

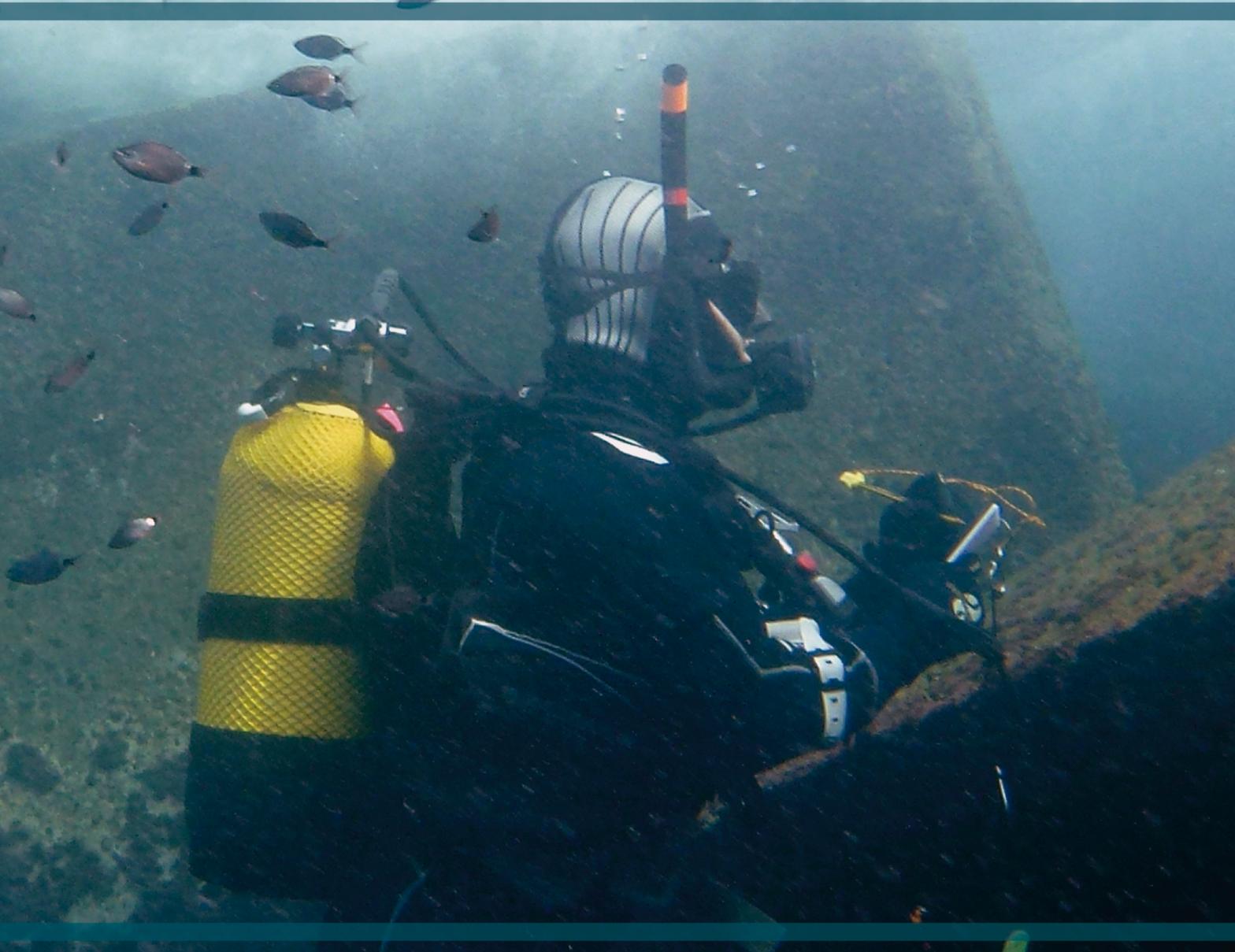
eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Zoobentos rocoso como indicador ambiental en un entorno portuario



Tesis Doctoral

Fco. Javier Tajadura Martín

Leioa 2020

(c) 2020 Javier Tajadura Martín



Zoobentos rocoso como indicador ambiental en un entorno portuario

Tesis doctoral

Fco. Javier Tajadura Martín

Leioa 2020

A mis padres

Agradecimientos

Mi padre, que es un hombre de dichos, refiriéndose a como la gente aborda sus retos en la vida, dice muchas veces: “Arrancada de caballo andaluz, parada de burro manchego”. Esta frase es, literalmente, aplicable a lo que ha sido el desarrollo de mi tesis. Pero al revés. “Arrancada de burro manchego, parada de caballo andaluz”. Y es que esta tesis se ha cocinado a fuego lento. Un par de meses de dedicación y un parón por un informe. Otra semanita disponible por ahí, parón por muestreos. Otros dos meses por allá, nuevo parón por más informes. Y así, año tras año. Una cosa es cierta, el final de esta tesis, como en todas, ha sido eso, un sprint. Uno largo.

Mi etapa junto al grupo de gente a la que tanto tengo que agradecer comenzó un día de “guardia de buzos” en la Cruz Roja del Mar de Arriluze, allá por 1998. Josemi colaboraba ocasionalmente en las inmersiones de unos biólogos marinos de la uni que estudiaban “algas y bichos y cosas de esas” y comentó que estaban buscando estudiantes de Biología. Fue entonces cuando en un laboratorio de prácticas conocí a los zoólogos y los botánicos que se convertirían en compañeros de trabajo y, sorprendentemente pronto, en verdaderos amigos. Ese día, me monté en una furgoneta verde y aparecí en un intermareal con una tablilla y un lápiz, apuntando unos nombres rarísimos que me decían. Mis inicios estuvieron ligados a las algas, estudiando raspados de diatomeas después de las clases. Poco tiempo después quedó vacante una plaza entre los Zoólogos.

**Se necesita alumno de 2º ciclo para el
laboratorio de Zoología.**

Imprescindible estar en posesión de un título de buceo con
escafandra autónoma

Dejar curriculum en el laboratorio de bentos marino, junto al de botánica
(preguntar por Javier Urkiaga o María Bustamante)

Ext. 5498

Y ese cambio sería el definitivo.

Mi primer contacto científico con Iñaki fue en la zona submareal del Abra, en Abasotas. Lo primero que hice bajo el agua la primera vez que me sumergí, fue tocar fondo a plomo debido a la escasa visibilidad y mi sutil aterrizaje creó una nube de sedimento que tardó en desaparecer. Recuerdo a Iñaki señalándome sobre el sustrato los animales que debía ver. Después, revisaba la tablilla con mis pseudo-inventarios y me hacía gestos afirmativos reconfortantes. Tengo muchísimo que agradecer en esos primeros momentos y en los que vinieron después, ya que al tocar su puerta su atención siempre era instantánea, apartando sus papeles de la mesa y dispuesto a ayudar y a guiar mi camino. Mi sincero agradecimiento también va para Txema, el patrón de los botánicos y el responsable del equipo Bentos Marino UPV-EHU. Poco de lo que el equipo hizo antes de mi llegada y de lo que vino después habría sido posible sin su tesón y su visión. Gracias por dedicar tu tiempo y estrujarte el cerebro para que el equipo siga “on the field” hoy en día.

María. El nombre a destacar desde que entré en Zoología. Su calidad e integridad como persona y como investigadora han sido la mejor influencia que alguien puede tener en la mesa de al lado, y esto es algo que no abunda y que he tenido la inmensa suerte de recibir. María ha sido y es una referencia. Su ayuda y consejos con los proyectos, con los quehaceres de nuestro trabajo, tirando del carro de los zoólogos y con esta tesis ha sido determinante. Siempre dispuesta a aportar, sugiriendo el camino correcto y dejando libertad para que yo lo recorriera. Por todo, que es muchísimo, gracias de corazón, María.

Es el turno de los botánicos. Alberto, el propietario por aquél entonces de la VW California verde que nos transportaba a los muestreos de campo. Nuestra relación cuasi-matrimonial se forjó durante largos periodos dando forma al denso informe del Puerto y también bajo las aguas, donde tras muchos años de ser compañeros de buceo, nos entendíamos con sólo mirarnos (en el caso de las oscuras aguas de Santurtzi, con sólo escucharnos respirar). Gracias por los momentos que no puedo olvidar, los personales, los musicales, los acuáticos y los terrestres. Isabela fue la primera persona que estaba en el laboratorio de prácticas cuando llegué el primer día. Aún me acuerdo de sus palabras y de su consejo: “esto te tiene que gustar de verdad”. La experiencia de todos estos años ha revelado que su opinión siempre ha de ser tenida en cuenta. Me quedo con su energía y capacidad de superación incombustible. De ella he aprendido cosas que no se enseñan, y eso hay que agradecerlo. Gracias, pues. Antonio, el taxónomo del equipo y experto en los entresijos informáticos que me transmitió sus conocimientos en la maquetación de los informes, intercambiamos gustos musicales y fue codirector, coguionista y coactor de varios momentazos del equipo que quedaron recogidos en sus montajes de vídeo. Como decía Melanie Griffith: Ancho, che quiero una jartá!!.

Quedan para el recuerdo los buenos momentos vividos con ellos. Las canciones de Alberto. El Niva cargado con los equipos de buceo y remolcando “La Txatina” hasta las rampas de Zierbena. El Niva que no arranca. La ITV. “La Txatina” que tampoco arranca. Los cinco metidos en el Terrano viajando por la costa vasca en los interminables muestreos del Prestige. El transecto plomado infernal. Las salidas de abióticos, con sus días buenos y con los malos, en los que Antonio y yo cambiábamos de color, pero no de actitud... Impagables. Inolvidables. GRACIAS.

Desafortunadamente, el equipo perdió a Antonio y Alberto, que dedicaron su tiempo y conocimientos a otras áreas. Su hueco quedó cubierto con las nuevas incorporaciones en la parte botánica del equipo: Nahiara y Endika. Parece que fue ayer, pero ya llevan muchos años con nosotros. Nahiara es un ejemplo de pura energía, remango, personalidad y gran corazón. Su llegada enriqueció al grupo en muchos aspectos. Ello hace que compartir informe, comidas y muestreos con ella sea un placer. No me puedo olvidar de esas gildas potentes que tienen poderes que reviven a cualquiera. Gracias multidisciplinares, Nahiara. Sobre Endika, con quien comparto gustos humorísticos y ciertas “manías” simpáticas, recayó la responsabilidad sustituir a Alberto como compañero de informe y de muestreos encima y debajo del agua. Doy fé de que no era tarea fácil, pero lo ha conseguido y ambos estamos en la misma onda. Con él, el equipo de Bentos Marino ha quedado completo, engrasado, redondo y funcionando a toda vela. Gracias, Profesor Endi.

Con Xanti, Jose y Urki coincidí poco tiempo, antes de que emprendieran sus propios caminos. Sin embargo, tengo que agradecer la dedicación y la minuciosidad de sus trabajos, ya que me han permitido enriquecer el mío. Iván y yo llegamos al laboratorio a la vez, pero decidió dedicar su esfuerzo a hacer crecer su sueño. Gracias por esos concertazos. A Romel tengo que agradecerle su disposición y ayuda para sacarnos de apuros con los problemas náuticos repentinos. Has salvado unos cuantos muestreos.

Alguien muy importante para los que nos pasamos dos horas trabajando bajo el agua es la persona que se queda a bordo. Tenemos la suerte de que esa persona sea Julen. Con nuestro patrón se ha forjado una gran relación profesional y personal a lo largo de las muchas millas navegadas durante estos años. Se ha convertido en un integrante del grupo de amigos que es el equipo de Bentos Marino. Gracias por vigilar nuestras burbujas desde la superficie, Julen.

