

ARQUITECTURA VIVA EN SIMBIOSIS CON EL ECOSISTEMA

OTRAS FORMAS DE VIDA COMO CONDICIONANTES
DE LA ARQUITECTURA EN EL MEDIO MARINO

Autor: Deborah Hernández Cáceres

Director: Rubén Servando Carrillo

Universidad Europea de Canarias

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo de Fin de Grado (Curso 2023-2024)

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi tutor, Rubén Servando Carrillo, no solo por haber depositado en mí la confianza y el apoyo que necesitaba para desarrollar esta línea de investigación, sino también, por haber formado parte de mi formación como arquitecta durante los cinco años de carrera. Aprecio y agradezco los consejos y la orientación que me has brindado.

A Juan Diego López Arquillo, un apoyo incondicional durante mi trayectoria universitaria. Gracias por estar siempre presente, ofreciéndome ayuda y consejo, y por depositar en mí la motivación que a veces me faltaba.

A Víctor Cano Ciborro, por llegar en mi último año de grado y abrirme por completo el campo de visión como futura arquitecta, animándome a explorar lo inexplorado y a replantearme los límites de nuestra disciplina. Agradecer también al resto de los profesores que han formado parte de mi formación, entre ellos, Fernando Martínez Soto, Jorge Heras Sánchez, Ester Ferrer Román, Pablo Miguel de Souza Sánchez y Nuria Vallespín Toro. Todos han hecho que mi paso por la universidad sea una experiencia acogedora y enriquecedora.

A mi compañera Sirma Barrera de León, un apoyo absoluto para mí. Agradezco haber recorrido este camino contigo y todos los momentos compartidos.

Por último, agradecer a mis padres y a mis hermanas. Gracias por haber hecho posible cada paso de este camino y el apoyo incondicional depositado en mí. Son los cimientos a partir de los que he podido construir mi trayectoria y mi formación, tanto profesional como personal.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. Resumen	5
2. Abstract.....	5
3. Motivación	6
4. Introducción.....	8
4.1. Introducción del tema.....	8
4.2. Hipótesis y objetivo general	8
4.3. Metodología.....	9
4.4. Estado de la cuestión.....	9
4.5. Conceptos previos	11
5. Reconocimiento de la diversidad biológica	11
5.1. Otras formas de vida.....	11
5.2. La biodiversidad en el entorno urbano	13
5.3. Los ecosistemas marinos y el bienestar humano	13
6. Sustitución del biotopo costero por el entorno construido	14
6.1. El litoral urbano y su impacto en el medio marino.....	14
6.2. La línea costera en el contexto de Canarias	17
6.3. Complejidad estructural de la zona intermareal e infralitoral de Canarias.....	19
7. La pieza construida como hábitat artificial marino	21
7.1. Relación entre la pieza construida y la complejidad estructural del medio marino.....	21
7.1.1. Revisión bibliográfica en el ámbito internacional.....	21
7.1.2. Revisión bibliográfica en el ámbito de Tenerife	22
7.2. Condiciones de diseño de la pieza construida como hábitat marino artificial.....	24
8. Propuesta de diseño arquitectónico.....	26
8.1. Introducción	26
8.2. Diseño paramétrico	26
8.3. Exploración de las formas mediante el diseño paramétrico	28
8.3.1. Exploración de la fórmula matemática aplicada a la geometría tridimensional	28
8.3.2. Exploración de la morfología de los fondos marinos	31
8.3.4. Exploración formal de los sustratos naturales	34
8.4. Impresión 3D	43
8.4.1. Estereolitografía (SLA)	44
8.4.2. Cemento 3D.....	45
8.4.2.1. Impresión con boquilla de 4mm.....	47

8.4.2.2. Impresión con boquilla de 6mm.....	50
8.4.2.3. Impresión de modelo adaptado	52
8.4.3. Comparativa de resultados impresos.....	53
8.5. Consideraciones finales de la propuesta	54
9. Conclusiones	55
10. Perspectivas futuras de investigación	56
11. Bibliografía	57

1. Resumen

La expansión oceánica ya está en marcha, desde la invasión y transformación de las líneas costeras mediante construcciones de protección y ampliación del terreno, hasta la invasión de los océanos mediante la arquitectura flotante. En este TFG, la interacción entre el entorno construido y el medio marino cobra especial importancia con el fin de entender cómo nuestras construcciones son capaces de conformar hábitats artificiales para la biodiversidad marina. Se resalta la necesidad de integrar la diversidad biológica en los diseños arquitectónicos, evidenciando su importancia para el bienestar humano, y proponiendo el entendimiento de la arquitectura desde el punto de vista del reconocimiento y la integración de las diferentes formas de vida que nos rodean.

