2007-2020	4,8895 ± 0,8728	0,0000
IBBM satelitea NMM satélite	Bizkaiko golkoa Golfo Bizkaia	1993-2020	2,5440 ± 0,3816	0,0000		
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 ²	2010-2021	-8,448,2 ± 5,733,7	0,1432
	Marearteko eremua Área intermareal				18,571,9 ± 9,195,7	0,0455



Glosarioa

AR5: Klima-aldaketari buruzko Gobernuarteko Aditu Taldearen 5. Ebaluazio Txostena. 2014an argitaratu zen.

AR6: Klima-aldaketari buruzko Gobernuarteko Aditu Taldearen 6. Ebaluazio Txostena. 2021ean argitaratu zen.

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-lurruna (H₂O), karbono dioxidoa (CO₂), oxido nitrosoa (N₂O), metanoa (CH₄) eta ozonoa (O₃) dira lurreko atmosferako berotegi-efektuko gas nagusiak.

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

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.

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

Estratifikazio: ura nahasteko hesi gisa jarduten duten hainbat propietate –hala nola gazitasuna,

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 (CO₂) 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.

AR5: 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se publicó en 2014.

AR6: 6º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se publicó en 2021.

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.

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 periodo prolongado, décadas o más.



dentsitatea eta temperatura- 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 perpendikularrean dagoen distantzia garbi gisa definitzen da.

Itsas mailaren aldaketa (itsas mailaren igoe-ra/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 (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.

Klima-agertokia: klimaren irudikapen onargarria eta sarritan sinplifikatua, barne-koherentzia duten harreman klimatologikoen multzo batean oinarritua, klima-aldaketa antropogenikoaren ondorio potentzialak ikertzeko esplizituki erabilia izateko eraikitzen dena, eta askotan input gisa balio duena inpaktuak simulatzeko. Klima globala isurien agertoki batekin behartu den zirkulazio orokorreko eredu batekin simulatzearen emaitza da.

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 zatiri edo lehorreko prozesuen

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 y 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 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.

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 aumente 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.

Escenario climático: representación plausible y a menudo simplificada del clima, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos.

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 de lugar a aguas superficiales más cálidas, disminución de los niveles de

eragin handia duen itsas ingurunearen zatiari. Horrela, kostaldea ez da oso sakona izaten, eta lurretik gertu egoten da.

Klima-proiekzioa: berotegi-efektuko gasen eta aerosolen etorkizuneko isuri- edo kontzentrazio-agertoki baterako klima-sistemaren erantzun simulatua –oro har klima-ereduak erabiliz simulatzen dena–. Klima-proiekzioak iragarpenetatik bereizten dira, kontuan hartutako isuri- edo kontzentrazio-agertokiarekiko duten mendekotasuna dela-eta. Proiekzioak, beraz, gerta daitezkeen edo gerta ez daitezkeen agertokiei buruzko suposizioen arabera dira.

Kontzentrazio-ibilbide adierazgarriak (RCP -Representative Concentration Pathways-): berotegi-efektuko gasen, aerosolen eta kimiko-ki aktiboak diren gasen multzo osoaren isurien eta kontzentrazioen denbora-serieak, bai eta lurzorua erabilera ere, barnean hartzen dituzten agertokiak. “Adierazgarria” hitzak esan nahi du RCP bakoitzak erradiazio bidezko behar-tze-ezaugarri espezifikoetara eramango luketen agertoki posible ugarietako bat bakarrik ematen duela.

Kostaldea: lurra itsasotik gertu. ‘Kostako’ terminoa lehorreko prozesuen eragin handia duen lurreko zatia edo itsas ingurunearen zatia da. Hala, kostaldea ez da oso sakona izaten, eta lurretik hurbil egoten da.

Marearteko eremu: batez besteko itsasgora-eta itsas-behera-koten artean dagoen hondartza-eremua.

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

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

oxígeno en el agua más profunda e intensificación de la acidificación del océano superior.

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 (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero de la atmósfera terrestre.

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.

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.

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.

Proyección climática: es la respuesta simulada, generalmente mediante el uso de modelos climáticos, del sistema climático a un escenario de emisiones o concentraciones futuras de gases de efecto invernadero y aerosoles. Las proyecciones climáticas se distinguen de las predicciones por su dependencia del escenario de emisión o concentración considerado.