No me puedo olvidar de la Autoridad Portuaria de Bilbao. El compromiso y sensibilidad que ha demostrado con el medioambiente desde el año 1994 hasta la actualidad es inusual y, por tanto, hay que agradecerlo doblemente. La cercanía e interés

por el “Plan de Vigilancia Biológica del Puerto de Bilbao” que han mostrado desde siempre en la Autoridad Portuaria personas como Mario es reconfortante, nos enriquece científicamente y hace que nuestro trabajo merezca la pena.

Para ir cerrando este apartado, vuelvo a mis padres. Ellos, me inculcaron desde pequeño la pasión por “lo verde” y son los responsables de que mis pasos se encaminasen hacia la Biología. En mis recuerdos quedan los fines de semana con ellos, mi hermana y, ocasionalmente, mis tíos. Nunca parábamos en casa. Los recorridos por los pueblos de la zona de las Encartaciones, los días de playa, las paellas en Aixerrota y en las campas de La Arboleda, la pesca (con suelta) de zapaburus en las charcas que la minería dejó en los montes de Triano,.. son la base de lo que soy e intento transmitir.

El desarrollo de una vida laboral dedicada a la ciencia, con sus particularidades y altibajos, no es posible si en casa no encuentras un sustrato sólido. Mi soporte incombustible ha sido Dori, animadora y fan que no me permitía relax en temas relacionados con la tesis. Como no podía ser de otra manera, nos conocimos junto a la ría, en Fiestas de Bilbao hace ya 20 años. Desde entonces, nuestro recorrido juntos ha estado lleno de grandes momentos, la mayoría de ellos junto al mar. Te debo la mayor de las gratitudes por este camino, que ha dado como resultado el tesoro más valioso: Laia. Precisamente, Laia llegó cuando estaba inmerso en esta tesis y, a día de hoy, en estos tiempos de confinamiento, me ha ayudado a corregir detalles, a dar los últimos toques a alguna figura y a diseñar la portada. ¡¡Gracias, correctora!! Como hicieron conmigo, trato de mantenerla a distancia del asfalto. Espero que recuerde con ternura los momentos furgoneteros en el terreno, los empujones para pillar olas, las puestas de sol en el acantilado y las buceadas en nuestro sitio secreto de los espirógrafos.

Índice

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	7
1.1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1.1. Área de estudio.....	7
1.1.1.1. Historia del río Nervión y desarrollo del Puerto de Bilbao.....	7
1.1.1.2. Plan Integral de Saneamiento.....	18
1.1.1.3. Invertebrados del zoobentos marino como bioindicadores.....	20
1.1.1.4. Plan de Vigilancia Ambiental.....	22
1.2. OBJETIVOS.....	24
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	27
2.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	27
2.1.1. El “Abra de Bilbao”.....	27
2.1.2. Caracterización climática del area de estudio.....	29
2.1.2.1. Clima y régimen térmico.....	29
2.1.2.2. Régimen de precipitaciones.....	29
2.1.2.3. Circulación atmosférica.....	30
2.1.2.4. Galernas.....	31
2.1.3. Condiciones marinas del entorno portuario.....	31
2.1.3.1. Circulación oceánica, oleaje, régimen de mareas e influencia fluvial.....	31
2.1.3.2. Temperatura del agua superficial.....	33
2.1.4. Red de estudio.....	33
Punta Lucero (PL).....	35
Zierbena (ZI).....	35
Localidades 1 y 2 del Dique de Zierbena (E1 y E2).....	35
Localidades 3, 4 y 5 del Dique de Zierbena (E3, E4 y E5).....	36
Santurtzi (SA).....	36

Ereaga (ER)	36
Arriluze (AL)	37
Arrigunaga (AR)	37
Punta Galea (GA)	37
Kobaron (KO)	38
Matxilando (MA)	38
2.2. ESTRATEGIA DE MUESTREO	39
2.2.1. Muestreo biológico	39
2.2.1.1. Toma de datos	39
2.2.1.2. Parámetros estructurales	41
2.2.1.3. Análisis estadístico multivariable	42
2.2.2. Muestreo físico-químico	44
2.2.2.1. Análisis estadístico multivariable	47
3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL ÁREA DE MUESTREO	49
3.1. INTRODUCCIÓN	49
3.2. MATERIAL Y MÉTODOS	50
3.2.1. Área de estudio	50
3.2.2. Variables analizadas	50
3.2.2. Análisis de datos	52
3.3. RESULTADOS	53
3.3.1. Salinidad	53
3.3.2. Sólidos en suspensión	53
3.3.2.1. Sólidos en suspensión en superficie	53
3.3.2.2. Sólidos en suspensión en fondo	56
3.3.3. Turbidez	58
3.3.3.1. Turbidez en superficie	58
3.3.3.2. Turbidez en fondo	59
3.3.4. Caracterización del área de muestreo en base a los parámetros abióticos	59
3.4. DISCUSIÓN	61
3.4.1. Conclusiones	67
4. EVOLUCIÓN DE LA COMUNIDAD FAUNÍSTICA EN EL “ABRA DE BILBAO”	69
4.1. INTRODUCCIÓN	69
4.2. MATERIAL Y MÉTODOS	73
4.2.1. Área de estudio	73

4.2.2. Diseño experimental.....	73
4.2.3. Análisis estadístico.....	75
4.3. RESULTADOS.....	78
4.3.1. Evolución temporal: cobertura e índices de diversidad.....	78
4.3.1.1. Zona intermareal superior (N1: +3 m.).....	78
4.3.1.2. Zona intermareal intermedia (N2: +1 m.).....	79
4.3.1.3. Zona intermareal inferior (N3: +0,5 m.).....	81
4.3.1.4. Zona submareal somera (N4: -2 m.).....	81
4.3.1.5. Zona submareal intermedia (N5: -4 m.).....	84
4.3.1.6. Zona submareal profunda (N6: -6 m.).....	84
4.3.2. Análisis multivariable.....	86
4.3.2.1. Zona intermareal superior (N1: +3 m.).....	86
4.3.2.2. Zona intermareal intermedia (N2: +1 m.).....	91
4.3.2.3. Zona intermareal inferior (N3: +0,5 m.).....	95
4.3.2.4. Zona submareal somera (N4: -2 m.).....	99
4.3.2.5. Zona submareal intermedia (N5: -4 m.).....	103
4.3.2.6. Zona submareal profunda (N6: -6 m.).....	107
4.3.3. Evolución de los parámetros estructurales de los grupos tróficos.....	111
4.3.4. Análisis de la similitud entre los datos biológicos y las variables ambientales. Modelización de los parámetros abióticos.....	111
4.4. DISCUSIÓN.....	116
4.4.1. Evolución general de la diversidad, índices de diversidad, similitud de las diferentes localidades con las condiciones de referencia, grupos tróficos y modelos de variables ambientales.....	116
4.4.2. Evolución faunística en las comunidades de la zona intermareal.....	121
4.4.2.1. Zona intermareal superior (N1: +3 m.).....	123
4.4.2.2. Zona intermareal intermedia (N2: +1 m.).....	128
4.4.2.3. Zona intermareal inferior (N3: +0,5 m.).....	134
4.4.3. Evolución faunística en las comunidades de la zona submareal.....	139
4.4.3.1. Zona submareal somera (N4: -2 m.).....	140
4.4.3.2. Zona submareal intermedia (N5: -4 m.).....	142
4.4.3.3. Zona submareal profunda (N6: -6 m.).....	146
4.4.4. Conclusiones.....	149

5. VARIABILIDAD ESPECIO-TEMPORAL EN LA DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES EXÓTICAS EN EL “ABRA DE BILBAO”.....	157
5.1. INTRODUCCIÓN.....	157
5.2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	160

5.2.1. Área de estudio.....	160
5.2.2. Diseño experimental.....	161
5.2.3. Clasificación de las especies según su origen y distribución.....	162
5.2.4. Análisis estadístico.....	163
5.3. RESULTADOS.....	163
5.3.1. Área portuaria y localidades control.....	163
5.3.1.1. Zona intermareal superior (N1: +3 m.).....	163
5.3.1.2. Zona intermareal intermedia (N2: +1 m.).....	167
5.3.1.3. Zona intermareal inferior (N3: +0,5 m.).....	170
5.3.1.4. Zona submareal somera (N4: -2 m.).....	175
5.3.1.5. Zona submareal intermedia (N5: -4 m.).....	178
5.3.1.6. Zona submareal profunda (N6: -6 m.).....	182
5.3.1.7. Diferencias batimétricas en el periodo de estudio.....	185
5.3.2. Escollera de Zierbena.....	189
5.3.2.1. Zona intermareal superior (N1: +3 m.).....	189
5.3.2.2. Zona intermareal intermedia (N2: +1 m.).....	192
5.3.2.3. Zona intermareal inferior (N3: +0,5 m.).....	194
5.3.2.4. Zona submareal somera (N4: -2 m.).....	197
5.3.2.5. Zona submareal intermedia (N5: -4 m.).....	200
5.3.2.6. Zona submareal profunda (N6: -6 m.).....	203
5.3.2.7. Diferencias batimétricas en el periodo de estudio.....	206
5.4. DISCUSIÓN.....	209
5.4.1. Especies exóticas.....	215
5.4.2. Especies criptogénicas.....	220
5.4.3. Ordenación espacial y temporal de las comunidades en base a las especies exóticas y criptogénicas.....	223
5.4.4. Conclusiones.....	224
6. CONCLUSIONES.....	227
ANEXO I. INVENTARIOS.....	231
ANEXO II. ANEXO FOTOGRÁFICO.....	275
ANEXO III. BIBLIOGRAFÍA.....	289

Resumen

Esta tesis tiene como base los trabajos de investigación iniciados en 1994, cuando la Autoridad Portuaria de Bilbao estableció un convenio de colaboración con la UPV/EHU para el desarrollo del “Plan de Vigilancia Biológica del Puerto de Bilbao” con el fin de analizar las variaciones espaciales y temporales de las comunidades bentónicas de sustrato duro del área de estudio. Sin duda, el tráfico marítimo y las actividades portuarias asociadas son parte fundamental en el modelo socioeconómico actual. No obstante, suponen un riesgo para la salud y estabilidad del ecosistema marino, por lo que la vigilancia y control ambiental de estas áreas es de vital importancia. El papel de los invertebrados marinos en este entorno es determinante, ya que son susceptibles de sufrir los efectos de la presión antrópica convirtiéndose en excelentes indicadores de la salud del ecosistema. A través del estudio detallado del zoobentos de sustrato duro y apoyadas en un extenso trabajo de muestreo intermareal y submareal, las investigaciones llevadas a cabo en esta tesis aportan información sobre la evolución de la salud del ecosistema portuario a lo largo de 16 años.

La zona de estudio presenta diversas particularidades que afectan de manera directa a las variables ambientales físicas y químicas del agua y por lo tanto, a las comunidades zoobentónicas. Por un lado, se localiza en la desembocadura del río Nervión, que de forma natural esta expuesta a unas condiciones ambientales estresantes al recibir los aportes fluviales de la masa de agua dulce. Por otro lado, desde mediados del s. XIX, la fuerte industrialización y el crecimiento demográfico que experimentó este área durante el siglo siguiente provocó una intensa polución en la zona que transformó a la ría en una cloaca anóxica y carente de vida. Ante esta situación extrema, surgió la necesidad de mejorar la calidad de las aguas y recuperar el estuario. En 1979, el Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia esbozó el Plan Director de Saneamiento con varios objetivos definidos, entre los que destacaron la reducción de los vertidos tóxicos generados por la industria y la recuperación de la vida asociada al cauce. Aunque la zona objeto de estudio se ha visto beneficiada en el proceso de regeneración, el propio desarrollo de las instalaciones y actividades portuarias son

factores que potencialmente pueden generar un impacto en el ecosistema.