Se realiza un recorrido previo relacionando nuestra repercusión sobre los ecosistemas marinos, desde el núcleo urbano hasta su periferia, el litoral urbano, demostrando el impacto ejercido sobre los mismos. A continuación, centramos el marco de la investigación en las Islas Canarias. Se resalta la problemática de las infraestructuras costeras que dificultan el asentamiento de flora y fauna marina en la isla de Tenerife, equiparándose con los sustratos rocosos naturales de la zona intermareal e infralitoral de Canarias.

Se obtienen las condiciones de diseño indispensables para la proyección de construcciones de reducida huella ecológica en contacto con el entorno marino, atendiendo a las necesidades de hábitat del ecosistema asociado. Partiendo de dichas premisas, se procede con la propuesta de diseño arquitectónico basada en la exploración de la forma mediante el diseño paramétrico. A través de la exploración formal, se buscan métodos de inspiración y de proyección aplicables al diseño superficial de construcciones marinas, fomentando una intervención urbana desde la sensibilización y sostenibilidad entre el entorno construido y el ecosistema asociado.

Palabras clave: arquitectura, diseño paramétrico, mimesis, ecosistema, medio marino, hábitat artificial, biotopo.

2. Abstract

Ocean sprawl is here and now, from the coastal defense structures and land expansion to the ocean's invasion by means of the floating architecture. The aim in this final degree project is to take into account the interaction between the built and the marine environment, so that our constructions could create artificial habitats for marine biodiversity. The integration of biological diversity into architectural designs is highlighted, showing its importance for the human wellbeing. It proposes an architecture that recognizes and integrates all the forms of life that surround us.

Starting from the urban core up to the peri-urban areas, it is demonstrated the impact it has on the marine ecosystem. The investigation is then centred on the Canary Islands, focusing on Tenerife's coastal infrastructure disadvantages which impede the flora and fauna's settlement. A brief summary is made on the natural intertidal and subtidal rocky substrates areas in order to understand why our present constructions do not interact with the natural environment.

The crucial design conditions for the marine constructions are achieved with a reduced ecological footprint, meeting the need of the marine life. Following this commitment, it is proceeded with the architectural parametric design proposal, based on the geometrical exploration. A search for inspiration and designing methods is achieved for the marine superficial

design structures, promoting an urban intervention from the awareness and sustainability point of view between the built environment and the associated ecosystem.

Key words: architecture, design, parametric design, mimesis, marine environment, artificial habitat, biotope.

3. Motivación

Previo a la selección de una línea específica de investigación se realizan dos esquemas principales para tratar las motivaciones e inquietudes personales. Se estructuran ambos por separado, resaltando dos vertientes de especial interés propio: el mar y la biología, bajo las temáticas de “Arquitectura y mar” (Diagrama 1) y “Arquitectura viva” (Diagrama 2). Mediante ellos se pretendía obtener una línea de investigación común, que fuera coincidente en ambas temáticas con el fin de seleccionar una propuesta que fuera capaz de aunar las principales inquietudes definidas en un único campo de estudio.

Este procedimiento consistió en un proceso de búsqueda personal que fue necesario para poder aclarar y enfocar la investigación. Es por ello por lo que se decide aportar este material, como la muestra del trabajo previo a la selección de la línea de investigación, reflejando de manera transparente y clara las motivaciones personales que, de alguna manera u otra, influyen en el pensamiento y la trayectoria de este TFG.