Región: superficie terrestre u oceánica relativamente grande caracterizada por propiedades geográficas y climatológicas específicas. El clima de una región terrestre se ve afectada por



hamarkada batzuetan edo luzaroago-, atmosferako karbono dioxidoa (CO₂) 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.

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.

Rutas de Concentración Representativas (RCP – Representative Concentration Pathways–):

escenarios que incluyen series temporales de emisiones y concentraciones del conjunto completo de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo. La palabra representativa significa que cada RCP proporciona solo uno de los muchos escenarios posibles que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo.

Erreferentziak / Referencias

Chust G., González, M., Fontán, A., Revilla, M., Alvarez, P., Santos, M., Chifflet, M., Borja, A., Muxika, I., Sagarminaga, Y., Caballero, A., De Santiago, I., Epelde, I., Liria, P., Lanzén, A., Alonso, L., Ibaibarriaga, L., Garnier, R., Franco, J., Villarino, E., Valle, M., Cotano, U., Abalia, A., López, A., Larreta, J. (2022). 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 elaborado por AZTI para Naturklima. 67 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., & 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. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 129-73.

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., & Vichi, M. (2013). Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, 10, 6225-6245.

Cai, W.-J., Hu, X., Huang, W.-J., Murrell, M.C., Lehter, J.C., Lohrenz, S.E., Chou, C., Zhai, W., Hollibaugh, J.T., Wang, Y., Zhao, P., Guo, X., Gundersen, K., Dai, M., & Gong, G.-C. (2011). Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. *Nature Geoscience*, 4(11), 766-770.

Cai, W.-J., Xu, Y.-Y., Feely, R.A., Wanninkhof, R., Jöns-son, B., Alin, S.R., Barbero, L., Cross, J.N., Aztsu-Scott, K., Fassebender, A.J., Carter, B.R., Jiang, L.-Q., Pepin, P., Chen, B., Hussain, N., Reimer, J.J., Xue, L., Salis-

deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., Alvarez, I., & Gesteira, J.L.G. (2009). Present warming within the context of cooling-warming cycles observed since 1854 in the 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, 1053-1059.

de Santiago, I., Camus, P., Gonzalez, M., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., del Campo, A., & Uriarte, A. (2021). Impact of climate change on beach erosion in the Basque Coast (NE Spain). *Coastal Engineering*, 167, 103916.

Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A., & Kleypas, J.A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192.

Drévillon, M., Lellouche, J.-M., Régnier, C., Garric, G., Bricaud, C., Hernandez, O., & Bourdallé-Badie, R. (2021). QUID For Global Ocean Reanalysis Products GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001- 030.

Duarte, C.M., Hendriks, I.E., Moore, T.S., Olsen, Y.S., Steckbauer, A., Ramajo, L., Carstensen, J., Trotter, J.A., & McCulloch, M. (2013). Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH. *Estuaries and Coasts*, 36(2), 221-236.

Escoto, A., Sanchez, L., & Gachuz, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32, 669-693.

Feely, R. A., Sabine, C. L., Byrne, R. H., Millero, F. J., Dickson, A. G., Wanninkhof, R., Murata, A., Miller, L. A., & Greeley, D. (2012). Decadal changes in the aragonite and calcite saturation state of the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB3001.

Fennel, K., Alin, S., Barbero, A., Evans, W., Bourgeois, T., Cooley, S., Dunne, J., Feely, R.A., Hernandez-Ayon, J.M., Hu, X., Lohrenz, S., Muller-Karger, F., Najjar, R., Robbins, L., Shadwick, E., Siedlecki, S., Steiner, N., Sutton, A., Turk, D., Vlahos, P., & Wang, Z.A. (2019). Carbon cycling in the North American



bury, J.E., Hernández-Ayón, J.M., Langdon, C., Li, Q., Sutton, A.J., Chen, C.-T.A., & Gledhill, D.K. (2020). Controls on surface water carbonate chemistry along North American ocean margins. *Nature Communications*, 11(1), 2691.