En este contexto, el carácter bioindicador del zoobentos rocoso resulta de especial interés. Por un lado, su naturaleza sésil le otorga una excepcional capacidad para integrar las condiciones del medio. Además, ante cambios ambientales posee una elevada capacidad de respuesta, variando su distribución y abundancia. Los trabajos de vigilancia ambiental a largo plazo han mostrado su utilidad para evaluar tanto el efecto de la contaminación, como los procesos de recuperación ambiental o incluso los impactos climáticos más recientes. De este modo, los esfuerzos de la Autoridad Portuaria de Bilbao son reseñables, dando una continuidad anual al Plan de Vigilancia Ambiental hasta la actualidad. Así, la extensa serie temporal de datos científicos generada en el área de estudio se ha convertido en una base sólida sobre la que poder determinar el estado ambiental de la bahía y aportar conocimiento sobre patrones de cambio y respuesta del ecosistema bentónico.

El objetivo general de esta tesis ha sido investigar la variabilidad espacio-temporal de los parámetros físico-químicos y de las comunidades faunísticas de sustrato duro en el entorno portuario entre las campañas 1994 y 2009, analizando la relación entre ambas matrices de datos, y poniendo un especial interés en la distribución, evolución e influencia de las especies exóticas en el

área de estudio. Para obtener un conocimiento detallado sobre el ecosistema, los análisis se han llevado a cabo en el intermareal y en el submareal de las localidades seleccionadas, en un total de seis niveles batimétricos diferenciados: +3 metros (N1), +1 metro (N2), +0,5 metros (N3), -2 metros (N4), -4 metros (N5) y -6 metros (N6).

Las variables físico-químicas de la columna de agua determinan en gran medida la composición de la comunidad faunística y su distribución. Este hecho es excepcionalmente relevante en el área de estudio, que a pesar de no ser una zona muy extensa, presenta una alta variabilidad espacial y temporal en sus condiciones ambientales. Para su caracterización, se ha llevado a cabo la recogida de datos de salinidad, turbidez y sólidos en suspensión durante el periodo 2000-2009, realizando sistemáticamente 4 campañas anuales en primavera, verano, otoño e invierno, en un total de 12 localidades. De ellas, diez se encuentran situadas dentro del área portuario en la zona conocida como “Abra de Bilbao” (Punta Lucero, Zierbena, estaciones E1, E3 y E5 del Dique de Zierbena, Santurtzi, Arriluze, Ereaga, Arrigunaga y Punta Galea). Las dos restantes, situadas fuera de esta zona, son consideradas como controles (Kobaron, Matxilando). Asimismo, se ha estimado el grado de hidrodinamismo de cada localidad. El análisis de ordenación multivariable de los datos revela la existencia de 3 grupos de localidades principales que corresponden

a tres sectores definidos en el área de muestreo y que pueden ser considerados como un modelo general para el “Abra de Bilbao”. El Sector 1 (Abra interior) incluye a Santurtzi y Arriluze, caracterizadas por haber presentado los valores de salinidad más bajos del área de estudio, así como registros elevados y heterogéneos de sólidos en suspensión y turbidez, tanto en superficie como en fondo. El Sector 2 (margen derecha del Abra exterior) incluye a Ereaga, Arriluze y Punta Galea, con niveles intermedios en relación a las variables ambientales analizadas. Finalmente, el Sector 3 (margen izquierda del Abra exterior, y localidades control), con Punta Lucero, Zierbena, Escolleras 1, 3 y 5, Kobaron y Matxilando, ha presentado los valores más altos de salinidad y los más bajos de sólidos en suspensión y turbidez, así como una menor variabilidad temporal. Estos resultados reflejan en parte el efecto esperado del estuario, con una mayor salinidad a medida que aumenta la distancia a la desembocadura, y con unos registros de sólidos en suspensión y turbidez más elevados al reducirse ésta.

Para determinar la variabilidad espacio-temporal de las comunidades zoobentónicas del área de estudio, se han utilizado los inventarios realizados de forma bienal durante el periodo 1996-2008 en las localidades Punta Lucero, Zierbena, Santurtzi, Arriluze, Ereaga, Arriluze, Punta Galea, Kobaron y Matxilando. Mediante el análisis de la diversidad y el uso de diversas técnicas

multivariables se ha investigado patrones espaciales y temporales entre las localidades. Asimismo, se ha analizado la relación espacio-temporal entre las especies con objeto de identificar grupos de invertebrados que pudieran variar de forma simultánea. Finalmente, se ha explorado la relación existente entre la matriz de datos biológicos y la de variables ambientales. Los resultados revelan síntomas de mejora ambiental durante el periodo estudiado en los 6 niveles muestreados, caracterizados por el aumento de la diversidad, por el retroceso de especies oportunistas y de invertebrados de estrategia filtradora, así como una por mayor similitud entre las estaciones del área portuaria y las estaciones control. Las principales diferencias temporales encontradas en las comunidades faunísticas del área de muestreo vienen dadas por la mejora de la calidad de las aguas fluviales tras la puesta en marcha de los sucesivos tratamientos de depuración, con una menor influencia de las operaciones llevadas a cabo en el puerto. El efecto de éste último, queda referido a afecciones puntuales ocasionadas por las obras, a la propia actividad portuaria (dragados, operaciones de buques,...) y a la construcción de estructuras artificiales que han sustituido las superficies naturales, creando nuevos hábitats que han sido colonizados de manera progresiva por la fauna.

En cuanto a la relación entre las variables biológicas y ambientales,

destaca como las diferencias espaciales entre estaciones vienen dadas por estar en mayor o menor medida afectadas por la descarga de la ría. Este gradiente es evidente en los análisis de ordenación multivariantes realizados, tanto para las variables ambientales, como para las biológicas, donde se ha obtenido un claro patrón geográfico entre estaciones desde la desembocadura de la ría hasta mar abierto. A pesar de esto, la matriz de parámetros físico-químicos no ha presentado un ajuste elevado con la matriz de datos biológicos. No obstante, se ha podido determinar que la turbidez y el hidrodinamismo han sido los parámetros abióticos con una mayor influencia en las variaciones experimentadas por la fauna desde el nivel intermareal intermedio hasta el submareal profundo. En el horizonte intermareal superior, sin embargo, los factores ambientales más influyentes han sido la salinidad y el hidrodinamismo.

Actualmente, una de las principales amenazas para el ecosistema marino es la introducción de especies exóticas. Teniendo en cuenta que el transporte naval es el principal vector de distribución de estos organismos en el medio marino, su estudio en la presente tesis resulta de especial interés. El análisis de la distribución y evolución de las especies exóticas en el área de estudio se ha realizado a través de 16 campañas anuales entre 1994 y 2009, en Punta Lucero, Zierbena, Santurtzi, Arriluze, Ereaga, Arriluze y Punta Galea. Los

inventarios de las localidades control (Kobaron y Matxilando) se realizaron bienalmente entre las campañas 1996 y 2008. Para un análisis detallado sobre el proceso de colonización de éstas especies en bloques recientemente introducidos se han realizado inventarios en la escollera de Zierbena entre 1997 y 2009, también cada dos años. En la lista de especies obtenida, cada invertebrado ha sido clasificado en cuatro grupos atendiendo a su rango de distribución, según sea una especie nativa, exótica, criptogénica o indeterminada. Se ha analizado la abundancia y riqueza específica de cada grupo de especies y se ha estudiado la estructura de la comunidad mediante diferentes técnicas multivariantes. Los resultados constatan que el ratio de la diversidad de especies exóticas:nativas en las localidades del entorno portuario es menor respecto a la media europea en zonas estuáricas. En las localidades control, este ratio también es menor a los valores promedio de las zonas costeras de Europa. A pesar de que se detectó la presencia puntual y escasa de especies exóticas en el área de estudio desde 1994, el registro más significativo de estos invertebrados (*Amphibalanus amphitrite*, *Austrominius modestus*, *Bugula neritina* y *Styela plicata*) se ha observado en la época más reciente (2004-2009), siendo ligeramente más abundantes en la zona submareal que en la intermareal. En la escollera de Zierbena destaca cómo la entrada generalizada de las especies exóticas (*Amphibalanus amphitrite*, *Austrominius modestus* y

Styela plicata) no se produjo hasta la Campaña 2007 y fue en todos los niveles de marea estudiados, salvo N1. Estos resultados ponen de manifiesto que el nivel más alto de marea es menos proclive al asentamiento de especies exóticas, mientras que el resto de niveles batimétricos son susceptibles de ser colonizados de igual manera. Además, el nuevo sustrato disponible que ofrecían los bloques de escollera recién colocados o la edad del sustrato no parecen ser factores determinantes en el asentamiento de estas especies. Por otro lado, se ha detectado un mayor establecimiento de especies exóticas en las localidades del Abra interior. Este resultado podría estar relacionado con una menor renovación de las aguas debido al escaso hidrodinamismo en esta zona y con un mayor estrés natural ambiental, que en combinación con el carácter oportunista de estas especies, ha resultado favorable para su asentamiento. No obstante, en todo el área de estudio, la aparición de especies foráneas no ha mostrado una influencia destacable a la hora de determinar las diferentes agrupaciones de estaciones y campañas, ni ha repercutido en el registro de cambios biológicos o físicos en el ecosistema. Tampoco se ha observado un desarrollo masivo de las especies con potencial invasor, o al menos no de un modo permanente. Sin embargo, dado los eficaces mecanismos de expansión de las especies exóticas invasoras y ante el escenario actual de cambio climático, los estudios de monitoring se revelan como

un importante sensor de alerta temprana ante posibles desarrollos masivos de estos invertebrados.



Introducción y Objetivos

1.1. INTRODUCCIÓN

Los núcleos poblacionales tienden a asentarse en las inmediaciones de la costa (Little et al. 2010), lo que repercute directamente en los aportes de nutrientes y sustancias de desecho al medio marino (Belzunze 2004, García-Barcina et al. 2006, Arévalo et al. 2007, Halpern et al. 2007, Bustamante 2012, Mearns et al. 2015). Por ello, las zonas costeras se encuentran entre las más afectadas por factores antropogénicos (Halpern et al. 2019) que inciden en la biodiversidad y en el funcionamiento de los ecosistemas (Garaffo et al. 2018).