En este proceso se obtiene una línea común entre ambas vertientes de especial interés: **¿podemos generar una arquitectura viva en simbiosis con el ecosistema adyacente?** Esta cuestión plasma el pensamiento y la motivación principal de este TFG, reflejando la necesidad de entender nuestra interacción y nuestra forma de ser y de hacer con el medio que nos rodea, partiendo de la idea de que somos seres vivos que están en constante intercambio, comunicación e interacción con otras formas de vida. Siendo consciente de la amplitud de las motivaciones tratadas se acota su alcance y centramos el foco en el mar, una pasión personal, partiendo de la idea principal de proyectar una arquitectura viva en simbiosis con el medio marino en el que se implanta, desde un punto de vista de la reducción de la huella ecológica de la intervención antrópica.

Esta investigación no pretende justificar la expansión oceánica, pero se es consciente de su actual incremento, buscándose, por tanto, una actuación a pequeña escala desde la disciplina de la arquitectura que sea capaz de integrar soluciones más respetuosas con el medio invadido.

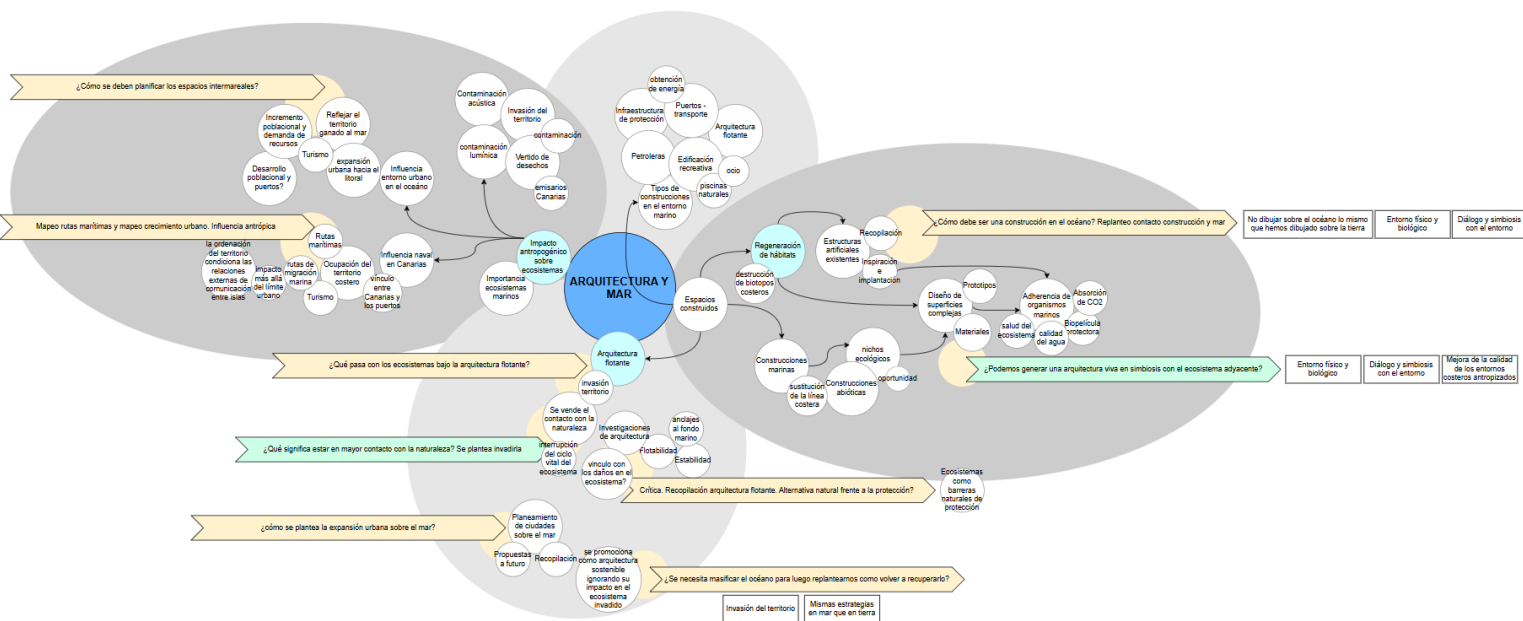


Diagrama 1: Diagrama de arquitectura y mar. Inquietudes y motivaciones previas a la investigación. Fuente: elaboración propia