Canadell, J.G., Monteiro, P.M.S., Costa, M.H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P.M., Eliseev, A.V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P.K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2021). Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. 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., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816.

Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., & 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.

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., Seneviratne, 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., Woppepmann, G., & Wouters, B. (2018). Global sea-level

budget 1993–present. *Earth System Science Data*, 10(3), 1551–1590.

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

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., & Irigoien, X. (2014). Biomass changes and trophic amplification of plankton in a warmer ocean. *Global Change Biology*, 20, 2124–2139.

Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., & 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 Sciences*, 87, 113–124.

Chust, G., González, M., Fontán, A., Revilla, M., Alvarez, P., Santos, M., Cotano, U., Chifflet, M., Borja, A., Muxika, I., Sagarminaga, Y., Caballero, A., de Santiago, I., Epelde, I., Liria, P., Ibaibarriaga, L., Garnier, R., Franco, J., Villarino, E., Irigoien, X., Fernandes-Salvador, J.A., Uriarte, A., Esteban, X., Orue-Echevarria, D., Figueira, T., & Uriarte, A. (2022). Climate regime shifts and biodiversity redistribution in the Bay of Biscay. *Science of The Total Environment*, 803, 149622.

Copernicus Marine Service Information. Ocean Monitoring Indicators. Global ocean acidification – mean sea water pH time series and trend from Multi-Observations Reprocessing. [Interunet]. Disponible en: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/global-ocean-acidification-mean-sea-water-ph-time-series>

Costoya, X., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., & 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., Hay, C., Calafat, F., Marcos, M., Piecuch, C., Berk, K., & Jensen, J. (2019). Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, 9.

coastal ocean: a synthesis. *Biogeosciences*, 16(6), 1281–1304.

Findlay, H.S. & Turley, C. (2021). Ocean acidification and climate change. In: *Climate change – Observed impacts on planet earth*. [Letcher, T.M. (eds)]. Elsevier.

Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufréne, J.-L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., & 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.

Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L., Golledge, N.R., Hemer, M., Kopp, R.E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I.S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A.B.A., & Yu, Y. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. 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., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362.

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.,

Metzl, 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.

Goikoetxea, N., Borja, Á., Fontán, A., González, M., & 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., & 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.

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., & Vanninkhof, R. (2019). The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science*, 363(6432), 1193–1199.

Gulev, S.K., Thorne, P.W., Ahn, J., Dentener, F.J., Domingues, C.M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D.S., Nnamchi, H.C., Quaas, J., Rivera, J.A., Sathyendranath, S., Smith, S.L., Trewin, B., von Schuckmann, K., & Vose, R.S. (2021). Changing State of the Climate System. 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., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422.

Gutiérrez, J.M., Jones, R.G., Narisma, G.T., Alves, L.M., Amjad, M., Gorodetskaya, I.V., Grose, M., Klutse, N.A.B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D.,



Mearns, L.O., Mernild, S.H., Ngo-Duc, T., Hurk, B.v.d., & Yoon, J.-H. (2021). Atlas. 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. 1927–2058.

Herring, P.J., Campbell, A.K., Whitfield, M., & Maddock, L. (1990). Light and Life in the Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 70, 69, 719–738.

Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton, J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadde, L., Ganopolski, A., & 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.

Hurd, C.L., Cornwall, C.E., Currie, K., Hepburn, C.D., McGraw, C.M., Hunter, K.A., & Boyd, P.W. (2011). Metabolically-induced pH fluctuations by some coastal calcifiers exceed projected 22nd century ocean acidification: a mechanism for differential susceptibility?. *Global Change Biology*, 3262–3254, 17.

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.)].

IPCC-AR6. (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.

Johnson, G. C., & Lumpkin, R. L. (eds.). (2022). *Global Oceans. In: State of the Climate in 2021.* Bulletin of American Meteorological Society, 103 (8), S143–S191.

Keeling, R. F., Körtzinger, A., & Gruber, N. (2010). Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual Review of Marine Science*, 2, 199–229.

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

Kwiatkowski, L., Aumont, O., & Bopp, L. (2018). Consistent trophic amplification of marine biomass declines under climate change. *Global Change Biology*, 25, 218–229.