1.1.1. Área de estudio

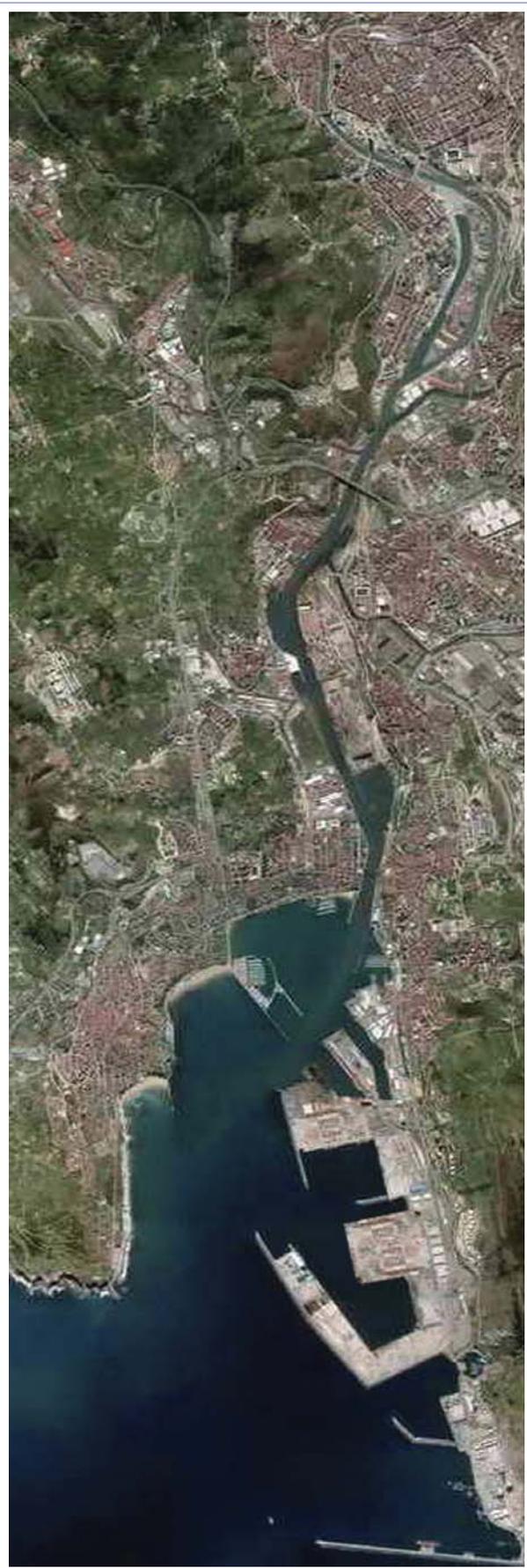
1.1.1.1 Historia del río Nervión y desarrollo del Puerto de Bilbao

El origen más probable del río Nervión se relaciona con la Falla de Otxandiano, que provocó la diferenciación de los bloques rocosos que finalmente conformarían ambos márgenes, debido a que los materiales de la margen derecha eran geológicamente más recientes (Cretácico superior y Paleógeno) que los de la izquierda (Cretácico inferior), según Leorri y

Cearreta (2009). A partir de entonces, la morfología y el relieve del cauce formado alrededor del río Nervión ha ido evolucionando lenta e imperceptiblemente debido a los efectos combinados de la erosión, la sedimentación y la acción del mar.

El área en la que se desarrolla el estuario incluye el curso bajo del río Nervión, que registra cambios en el nivel de marea, y la zona del Abra, durante los 23 Km. que separan San Antón (Bilbao) de Punta Lucero (Zierbena, con los ríos Kadagua, Asua, Galindo y Gobelas como principales afluentes (Cearreta 1992)

No obstante, el aspecto que presenta la cuenca en la actualidad (Figura 1.1) se debe casi en exclusiva a la intervención humana (Cearreta 2004, García-Barcina et al. 2006). De hecho, existe una fuerte relación entre Bilbao y el río, ya que la ciudad nació junto al primer tramo navegable del Nervión. El núcleo poblacional más antiguo en la zona data del año 1075 en torno a una pequeña iglesia de Santurtzi, lugar de reunión de reducidos grupos de pescadores. Originariamente, en sus orillas se establecían campos, pastos, playas, y marismas, así como modestas viviendas desde Portugalete hasta Lutxana. (Fernández de Pinedo 2006).



Durante la Edad media (s.V - s.XV), la actividad económica de Bizkaia se basó principalmente en los puertos (Fernández de Pinedo 2006), con el notable incremento de las actividades comerciales marítimas que dieron lugar a la fundación de la Villa de Bilbao en 1300, un reducto formado por siete calles paralelas y diversas edificaciones como la Casa Consistorial, el Consulado, la Plaza Vieja o el Mercado, protegidas de navegantes, corsarios y piratas por un recinto amurallado (Santos 2003). A la altura de San Antón, se podía cruzar a pie entre ambas orillas cuando bajaba la marea, por lo que según la carta Puebla de Bilbao (Santos 2003), el puerto, entendido como primer asentamiento de pescadores y comerciantes, se ubicaba en ese punto. Como consecuencia del intenso comercio, en 1322 se fundó la cercana Villa de Portugalete, que también recibió su carta Puebla (Dacosta 2002) y empezó a comerciar junto a Bilbao, gracias a su próspero puerto que presentaba una localización privilegiada y estratégica. Así, bastaba esperar a la pleamar para superar la barra de arena que obstruía el Abra y permitía acceder a su muelle. Por el contrario, la aproximación al puerto de Bilbao requería de un largo y accidentado periodo de navegación (Figura 1.2).

Figura 1.1. Aspecto actual del cauce del río Nervión y localización del Puerto de Bilbao y del área de estudio en la zona de la desembocadura. Fuente: uniportbilbao.es.

Durante la época anterior al s.XVI, el mar se adentraba en el río sin encontrar obstáculos artificiales, por lo que el Nervión presentaba un cauce que discurría entre meandros, rocas y bancos de arena. No obstante, su fisonomía cambiaba dependiendo del nivel de marea.

Entre los bancos de arena destacaba la llamada “barra” de Portugalete (Figura 1.3), que provocó numerosos accidentes navales debido a su morfología variable. El 22 de junio de 1511 se fundó el Consulado, Casa de Contratación y Juzgado de los Hombres de Negocio del Mar y Tierra y Universidad



Figura 1.2. Ilustración que refleja la fisonomía original del río Nervión y sus alrededores en el año 1441, época previa a los profundos cambios de origen antrópico acontecidos en siglos posteriores. Fuente: euskonews.eus



Figura 1.3. Ilustración del S. XVII que muestra el modo en que el tráfico naval debía atravesar los bancos de arena acumulados en la desembocadura del río Nervión durante el periodo de pleamar. Fuente: Ayuntamiento de Portugalete.

de Bilbao (García-Fernández 2006), que gestionaría en adelante la adecuación del puerto interior, mediante la edificación de muelles y realización de dragados. También trató de resolver el problema de la “barra” de Portugalete con la construcción de los muelles de Portugalete, Las Arenas y la Mojijonera y con el desvío de la desembocadura del cercano río Gobelás (Cearreta 1992, Arranz 2012).

En 1547, los acuerdos alcanzados entre la Villa de Portugalete y la Universidad de mercaderes en Burgos, promovieron que las sacas de lana que llegaban de Castilla por el camino de las Encartaciones embarcaran en Portugalete para ser exportadas a Inglaterra, Francia, Holanda y Hamburgo (Serrano 2002, García-Fernández 2006).

A partir del siglo XVI, las márgenes del río se convirtieron en el origen de distribución de numerosas mercancías hacia el interior de la península y hacia distintos puertos del mundo, registrando Bilbao y Portugalete el monopolio del comercio terrestre y marítimo de Bizkaia, generándose una red de marineros, maestros de nao y comerciantes en la zona (García-Fernández 2004). Posteriormente, el apoyo que obtuvo la flota bilbaína procedente de la monarquía y la mejor conexión existente entre Bilbao y el interior de Castilla (Inclán 2006) permitió que los muelles del Arenal gestionaran todas las actividades (Guiard-Larrauri 1913, García-Fernández 2004) e impulsó la realización de diferentes obras para mejora del cauce. Así, en 1654 nace

la isla de Uribitarte para tratar de evitar las frecuentes inundaciones que sufría la Villa de Bilbao. En aquellos tiempos, en las riberas de la ría se imponían las actividades agrarias (Serrano 2002), siendo la vega de Desertu (Barakaldo) la más productiva de Bizkaia, debido a su fértil suelo y a la calidad del agua de regadío. También abundaba la pesca para consumo propio, e incluso se tiene constancia de algún varamiento de ballenas en la zona de Lutxana (Fernández y Olabuénaga 2015).

Casi un siglo después, en 1753, se canaliza el tramo comprendido entre Desertu (Barakaldo) y Portugalete, con la construcción de tres nuevos muelles en La Benedicta (Sestao), en Las Arenas-Axpe y en Olabeaga (Figuras 1.4 y 1.5). Estas actuaciones repercutieron en una mayor accesibilidad de los buques al canal (Fernández y Olabuénaga 2015).

Esta época marca un hito importante en la historia de la ría y en sus actividades asociadas que afectó a Bilbao y de forma general a Bizkaia. La economía de la zona, basada principalmente en el comercio tradicional de lana y en las antiguas ferrerías, daría paso a la moderna industrialización, especialmente en el ámbito siderometalúrgico (Serrano 2006), en la explotación minera y en el transporte marítimo, todos ellos con una fuerte dependencia de la ría.

Así, en torno al año 1865, comenzó una frenética actividad minera en la zona (Serrano 2006) ante la notable demanda de mineral de hierro. El principal mercado fue Inglaterra, seguido de Francia

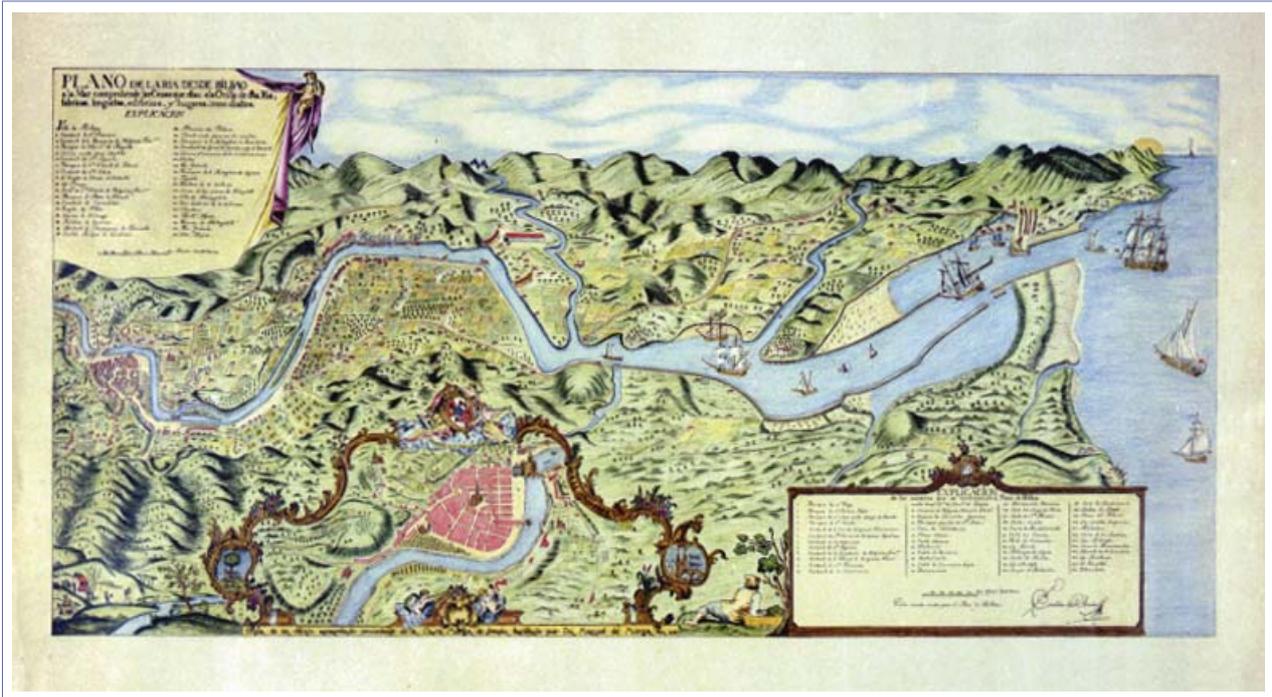


Figura 1.4. Ilustración de la fisonomía del cauce en el s.XVIII, que incluye las primeras modificaciones antrópicas, destacando la construcción de los muelles de Sestao y Axpe. FUENTE: apps.euskadi.eus.