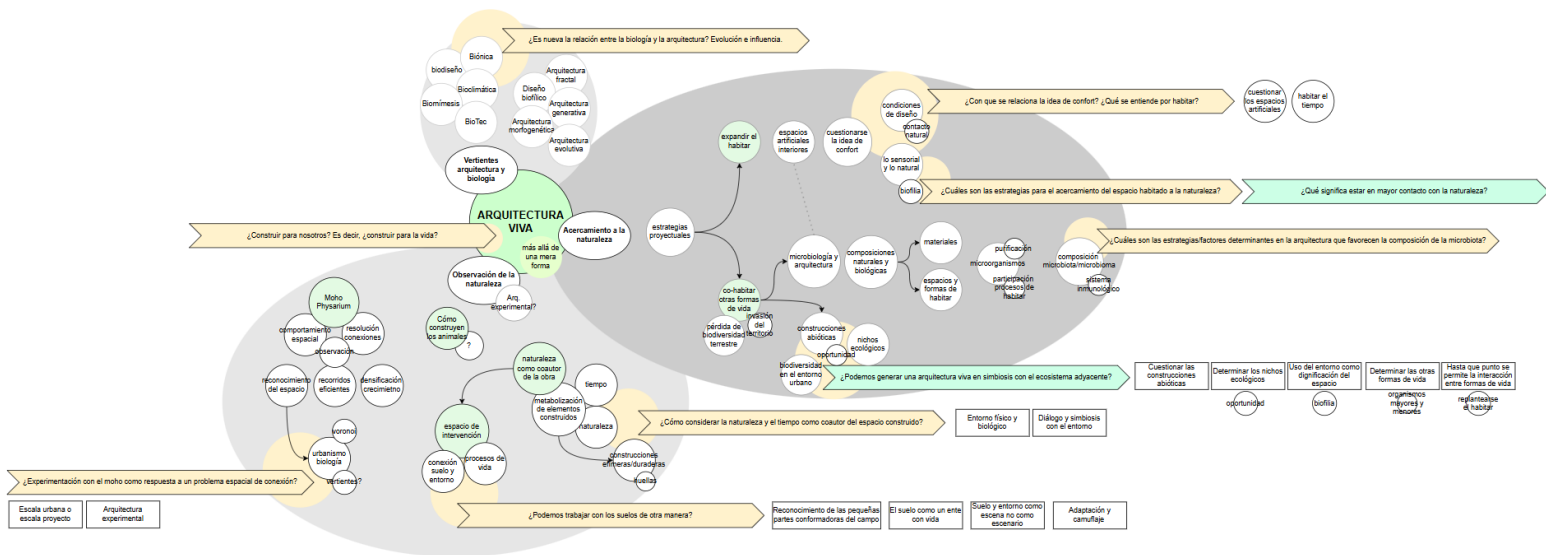


Diagrama 2: Diagrama de arquitectura y biología. Inquietudes y motivaciones previas a la investigación. Fuente: elaboración propia

4. Introducción

4.1. Introducción del tema

La estrecha relación entre el ser humano y la naturaleza es ineludible. A través del conjunto de nuestras acciones el medio natural se ve transformado ejerciendo un impacto que determina nuestro entorno. Esta relación se manifiesta de manera directa en los océanos y las zonas costeras donde la biodiversidad marina es el principal agente afectado.

Según el Objetivo de Desarrollo Sostenible nº14 de la Naciones Unidas, la biodiversidad marina mantiene el funcionamiento saludable del planeta y proporciona servicios que sustentan la salud, el bienestar y la prosperidad de la humanidad, considerándose un aspecto fundamental de los tres pilares del desarrollo sostenible – económico, social y ambiental (Paşca Palmer, 2023)-. En esta investigación, se propone su reconocimiento como un usuario fundamental y condicionante de nuestras construcciones.