Kwiatkowski, L., Torres, O., Aumont, O., & Orr, J. C. (2023). Modified future diurnal variability of the global surface ocean CO₂ system. *Global Change Biology*, 29, 982– 997.

Larson, E.J.L., Portmann, R.W., Solomon, S., & Murphy, D.M. (2020). Decadal Attribution of Historic Temperature and Ocean Heat Content Change to Anthropogenic Emissions. *Geophysical Research Letters*, 47(3), e2019GL085905.

Laruelle, G.G., Landschützer, P., Gruber, N., Tison, J.L., Delille, B., & Regnier, P. (2017). Global high-resolution monthly pCO₂ climatology for the coastal ocean derived from neural network interpolation. *Biogeosciences*, 14(19), 4545–4561.

Laurent, A., Fennel, K., Cai, W.J., Huang, W.J. Barbero, L., & Wanninkhof, R. (2017). Eutrophication-induced acidification of coastal waters in the northern Gulf of Mexico: insights into origin and processes from a coupled physical-biogeochemical model. *Geophysical Research Letters*, 44(2), 946– 956.

Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J.P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J.C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S., & Zhou, T. (2021). Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. 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., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672.

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

Lotze, H. K., Tittensor, D. P., Bryndum-Buchholz, A., Eddy, T. D., Cheung, W. W. L., Galbraith, E. D., Baring, M., Barrier, N., Bianchi, D., Blanchard, J. L., Bopp, L., Büchner, M., Bulman, C. M., Carozza, D. A., Christensen, V., Coll, M., Dunne, J. P., Fulton, E. A., Jennings, S., Jones, M. C., Mackinson, S., Maury, O., Niiranen, S., Oliveros-Ramos, R., Roy, T., Fernandes, J. A., Schewe, J., Shin, Y.-J., Silva, T. A. M., Steenbeek, J., Stock, C. A., Verley, P., Volkholz, J., Walker, N. D., & Worm, B. (2019). Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 116, 12907–12912.

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

McKinley, G.A., Pilcher, D.J., Fay, A.R., Lindsay, K., Long, M.C., & Lovenduski, N. (2016). Timescales for detection of trends in the ocean carbon sink. *Nature*, 530, 469–472.

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R., & Campos, E. (2020). Observed ocean bottom temperature variability at four sites in the Northwestern Argentine basin: Evidence of decadal deep/abysal warming amidst hourly to interannual variability during 2009–2019. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089093.

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

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebo, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R., & van Vuuren, D.P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioec-

onomic pathways. *Climatic Change*, 122, 387–400.

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

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

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., & Segschneider, J. (2010). Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis. *Biogeosciences*, 7, 979–1005.

Stock, C. A., Dunne, J. P., & John, J. G. (2014). Drivers of trophic amplification of ocean productivity trends in a changing climate. *Biogeosciences*, 11, 7125–7135.

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., Thiyagarajan, V., Vaughan, M.L.H., Widdicombe, S. & Harley, C.D.G. (2017). Ocean acidification can mediate biodiversity shifts by changing biogenic habitat. *Nature Climate Change*, 7, 81–85.

Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K.B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Meehl, G., Moss, R., Bauer, S.E., Boucher, O., Brovkin, V., Byun, Y.H., Dix, M., Gualdi, S., Guo, H., John, J.G., Khari, S., Kim, Y., Koshiro, T., Ma, L., Olivé, D., Panickal, S., Qiao, F., Rong, X., Rosenbloom, N., Schupfner, M., Séférian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y., & Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12, 253–293.

Torres, O., Kwiatkowski, L., Sutton, A.J., Dorey, N., & Orr, D.J. (2021). Characterizing mean and extreme diurnal variability of ocean CO₂ system variables across marine environments. *Geophysical Research Letters*, 48(5), e2020GL090228.

Trond, K.B., & Momme, B. (2022). An ensemble of



trend preserving statistically downscaled projections for key marine variables under three different future scenarios for the Bay of Biscay (1.0). Zenodo.

Valencia, V., Franco, J., Borja, A., & 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.

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., Gentine, 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., Monier, 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., & Wijffels, S. E. (2020). Heat Stored in the Earth System: Where Does the Energy Go?. *Earth System Science Data*, 15, 1675–1709.

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