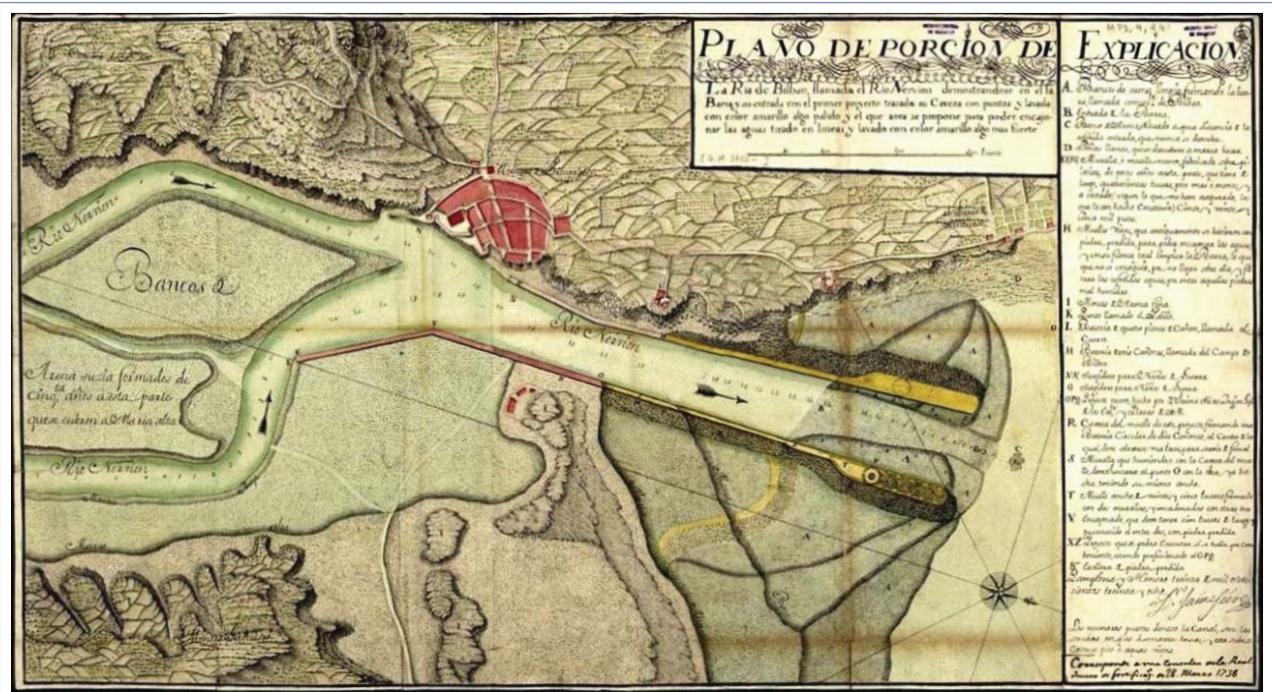


Figura 1.5. Ilustración en detalle de la zona de la desembocadura del río Nervión en 1738 que incluye la situación de las localidades de Portugalete y las Arenas en ambas márgenes, de los bancos de arena existentes en la época y de los muelles construidos. FUENTE: Catálogo colectivo de la red de bibliotecas de los archivos estatales.

(Bretaña, Normandía, Aquitania, Bayona), Bélgica (Brujas, Amberes), Italia (Génova, Florencia, Pisa) y Alemania, lo que impulsó la actividad siderúrgica vasca (Serrano 2002, García-Fernández 2006). Los ferrones de los montes de Miribilla (minas de la Peña, Miribilla, el Morro e Iturrigorri) y Triano, eran ricos en mineral de hierro no fosfórico (Serrano 2002, Arranz 2012), muy apreciado para la obtención de acero mediante el método Bessemer, por lo que surgen diversas compañías mineras que explotan los ferrones y el entorno se adapta rápidamente ante el súbito crecimiento de esta actividad. El problema del transporte del mineral desde los montes hasta la ría se solucionó con la construcción de importantes ferrocarriles mineros, siendo el de Triano el primer ejemplo en 1863 (Serrano 2006). Además, las compañías más potentes desarrollaron un sistema de carga de mineral en los muelles. De modo simultáneo, también aumentaron las actividades relacionadas con el comercio de importación, con productos como el bacalao nórdico y diferentes artículos procedentes del Atlántico y de las colonias americanas (Serrano 2012).

Para 1844, las márgenes de la ría ya se encontraban prácticamente canalizadas (Cearreta 1992, Arranz 2012), debido a las sucesivas actuaciones del Consorcio (Figura 1.6), aunque a partir de entonces la gestión de la ría recayó en la Dirección de Obras Públicas del Ministerio de Fomento. No obstante, en 1872 surgió la Junta de Obras del Puerto y Ría de Bilbao, que reunía a navieros,

industriales, mineros y comerciantes y cuyo cometido también incluía la mejora de la ría y el puerto (Serrano 2012). Ante el aumento de los requerimientos comerciales, la Junta acometió una nueva adecuación del cauce bajo la dirección del ingeniero D. Evaristo de Churruca. Su máxima prioridad consistía en eliminar de forma definitiva la barra de arena de Portugalete, debido al fracaso del primer intento en 1502. Esta barra se formaba debido al movimiento circular de la arena de la playa de Las Arenas que, arrastrada por la corriente de marea en pleamar, se adentraba 3 Km. en el cauce con la corriente entrante y se depositaba nuevamente en la desembocadura con la corriente vaciante de la bajamar (Cearreta 1992, Arranz 2012). Su eliminación definitiva data de 1877, con la construcción de un dique de 800 m. de longitud denominado “Muelle de Hierro de Portugalete”, que modificó las condiciones hidrodinámicas de la zona forzando a la corriente vaciante a depositar la arena que transportaba en mar abierto (Cearreta 1992, Arranz 2012). Además, se creó un cauce fijo (Serrano 2012) y más profundo (Figura 1.6), permitiendo la navegación de buques de mayor tamaño (hasta 100.000 toneladas de desplazamiento y 25 pies de calado). La construcción del muelle también contribuyó a evitar las inundaciones periódicas en la zona y abarató notablemente el transporte de millones de toneladas de mineral de hierro a Inglaterra (Santos 2003). El tránsito de barcos de mayores dimensiones brindó la

posibilidad de transporte de nuevos materiales y supuso la apertura de numerosas empresas que favorecieron del desarrollo de la industria siderometalúrgica, gracias a la importación de grandes cantidades de carbón procedente de Inglaterra. Esta nueva actividad emergente transformó profundamente a las pequeñas localidades que se establecían en ambas márgenes del cauce, como en el caso de Desertu (Barakaldo), con la ubicación del “Horno Alto Nuestra Señora del Carmen” en 1854. Esta factoría experimentó un marcado crecimiento en las siguientes décadas y, en 1882, tras convertirse en sociedad anónima y cambiar su nombre a “Altos Hornos y Fábrica de Hierro y Acero de Bilbao”, abarcaba un área de 100 hectáreas entre Ansio, Galindo y Santurtzi, incluyendo un muelle de 5 kilómetros, y contaba con 15.000 empleados (Serrano 2002). A partir de

entonces, surgieron numerosos negocios auxiliares ante la oportunidad que suponían los diversos requerimientos de esta industria emergente. Esto implicó el desarrollo de la margen izquierda, con la apertura de novedosos astilleros, cementeras, fábricas de electricidad, textiles y de materiales de construcción, conserveras y talleres mecánicos y de suministros. Estas actividades contribuyeron directamente a la modernización industrial de Bizkaia (Serrano 2006) y crearon nuevos puestos de trabajo para los habitantes de las localidades cercanas. La gran demanda laboral provocó un éxodo masivo hacia distintos barrios como San Nicolás, Atxuri, Bilbao La Vieja y San Francisco (Cearreta 1992, Arranz 2012), que transformaron a Bilbao en una de las ciudades más pobladas de España (Serrano 2002). Un ejemplo de asentamiento profundamente alterado fue



Figura 1.6. Plano del cauce de la ría y del Abra de Bilbao en 1889. Incluye cotas batimétricas, accidentes naturales y diagramas de los diferentes muelles y construcciones portuarias. FUENTE: Bibliothèque Nationale de France.

Lutxana que, según escritos datados en torno a 1876, pasó de ser un tranquilo valle bañado por una playa, a albergar el final de trayecto de dos importantes líneas del ferrocarril minero que provenían de La Orconera y del Regato (Fernández de Pinedo 2006). Los pequeños negocios familiares también experimentaron un gran auge, debido a la actividad relacionada con la ría, a la financiación proveniente de nobles y burgueses y a la gran cantidad de trabajadores (Serrano 2006) que residían en los nuevos barrios creados específicamente para acogerlos. La masificación poblacional implicó la creación de nuevas y numerosas instalaciones como escuelas, mercados o iglesias.

No cabe duda de que las adaptaciones llevadas a cabo en ambos márgenes del río Nervión para adecuarse al desarrollo industrial (Figura 1.7) fueron parte fundamental su éxito. No obstante, la construcción del Puerto Exterior en la zona denominada “El Abra” supuso el crecimiento más acusado de la actividad portuaria, moldeando el entorno para convertirlo en lo que hoy en día es el área de estudio del presente trabajo, muy distinto del paisaje natural que la zona presentaba siglos atrás. En esta tarea se concentraron los esfuerzos de la Junta de Obras del Puerto en 1877 (Serrano 2006).

La ubicación del Puerto de Bilbao en la zona externa del estuario guarda una relación directa con las empresas mineras, principales beneficiarias del nuevo espacio generado. En 1902, estas compañías financiaron la construcción del

dique de Santurtzi y del contradique de Algorta mediante la aportación de un impuesto suplementario de un real por cada tonelada procesada. Ambas estructuras convirtieron al Puerto de Bilbao en uno de los más vanguardistas y seguros del Golfo de Bizkaia, con calados que oscilaban entre los 9 y los 15 m. (Serrano 2012) e incluyeron a Santurtzi y a Portugalete dentro de su estructura, perdiendo esta última localidad su carácter turístico, debido a la desaparición de su playa (González 2001). Finalmente, esta obra contribuyó a eliminar de forma permanente la acumulación de arena en la desembocadura, ya que ésta se depositaba en la cercana playa de Ereaga (Arranz 2012, Cearreta 1992) debido a la modificación del flujo hidráulico.

Las diferentes actividades llevadas a cabo en el puerto quedaban asignadas a tres áreas principales. Así, en la zona superior del cauce se asentaban grandes almacenes de madera, vino y bacalao. La zona inferior acogía las actividades industriales, destacando los cargaderos de mineral, astilleros y diversas empresas dentro del ámbito químico y siderúrgico. Finalmente, el principal uso del puerto exterior de nueva construcción consistía en conectar de un modo eficaz a las dos zonas internas con el mercado internacional. Para alcanzar este fin, se inició la edificación de grandes depósitos para almacenar los diversos materiales requeridos por la industria y para las mercancías exportadas (Serrano 2006).