La expansión urbana hacia el litoral intensifica la presión sobre los ecosistemas marinos de forma directa e indirecta. Las ciudades tienen como resultado una constante **demanda de los recursos ecosistémicos** y suponen una generación continua de residuos, los cuales sobrepasan las fronteras del entorno urbano hacia las **zonas rurales de la periferia**. Esta invasión urbana hacia el litoral se refleja actualmente con aproximadamente 30.000 km² de océano modificado por el ser humano y se espera que la huella física alcance los 39.400km² en 2028 (Bugnot et al., 2020a, p. 1).

Entre estas construcciones ganadas al mar destacan las **infraestructuras de protección costeras** conformadas, en su mayoría, por superficies lisas de hormigón. Estas generan un sustrato que dificulta la colonización de la fauna y flora marina, ya que difieren en características físicas, físicoquímicas, ecológicas y socioeconómicas en comparación con los hábitats artificiales que reemplazan (Yanes-Luque, 2019) (Bugnot et al., 2020b). Todo esto lleva a la creación de **biotopos de baja calidad** afectando a las comunidades biológicas, la calidad de los entornos costeros y el bienestar del ser humano.

A raíz de la situación insostenible de las **construcciones abióticas** en el entorno marino, se desarrollan iniciativas de regeneración de la biodiversidad, aportando documentación científica que ha comprobado y evaluado la posibilidad de complejizar las superficies de las construcciones para así generar un biotopo artificial apto para la colonización de la diversidad biológica marina, siendo este el caso que nos ocupa en este TFG.

4.2. Hipótesis y objetivo general

Hipótesis: La implementación de principios de diseño arquitectónico conscientes en el entorno marino puede favorecer la creación de una simbiosis entre las estructuras construidas y los ecosistemas marinos, promoviendo la biodiversidad y generando beneficios tanto para la vida marina como para la humana.

Objetivo general: Explorar el impacto de la arquitectura sobre el medio marino, así como la posibilidad de lograr una integración armónica entre la construcción y los ecosistemas asociados, evaluando cómo los diseños arquitectónicos pueden contribuir a la restauración y conservación del entorno marino antropizado.

4.3. Metodología

Esta investigación se desarrolla mediante los siguientes puntos:

- En **primer lugar**, se realiza un acercamiento a la diversidad biológica en el entorno urbano, resaltando los servicios ecosistémicos y sus aportaciones a la calidad de vida del ser humano. Se destaca, de forma general, como nuestras construcciones generan espacios de oportunidad/nichos ecológicos para otras formas de vida, proponiéndose su reconocimiento como conformadores de nuestros espacios. Por último, se recalcan los beneficios de los ecosistemas marinos, junto con el ODS14, dónde la conservación de la biodiversidad marina toma especial relevancia a nivel global.
- En **segundo lugar**, se hace un breve recorrido del litoral urbano reflejando como la expansión urbana hacia las zonas periféricas invade y altera la línea costera a nivel global. A continuación, nos centramos en el contexto de las Islas Canarias, destacando la ocupación de sus costas por infraestructuras costeras y la complejidad estructural de los biotopos naturales en la zona intermareal e infralitoral.
- En **tercer lugar**, se realiza una revisión bibliográfica a partir de investigaciones urbanas y de biología marina, con el fin reflejar la relación existente entre la pieza construida y la complejidad estructural del medio marino. Esta revisión se realiza a nivel internacional y, posteriormente, nos centramos en el caso concreto de la isla de Tenerife para entender la huella ecológica de las infraestructuras costeras existentes en la isla. Por último, se efectúa una revisión bibliográfica para clasificar las condiciones de diseño necesarias para la generación de construcciones en contacto con el medio marino, que posean una reducida huella ecológica atendiendo a las necesidades de hábitat del ecosistema adyacente.
- En **último lugar**, se procede con la acción arquitectónica mediante la exploración de las formas a través del diseño paramétrico. Se trabaja en el diseño de la superficie de la pieza construida en contacto con el medio marino, partiendo de las premisas de diseño recopiladas en el apartado anterior. Finalmente, se lleva a cabo la impresión 3D de algunas de las superficies proyectadas, comparando distintas técnicas de impresión.

4.4. Estado de la cuestión

El **Objetivo de Desarrollo Sostenible** número catorce de las Naciones Unidas (Moran, 2023) busca "*conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible*". La conservación y recuperación de la biodiversidad es uno de los principales objetivos de los ODS y, es precisamente uno de los 10 compromisos de la Agenda de la AIVIP para 2030 (AIVP, 2023). Esta es la primera iniciativa mundial que adapta los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU al contexto específico de las relaciones Ciudad-Puerto. La finalidad de esta iniciativa es traducir los ODS de gobernanza global al contexto de las ciudades portuarias con el fin de ayudar a los organismos portuarios y urbanos a **preparar proyectos y planes que contribuyan al desarrollo sostenible**.

Como respuesta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y la agenda AIVP, así como los diversos estudios que relatan la constante pérdida de biodiversidad a nivel mundial, se han desarrollado varias iniciativas que han investigado y realizado estructuras artificiales de hábitat marino con el fin de mantener, regenerar o mejorar el estado de individuos o poblaciones, incluyendo su supervivencia, crecimiento, reproducción y abundancia (Chapman & Underwood,

2011). Este tipo de estructuras incluyen guaridas, huecos, nidos, arrecifes y otros refugios artificiales donde los animales pueden descansar, criar, hibernar o resguardarse de depredadores y factores estresantes ambientales (Cowan et al., 2021).

En lo que respecta a la **regeneración de los fondos**, el arrecife artificial es el hábitat recreado por excelencia, realizado mediante geometrías complejas basadas en las estructuras de los arrecifes de coral naturales y construidos mediante tecnologías de impresión digital con materiales como cerámica u hormigón ecológico.



Imagen 1: Proyecto Mars de la compañía Reef Design Lab. Estructuras modulares. Fuente: Reefdesignlab.com

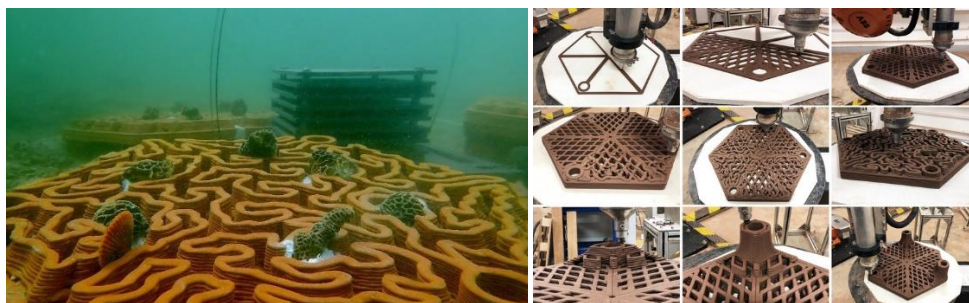


Imagen 2: Arrecife de terracota impreso _ Empresa derivada de la Universidad de Hong Kong. Fuente: Archiref.co

En lo que respecta a la regeneración de las **zonas intermareales y submareales**, se trata de un avance más reciente donde destacan las actuaciones de la empresa pionera Reef Design Lab con su primer proyecto en 2009 "Living Seawall", y ECoNcrete con su proyecto "Living Ports" iniciado en 2021. Estas empresas se basan en la generación de hábitats artificiales marinos, tanto en las zonas sublitorales como las intermareales, mediante la **implantación de baldosas complejas o la proyección de superficies exteriores texturizadas** en las infraestructuras favoreciendo la adherencia de biodiversidad marina. En el contexto de España podemos encontrar cuatro intervenciones bajo el marco del proyecto Living Ports de ECoNcrete: se aplica en los puertos de Málaga y Vigo, el espigón de Cala Rajada (Mallorca) y en la protección del cable submarino entre Lanzarote y Fuerteventura (*Living Ports Projects*, 2023).



Imagen 3: Puerto de Vigo, España.



Imagen 4: Puerto de Málaga, España.