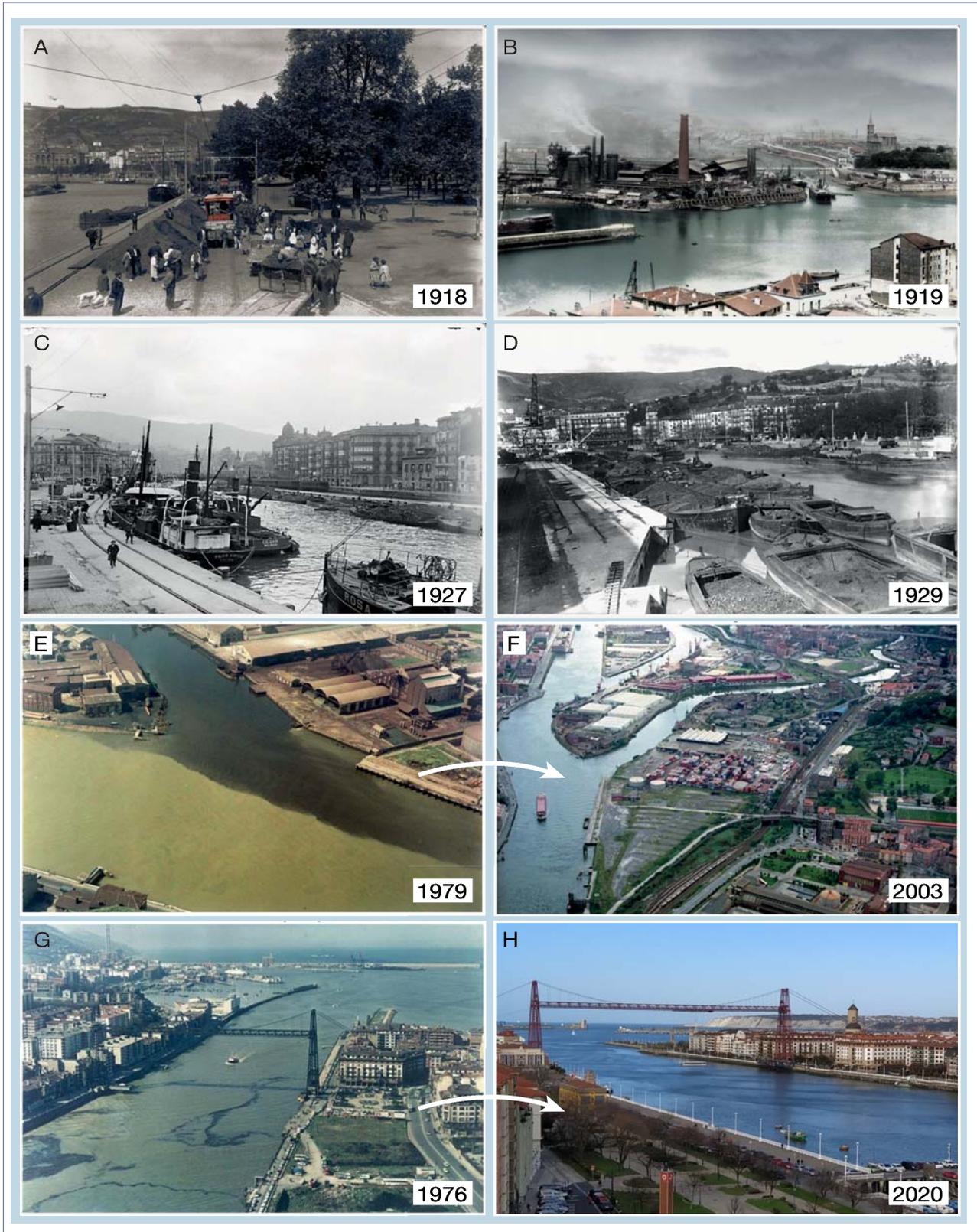


Figura 1.7. Evolución temporal del entorno del río Nervión. A. Muelle del Arenal (Bilbao). B. Altos Hornos y Fábrica de Hierro y Acero de Bilbao en Dársena de Portu (Sestao). C. Embarcaciones en el Muelle de Sendija (Bilbao). D. Gabarras de carbón en el muelle de Ripa (Bilbao). E. y F. Confluencia del afluente Kadagua en el río Nervión. G. y H. Zona de la desembocadura del río Nervión. Fuentes: A, B, C, D (bilbaoport.eus), E, F, G (bilbaoenconstruccion.com), H (J. Tajadura).

En 1928 continúan las obras de adecuación del cauce, con la construcción de un muelle de servicio en Zorroza. No obstante, el aumento progresivo del tamaño de los buques generaba la necesidad de disponer de áreas con mayor calado y protegidas del oleaje, condiciones que no se daban en las zonas existentes hasta el momento. Por ello, la planificación y los recursos disponibles se focalizaron en el desarrollo de un puerto externo (Serrano 2012) en una zona llamada “Abra Exterior” (bilbaoport.eus). Esta nueva zona quedó delimitada entre 1971 y 1975 con la construcción del Dique de Punta Lucero en base al “Acuerdo de Muñatones”, acordado por Petronor S.A. y el Ministerio de Obras Públicas. Según este tratado, Petronor asumía la financiación de una parte de la obra a cambio de una concesión de explotación de los atraques del dique por un periodo de 50 años. Mientras se procedía a su construcción, el amarre de los buques petroleros tenía lugar en el nuevo Espigón N°2 de Santurtzi, que entró en servicio en 1972.

En 1975 se inaugura el Dique de Punta Lucero, siendo un referente a nivel mundial debido a su longitud, su calado y al intenso hidrodinamismo que debía soportar. En ese mismo año comienza la edificación del Dique de Punta Galea en la margen contraria, con el relleno del asentamiento del dique en el fondo y la colocación de los primeros bloques de la estructura que formaba el comienzo del mismo. El objetivo principal de este proyecto era proteger al puerto exterior

del oleaje de componente norte. No obstante, los planes cambiaron drásticamente en 1976, cuando un temporal de extrema dureza generó olas que alcanzaron los 16 metros y forzó la suspensión definitiva de las obras del Dique de Punta Galea (Santos 2003). El temporal también afectó notablemente al Dique de Punta Lucero, cuya estructura se reforzó en 1980, añadiendo bloques de 150 toneladas que complementaban a los originales de 65 toneladas.

Hasta la fecha, el suelo portuario existente ofrecía 12 Km. de muelles y dos millones de metros cuadrados de superficie útil. La intensidad del tráfico por vía marítima continuaba creciendo, y teniendo en cuenta que el Puerto de Bilbao se ubica dentro de un enclave estratégico para la navegación en Europa occidental llamado “Arco Atlántico”, se decidió expandir los servicios del puerto mediante el Plan de Ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra Exterior, que fue remitido al Ministerio de Obras Públicas y se aprobó en 1986. La ampliación se llevó a cabo en tres fases orientadas a aumentar en 5 Km² el suelo útil disponible.

La primera de ellas se llevó a cabo entre 1991 y 1998. Durante este periodo se construyó en Santurtzi el Muelle A1, de 880 m. de longitud y con un calado de 20 m. En este muelle, que se complementaba con un contradique de 1,5 Km. de longitud, se localizaba una terminal para contenedores. En 1995 comenzó la edificación del Dique de Zierbena, una estructura realizada con

bloques cúbicos de hormigón cuyo testero se situaba a la derecha del puerto pesquero de Zierbena y que se adentraba en el Abra durante 1 Km. En 1996, el dique se complementó con un contradique de 2,5 Km. que discurría paralelo a costa (Santos 2003) y cuya construcción concluyó a mediados de 1997, dando lugar a una dársena interna con nuevo suelo útil.

La segunda fase abarcó el periodo 1999-2002, en el que destaca en el año 2000 la construcción del Muelle A-2 que, con una longitud de 700 m. y un calado que alcanza los 30 m., completaba la zona de contenedores del Muelle A-1. En 2002 entra en servicio el pantalán de Punta Sollana. La tercera fase data del periodo comprendido entre 2003 y 2006. Entre las actuaciones más destacables figuran la construcción del Muelle A-3, los accesos multimodales ferroviarios y las eficientes conexiones para el transporte de mercancías por carretera (Figura 1.8).

Con posterioridad a las citadas actuaciones, y hasta la actualidad, la superficie útil del Puerto de Bilbao ha continuado creciendo para albergar nuevas instalaciones, principalmente en el área delimitada por el dique y contradique de Zierbena y el contradique de Santurtzi.

Una vez conocido el pasado industrial de la zona y la historia del desarrollo del puerto, queda enmarcar en el estudio la importancia de los planes de vigilancia a largo plazo y de los invertebrados como indicadores de cambios ambientales. Precisamente, la fuerte industrialización que experimentaron las márgenes del río Nervión en los 25 Km. finales del cauce durante aproximadamente un siglo provocó una intensa polución en la zona. Hasta mediados del s. XX los desechos antropogénicos provenientes de la industria y los de origen doméstico eran vertidos directamente al cauce (Azkona et



Figura 1.8. Instalaciones funcionales de la Autoridad Portuaria de Bilbao en la zona del Abra Exterior en 2009. Fuente: uniportbilbao.es.

al. 1984, Gorostiaga y Díez 1996, Carreta et al. 2002, Ura 2007). En esta época, se calcula que sus aguas recibían diariamente unas 2.000 toneladas de residuos industriales, con unas 900 toneladas de sólidos de origen minero y 400 toneladas de compuestos ácidos y 80 toneladas de metales (Cearreta 1992, 2009, Arranz 2012) que tenían su origen en las actividades químicas, metalúrgicas y papeleras. Destacaban compuestos especialmente tóxicos, como el cianuro, fenoles, diversos metales pesados y fluoruros, así como los peligrosos procesos de especiación química y los cambios en la toxicidad de los metales debidos a los elementos orgánicos e inorgánicos de la columna de agua (Lorenzo et al. 2002, 2006, Sánchez-Marín et al. 2007, 2010). En cuanto a los residuos domésticos, y teniendo en cuenta que entre 1900 y 1975 la población del área metropolitana se multiplicó por cuatro, diversos estudios estiman en 250.000 m³ los vertidos diarios de aguas fecales (Azkona et al. 1984, Gorostiaga et al. 1987, Gorostiaga y Díez 1996). Todo ello transformó a la ría en una cloaca anóxica y carente de vida, ante la escasa conciencia ambiental generada por la creencia equivocada de que el medio marino sería capaz de diluir y asimilar la carga residual (Cearreta 1992, Arranz 2012).

La elevada presión antrópica en el medio marino (Airoldi et al. 2008), especialmente la concentración de residuos contaminantes, la turbidez y la sedimentación (Terlizzi et al. 2005,

Azzurro et al. 2010) repercuten en la diversidad, en los procesos ecológicos y en los patrones de distribución del ecosistema (Roberts et al. 1998, Smith et al. 1999). En relación al medio rocoso marino, la polución afecta a diversas comunidades, como peces, epífitos, meiofauna (Guidetti et al. 2003, Piazzini et al. 2004, Frascchetti et al. 2006) y a los macroinvertebrados bentónicos (Terlizzi et al. 2005).

1.1.1.2. Plan Integral de Saneamiento

El área de estudio se sitúa en una cuenca densamente poblada con un cauce fluvial que se encontraba altamente contaminado, ya que las aguas residuales del área metropolitana, principalmente materia orgánica y desechos industriales y mineros (Gorostiaga y Díez 1996, García-Barcina et al. 2006), eran vertidas directamente al cauce sin tratamiento previo desde finales del s. XIX hasta los años setenta del s. XX (Pagola-Carte y Sáiz-Salinas 2001b, García-Barcina et al. 2006). Ante esta situación extrema, surgió la necesidad urgente de mejorar la calidad de las aguas y recuperar el estuario (Sáiz-Salinas 1997). Sobre la base de estos dos objetivos principales, se planteó el saneamiento de las aguas contaminadas. Los primeros pasos datan de 1967, cuando se creó el Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia, que aglutinaba a 19 municipios de la zona. Hasta 1975 su tarea principal se centraba en el abastecimiento de agua, mientras que los recursos se focalizaron en disminuir el

elevado grado de contaminación en el río a partir de 1979. En este año se esbozó el Plan Director de Saneamiento (Franco et al. 2016) con varios objetivos definidos, entre los que destacaron la reducción de los vertidos tóxicos generados por la industria, la adecuación de las playas cercanas y su entorno para uso recreacional y la recuperación de la vida asociada al cauce. Las primeras actuaciones consistieron en la construcción de 4 plantas depuradoras (Bolueta, Lamiako, Galindo y Muskiz) que trataban las aguas provenientes del alcantarillado de las poblaciones

cercanas (Figura 1.9). Con la implementación del tratamiento primario en estas estaciones, el volumen estimado de sólidos en suspensión retirados diariamente del cauce alcanzaba los 12.400 kg. en 1990. Una vez tratadas, las aguas se vertían al río Galindo, afluente del Nervión cercano a la desembocadura (<https://www.consorciodeaguas.eus/Web/CicloAgua/ciclodelagua.aspx?id=depuracion>). Posteriormente, el número de municipios adscritos al plan fue aumentando, y se incluyeron las áreas del Gran Bilbao, Alto Kadagua, Alto Ibaizabal, Butrón y el Valle de Arratia (Figura 1.9).