Imagen 5: Espigón de Cala Rajada, Mallorca



Imagen 6: Cable submarino Lanzarote-Fuerteventura

Fuente de las imágenes: ecoconcretetech.com

Los proyectos existentes, tanto los correspondientes a la regeneración de los arrecifes, como los proyectos de las infraestructuras en las zonas intermareales y submareales, sientan las bases de este trabajo. Gracias a sus intervenciones, se obtienen las condiciones de diseño y las investigaciones claves que evidencian y documentan el funcionamiento exitoso de las mismas, aportando gran parte de la documentación bibliográfica en el que se basa este TFG.

4.5. Conceptos previos

a. Ecosistema: sistema ecológico constituido por un medio y los seres vivos que habitan en él, así como por sus relaciones mutuas (ASALE & RAE, 2024d).

b. Biotopo: territorio o espacio vital cuyas condiciones ambientales son las adecuadas para que en él se desarrolle una determinada comunidad de seres vivos (ASALE & RAE, 2024b).

c. Simbiosis: asociación de individuos animales o vegetales de diferentes especies, sobre todo si los simbiosantes sacan provecho de la vida en común (ASALE & RAE, 2024g).

d. Abiótico: medio que carece de seres vivos (ASALE & RAE, 2024a).

e. Construcción: obra construida o edificada (ASALE & RAE, 2024c)

5. Reconocimiento de la diversidad biológica

5.1. Otras formas de vida

Según el artículo 2 del Convenio sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas, la biodiversidad se entiende por “*la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas*”. Por lo tanto, la biodiversidad se refleja en las poblaciones, las comunidades de seres vivos y en la base de todos los procesos ecológicos, ya que interacciona con la atmósfera, la geosfera y la biosfera, determinando el ambiente de todos los organismos y contribuyendo a la calidad de vida en general (Hooper et al., 2005);(Mace et al., 2012); (Montoya, 2016).

Por consiguiente, el entorno natural se puede considerar el resultado de la combinación de la **arquitectura natural** -la de los seres no humanos- y la morfología de la naturaleza, identificada como **biotopo** (Rey Rocha et al., 2023). Partiendo de esta base, se plantea el entendimiento de nuestra arquitectura no como un conjunto de construcciones abióticas, duras y masivas, sino como la creación de un biotopo resultante de la interacción y el diálogo con nuestro entorno

circundante, tanto físico como biológico, **englobando a los seres humanos** y al resto de **las formas de vida** que nos rodean y nos complementan.

La expansión urbana se considera uno de los principales contribuyentes a **la pérdida de biodiversidad** en los ecosistemas terrestres ((McKinney, 2008, p. 11)). De forma general, en el ámbito arquitectónico, las construcciones han sido **impermeables** y reacias al reconocimiento de ningún otro usuario que no fuera humano sin contemplarse de forma efectiva, nuestra interacción y convivencia con otras formas de vida. En la imagen 7, se puede observar un ejemplo de invasión del territorio, sustituyendo los biotopos naturales por construcciones que no reemplazan los ciclos ecológicos previos que se producían en dicho entorno.



Imagen 7: Evolución urbana de Los Cristianos, Tenerife. Fuente: Marcial Fuentes “Fotos antiguas de Tenerife”

Aun así, el conjunto de construcciones genera un **ecosistema urbano**, conformando una comunidad biológica donde, sin quererlo, el espacio edificado constituye nuevos **nichos ecológicos** o **espacios de oportunidad** que pueden ser colonizados por los organismos que los rodean. Yibel María Castillo Gómez, recoge en su trabajo de fin de Máster “El edificio como Biotopo” (Zamora & Gómez, 2015, p. 20), una serie de casos de oportunidad para el hábitat de otros seres vivos en las construcciones antrópicas. Entre ellos, se encuentra la colonización de abejas en el interior de las fachadas (Imagen 8) o las cubiertas, las cuales, debido a la expansión urbana y la eliminación de su entorno natural, invaden, habitan y anidan ambientes favorables en nuestras construcciones (Zamora & Gómez, 2015, p. 15). Otro ejemplo de ocupación de biodiversidad en nuestros espacios se da en las construcciones en contacto con el mar, como es el caso de las estructuras de protección costera. Entre ellas destacan las escolleras de piedra, cuyas cavidades generan un biotopo marino para ciertas especies (Imagen 9).