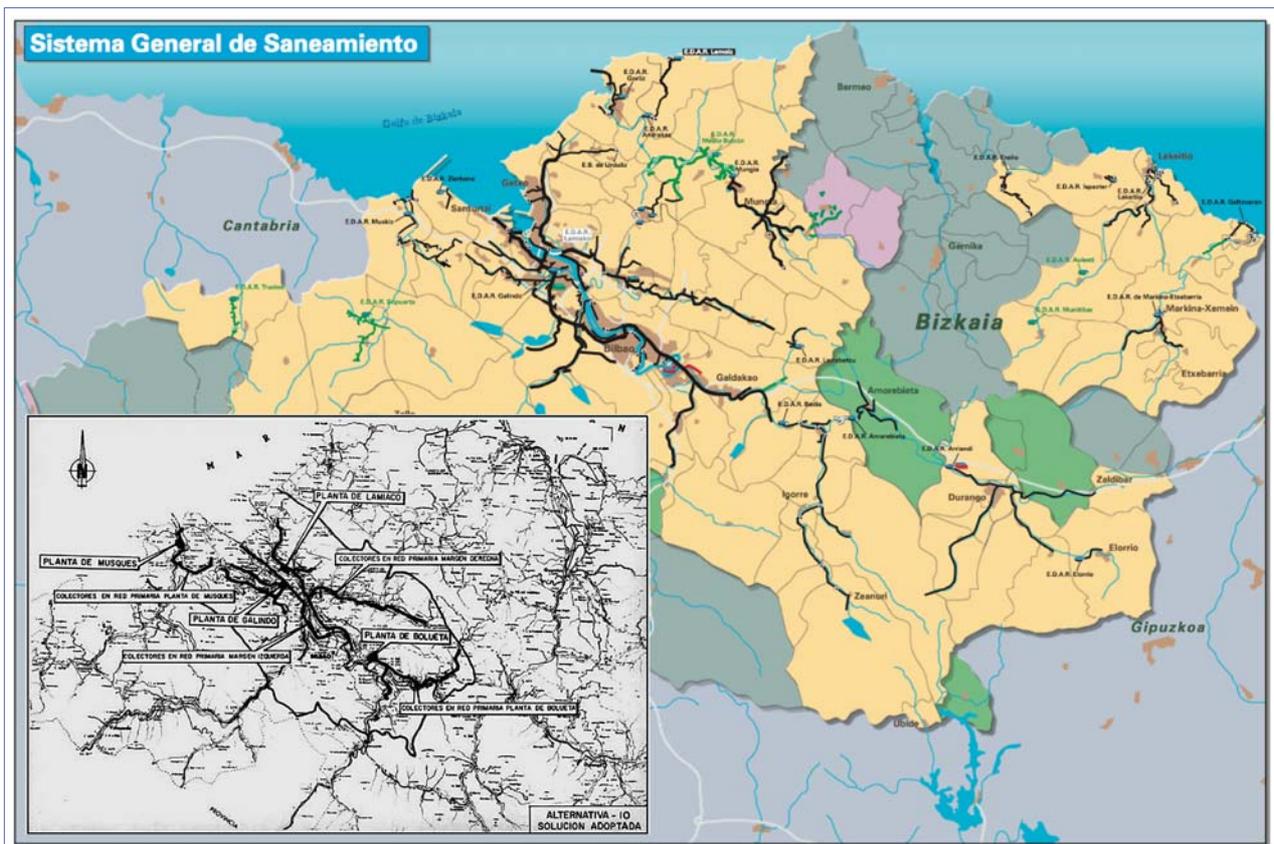


Figura 1.9. Planteamiento inicial del sistema general de saneamiento en el área metropolitana del gran Bilbao (mapa b/n) y actual (color). Fuente: consorciodeaguas.eus

Asimismo, los tratamientos de depuración también fueron implementándose, destacando en 2001 la eliminación de materia orgánica de las aguas tratadas en la EDAR de Galindo mediante la aplicación del tratamiento biológico al 100% del volumen de agua recibido (Franco et al. 2016). Asimismo, para valorar objetivamente la eficacia del plan de depuración se iniciaron diversos estudios ambientales financiados por el Consorcio de Aguas y la Agencia Vasca del Agua (Isasi-Urdangarín et al. 1984, Gorostiaga y Díez 1996, URA 2009). Este tipo de estudios poseen un gran interés ya que, en general, la gran mayoría de los trabajos se centran en evaluar el impacto de vertidos y no solo en validar la efectividad de los procesos de depuración (Pagola-Carte y Saiz-Salinas 2001a, Díez et al. 2009).

Hoy en día, el desarrollo del plan sigue creciendo y evolucionando, con el tratamiento de un elevado porcentaje de las aguas residuales de la cuenca, la construcción de nuevas estaciones depuradoras y de bombeo adicionales, así como la ampliación de la red de colectores (Arranz 2012). Destaca la estación central de Galindo como la más capaz. Con un caudal admisible de 12.600 l/s, asume la tarea de depurar 345.000 m³ diariamente (110.000.000 m³ por año), tratando cerca del 80% de las aguas residuales de los municipios incluidos en el plan. Así, en la actualidad se depuran las aguas provenientes de 81 municipios del Gran Bilbao, dando servicio a una población que supera el

millón de habitantes que supone el 91% del censo total de Bizkaia (<https://www.consorciodeaguas.eus>).

1.1.1.3. Invertebrados del zoobentos marino como bioindicadores

El nexo que existe entre unas condiciones ambientales cambiantes y su repercusión en la biota que habita en el medio marino es la base de la ecología marina, que se define como el estudio científico de los organismos marinos que se encuentran bajo la influencia de diferentes procesos que establecen su distribución y abundancia, sus interacciones con el medio y entre ellos (Lawton 1994). No obstante, es necesario conocer el modo en que las diferentes especies responden ante los diversos episodios de estrés ambiental (Tomanek y Helmuth 2002, Gerlach y Rice 2003). Es en este aspecto donde las comunidades bentónicas muestran una gran utilidad en estudios ambientales (Clarke y Green 1988, Gray et al. 1988, Gray et al. 1990, Díaz 1992, Underwood 1993, Jan et al. 1994, Southward et al. 2005, Bustamante et al. 2007, Hawkins et al. 2008). Entre ellas, destacan especialmente los macrófitos (Eriksson et al. 2002) y los macroinvertebrados (Warwick 1993, Ejigu et al. 2014, Llanos et al. 2019). Estos últimos componentes del bentos (Figura 1.10) han sido ampliamente utilizados en programas de vigilancia ambiental (Warwick 1988a, Clarke y Warwick 1994, Sáiz-Salinas y Urkiaga-Alberdi 1997, 1999a, 1999b, Pagola-Carte y Sáiz-

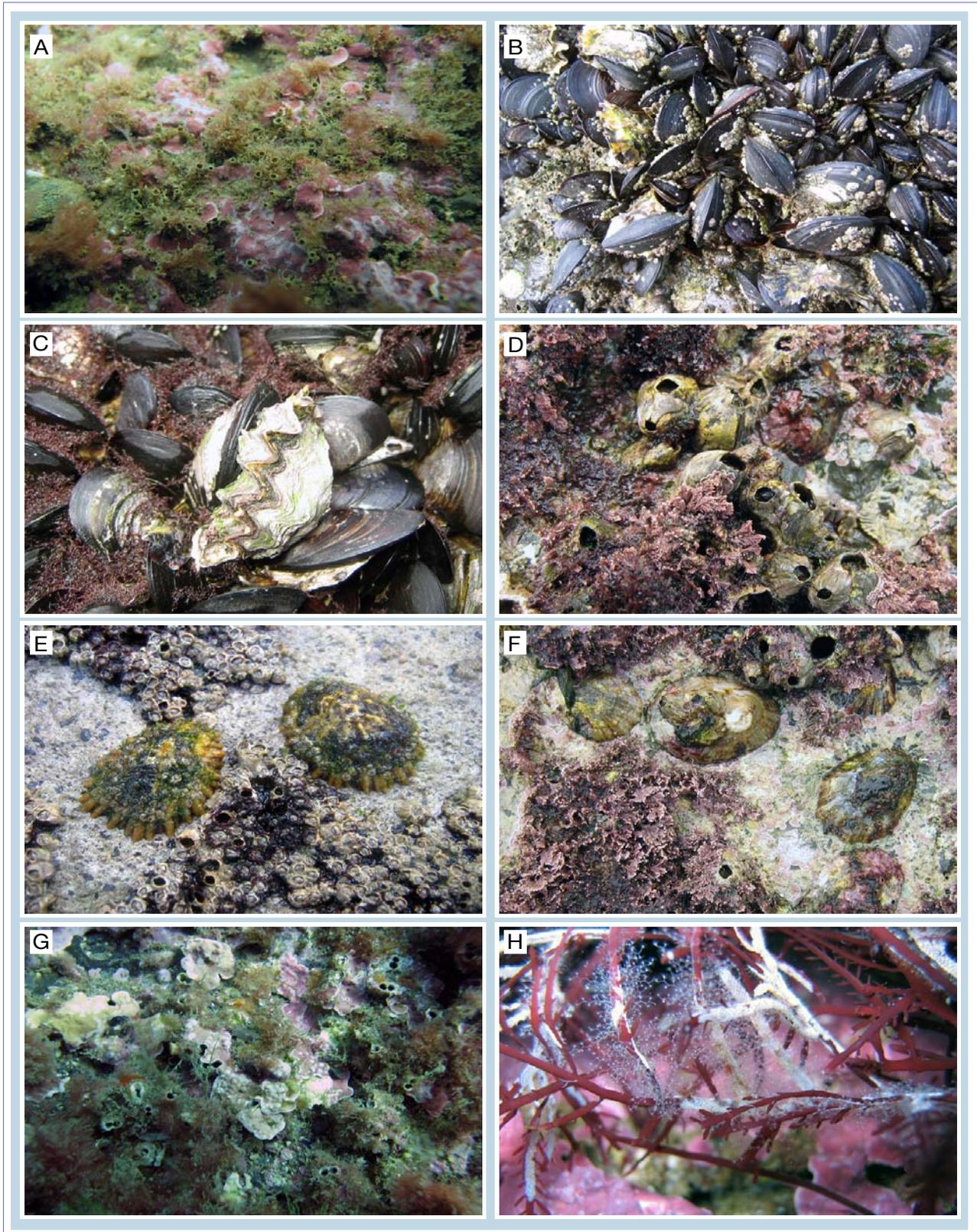


Figura 1.10. A. Poliquetos espiónidos del género *Polydora*. B. *Mytilus galloprovincialis*. C. *Ostrea edulis*. D. *Perforatus perforatus*. E. Cirrípedos del género *Chthamalus* y lapas del género *Patella*. F. *Patella ulyssiponensis*. G. *Rocellaria dubia*. H. Invertebrados epífitos (*Obelia geniculata*, *Electra pilosa*) sobre el alga *Gelidium corneum*. Fuente: Grupo de Investigación Bentos Marino UPV/EHU.

Salinas 2001a, 2001b, Bustamante et al. 2007, 2010, 2012, Gusmao et al. 2016, Vinagre et al. 2016, 2017, Longobardi et al. 2017). El uso generalizado del macrozoobentos de sustrato rocoso radica en su carácter sésil (Mieszkowska 2016), en su facultad integradora de las condiciones del medio (Bilyard 1987, Reish 1987, Gray et al. 1990, Díaz 1992, Heip 1992, Jan et al. 1994, Garaffo et al. 2018) y en su elevada capacidad de respuesta ante cambios ambientales (Sheppard et al. 1980, Saiz-Salinas e Isasi-Urdangarín 1994, Smith and Simpson 1995, Fano et al. 2003, Blanchet et al. 2008, Díez et al. 2012, Vinagre et al. 2016, Huguenin et al. 2018).

Estas características son especialmente evidentes en el caso del horizonte intermareal, donde las comunidades del bentos rocoso se encuentran sometidas a gradientes ambientales que promueven mecanismos de adaptación a esas condiciones en la fauna (Diz et al. 2017). Algunos de esos gradientes son periódicos y predecibles, destacando los cambios en el nivel de marea, de ahí que en el presente estudio se hayan estudiado 3 niveles intermareales y 3 submareales, mientras que otros responden a una mayor variación temporal y espacial (Raffaelli y Hawkins 1996, Hochachka y Lutz 2001, Somero 2004, Alpert 2005), y ponen de manifiesto diversos procesos de interacción entre las especies (Abrams 2001, Werner y Peacor 2003, Olf et al. 2009, Cole y McQuaid 2010).

1.1.1.4. Plan de Vigilancia Ambiental

Tras la historia y evolución del río Nervión, incluyendo la contaminación, la modificación de su cauce provocada por el desarrollo industrial y minero y la adecuación y avance de las instalaciones portuarias en respuesta a las nuevas necesidades creadas, surge el “Plan de Vigilancia Biológica del Puerto de Bilbao” como elemento aglutinador de todos estos aspectos en el entorno del río Nervión.

Por un lado, el área de estudio de este Plan de Vigilancia se localiza en la desembocadura del estuario, en el llamado “Abra de Bilbao”. Esta zona, al igual que el cauce del río, recibió durante décadas los residuos tóxicos derivados del auge industrial y, posteriormente, también se benefició del cese de los vertidos. Por otra parte, esta zona también se ha visto influenciada en el proceso de regeneración ambiental llevado a cabo mediante el Plan Integral de Saneamiento. Asimismo, el propio desarrollo de las instalaciones y actividades portuarias durante el estudio también han sido factores que potencialmente pudieron generar cierto impacto biológico. La Autoridad Portuaria de Bilbao, sensible a la necesidad de valorar el efecto de sus actuaciones en el ecosistema marino, acordó un convenio de colaboración con el Departamento de Zoología y Biología Celular Animal y con el Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea en

1994. El objetivo de este acuerdo fue el desarrollo del “Plan de Vigilancia Biológica del Puerto de Bilbao” sobre las comunidades bentónicas faunísticas y vegetales de sustrato duro, analizando las variaciones espaciales (comparación de las comunidades biológicas entre las diferentes estaciones de vigilancia) y temporales (cambios anuales) en el área portuaria, con la excepción de las zonas de tránsito de mercancías. Debido a que este estudio se llevó a cabo de forma simultánea a las labores de ampliación del puerto durante la fase inicial (1994-1997), el primer propósito del plan de vigilancia se centró en la evaluación del impacto de las propias obras. A partir de entonces se añadió un segundo objetivo al estudio, que consistió en el seguimiento biológico de las comunidades que permitiera la evaluación de la calidad ambiental de las masas de agua durante la fase inicial de construcción y una vez implantadas las nuevas actividades portuarias.

En el área de estudio se combinan localidades con sustrato natural, como Arrigunaga y Punta Galea, que poseen un sustrato conformado a modo de dientes de sierra denominado “flysch”, con otras en la que el sustrato es artificial. En este punto cabe destacar que las infraestructuras artificiales ubicadas en el medio natural costero provocan una respuesta significativa en la estructura y composición del ecosistema, afectando directamente a diversas variables biológicas, como la abundancia y diversidad de las especies que forman la comunidad (Southward y Orton 1954,

Glasby 2000, Glasby y Connell 2001, Bacchiocchi y Airoidi 2003, Chapman 2003, Chapman y Bulleri 2003, Guidetti et al. 2004, Bulleri 2005, Goodsell et al. 2007, Martins et al. 2009). De hecho, ya que la mayor parte del área de estudio está constituida por diques de roca de cantera o escolleras de bloques de hormigón, se hizo necesario analizar el patrón de colonización de las comunidades biológicas a este tipo de estructuras artificiales, cuyos resultados se exponen en la presente tesis. Este estudio resulta de interés para diferenciar las dificultades propias del proceso adaptativo de las especies del estrés potencial producido por la influencia de la actividad portuaria, o del procedente del río Nervión. Asimismo, el conocimiento de los patrones de colonización, asentamiento y posterior evolución de las diferentes especies podría favorecer el desarrollo de nuevos modelos de construcción de estructuras artificiales para conseguir una textura similar a la de los sustratos naturales cercanos (Glasby 1999, Connell 2001, Bulleri y Chapman 2004, Bacchiocchi y Airoidi 2003, Bulleri 2005, Airoidi et al. 2005)

Los factores de origen antropogénico que afectan al área portuaria pueden afectar al ecosistema en diferentes grados (Hooper et al. 2005). Es el caso del gradiente que ha presentado el cauce a medida que se ha ido implementando el Plan Integral de Saneamiento, que ha disminuido en gran parte el aporte de los sólidos en suspensión y contaminantes de las

aguas. También hay que sumar el propio efecto natural de la ría, con la carga adicional de sólidos en suspensión tras épocas de elevada pluviosidad. La elevada variabilidad de estos factores, deriva en la necesidad de tener una referencia de sus cambios durante un largo periodo de tiempo para así poder diferenciar posibles impactos puntuales de otros sostenidos en el tiempo, o para distinguir entre los cambios naturales en las comunidades de las variaciones provocadas por algún tipo de factor estresante antrópico (Magurran 2010, Wahl et al. 2013, Franz et al. 2019).

Los impactos en el ecosistema pueden llegar a afectar a su funcionamiento (Duarte et al. 2018), provocando cambios (Mouillot et al. 2013) cuya tendencia ha de ser analizada con el fin de determinar su origen (Kröncke 1995, Brown y Shillabeer 1997, Currie y Parry 1999). En este aspecto, los trabajos de seguimiento ambiental continuados en el tiempo y que aportan información en largas series temporales, como el “Plan de Vigilancia Biológica del Puerto de Bilbao”, adquieren un notable valor. Estas series de datos son imprescindibles para el correcto análisis e interpretación de los cambios en las comunidades (Magurran et al. 2010). En este sentido, los trabajos de vigilancia ambiental a largo plazo han mostrado su utilidad para evaluar tanto el efecto de la contaminación (Brown y Shillabeer 1997, Zeiss y Kröncke 1997, McLusky 1999) como los procesos de recuperación ambiental (Borja et al. 2000, Díez et al. 1999, 2003, 2009, 2012, 2013,

Gorostiaga y Díez 1996, Gorostiaga et al. 1987, 2004, Pagola-Carte y Sáiz-Salinas 2001a, 2001b, Rallo et al. 1988, Sáiz-Salinas y Urkiaga-Alberdi 1997, 1999a, 1999b, Bustamante et al. 2007, 2012) o incluso los impactos climáticos más recientes (Franz et al. 2019) que pueden derivar en la aparición y expansión de invertebrados exóticos. En este sentido, los esfuerzos de la Autoridad Portuaria de Bilbao son reseñables, dando continuidad desde 1994 al Plan de Vigilancia Ambiental con los estudios sucesivos en la zona. Este plan, modificado y ampliado desde la Campaña 2010, continúa en la actualidad, sumando un total de 25 campañas, que han permitido obtener una amplia base de datos biológicos y físico-químicos de la zona portuaria y del resto del Abra. La extensa serie temporal de datos científicos generada en el área de estudio se ha convertido en una base sólida sobre la que poder determinar el estado ambiental de la bahía y posibles tendencias o patrones en el ecosistema. Utilizando toda esta información, se pueden desarrollar medidas de corrección o control del impacto humano más eficientes (Bellamy et al. 1972, Underwood 1993, Underwood et al. 2000, Frascchetti et al. 2005).

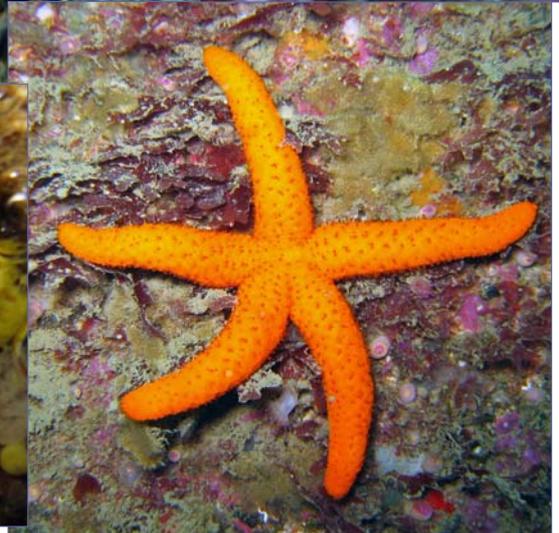
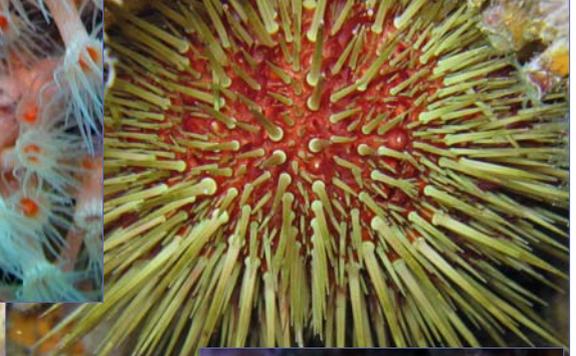
1.2. OBJETIVOS

Los objetivos generales de este estudio son:

- Investigar la variabilidad espacio-temporal de las variables ambientales del entorno portuario.

·Estudiar la variabilidad espacio-temporal de las comunidades faunísticas de sustrato duro en el entorno portuario en diferentes niveles batimétricos y analizar su relación con los patrones detectados en las variables ambientales.

·Explorar la aparición y evolución de las especies exóticas en el área de estudio y su influencia en las poblaciones nativas en diferentes niveles batimétricos.



An underwater photograph showing a large school of small, dark fish swimming in clear, blue water. The fish are concentrated in the middle ground, with some swimming towards the camera and others away. In the background, a large, rectangular concrete structure, possibly a pier or part of a harbor infrastructure, is visible. The lighting is natural, suggesting daylight, and the overall scene is serene and focused on marine life.

Esta tesis tiene como base los trabajos de investigación iniciados en 1994, cuando la Autoridad Portuaria de Bilbao estableció un convenio de colaboración con la UPV/EHU para el desarrollo del “Plan de Vigilancia Biológica del Puerto de Bilbao” con el fin de analizar las variaciones espaciales y temporales de las comunidades bentónicas de sustrato duro del área de estudio. Sin duda, el tráfico marítimo y las actividades portuarias asociadas son parte fundamental en el modelo socioeconómico actual. No obstante, suponen un riesgo para la salud y estabilidad del ecosistema marino, por lo que la vigilancia y control ambiental de estas áreas es de vital importancia.

El papel de los invertebrados marinos en este entorno es determinante, ya que son susceptibles de sufrir los efectos de la presión antrópica convirtiéndose en excelentes indicadores de la salud del ecosistema. A través del estudio detallado del zoobentos de sustrato duro y apoyadas en un extenso trabajo de muestreo intermareal y submareal, las investigaciones llevadas a cabo en esta tesis aportan información sobre evolución de la salud del ecosistema portuario en el “Abra de Bilbao” a lo largo de 16 años.