Imagen 8: Colonización de abejas en el interior de la fachada de un edificio. Fuente:(Zamora & Gómez, 2015)

Imagen 9: Biotopo en la escollera de Radazul de Tenerife. Fuente: elaboración propia

5.2. La biodiversidad en el entorno urbano

La estimación de aumento de población según las Naciones Unidas 2023, es casi de 2000 millones de personas más para el año 2050, pasando de los 8000 millones actuales a unos 9700 millones. Este crecimiento desmedido supone una inevitable **expansión urbana** y el **incremento de la demanda de recursos** para subsistir; además la antropización del entorno trae consigo la incorporación de especies invasoras, la contaminación, los cambios de uso del terreno, la sobreexplotación de los recursos biológicos y la alteración climática global. Todo ello desata un desajuste en el entorno natural y la pérdida de diversidad biológica (Unit, 2016).

“Las ciudades dependen de los ecosistemas dentro y fuera del entorno urbano para una amplia variedad de bienes y servicios esenciales para la sostenibilidad económica, social y ambiental” (Berghöfer, 2011); (Rincón Ruiz, 2014); (Unit, 2016). La biodiversidad abarca distintas disciplinas englobando diferentes enfoques: científico, cultural, social, económico, cambio climático, político y de planeación urbana (Montoya, 2016). Estos campos se relacionan con:

- Los servicios ecosistémicos urbanos: beneficios directos e indirectos que proporciona la biodiversidad para el ser humano.
- Los ecosistemas urbanos: **ciudades como ecosistemas** donde la configuración de edificios, infraestructura y espacios abiertos, provocan efectos sobre el clima local, los suelos, el agua y la biodiversidad (Mathey & Rink, 2010); (Savard et al., 2000).

Los servicios de los ecosistemas urbanos mencionados en (Knight et al., 2006);(Berghöfer, 2011), son los siguientes:

- Servicios de aprovisionamiento: salidas de material de los ecosistemas (alimentos, agua, plantas medicinales... etc.)
- Servicios de regulación: mantienen funciones como la calidad del aire y del suelo, las inundaciones, el agua de lluvia y el control de enfermedades.
- Servicios de hábitat y de apoyo: proporcionan espacios de vida para distintos organismos manteniendo la diversidad vegetal y animal.
- Servicios culturales: beneficios socioecológicos, psicológicos y cognitivos (recreación, la estética y el turismo)

Desde un punto de vista más amplio, esto significa que el mal uso de este **capital natural** conlleva la pérdida del bienestar y calidad de vida, así como la disminución de las oportunidades de las economías locales (Berghöfer, 2011).

5.3. Los ecosistemas marinos y el bienestar humano

Los océanos son el soporte vital de nuestro planeta y regulan el sistema climático global, ocupando aproximadamente el 71% de su superficie y representando el 97 % del agua de la Tierra. Se trata del ecosistema más grande del mundo e impulsa los sistemas mundiales que hacen de la Tierra un **lugar habitable** para el ser humano. La lluvia, el agua potable, el tiempo, el clima, los litorales, gran parte de nuestra comida y el oxígeno que respiramos los proporciona y regula el mar (Romera Castillo, 2022);(Thungerb, 2022).

El océano absorbe alrededor del 23% de las emisiones anuales de CO₂ generadas por la acción antrópica y ha absorbido más del 90% del exceso de calor en el sistema climático. Como consecuencia, se está provocando un deterioro continuo de las aguas costeras mediante la contaminación y la acidificación de los océanos generando un efecto adverso sobre el

funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad y, ocasionando a su vez, un impacto perjudicial sobre las **necesidades económicas, sociales y ambientales** de la población global. (Moran, 2023).

Según Las Naciones Unidas “en ningún otro ámbito la importancia de la biodiversidad para el desarrollo sostenible es más esencial que en los océanos”. La biodiversidad marina mantiene el funcionamiento saludable del planeta y proporciona servicios que sustentan la salud y el **bienestar de la humanidad**, formando parte de los tres pilares del desarrollo sostenible – económico, social y ambiental- (Paşca Palmer, 2023).

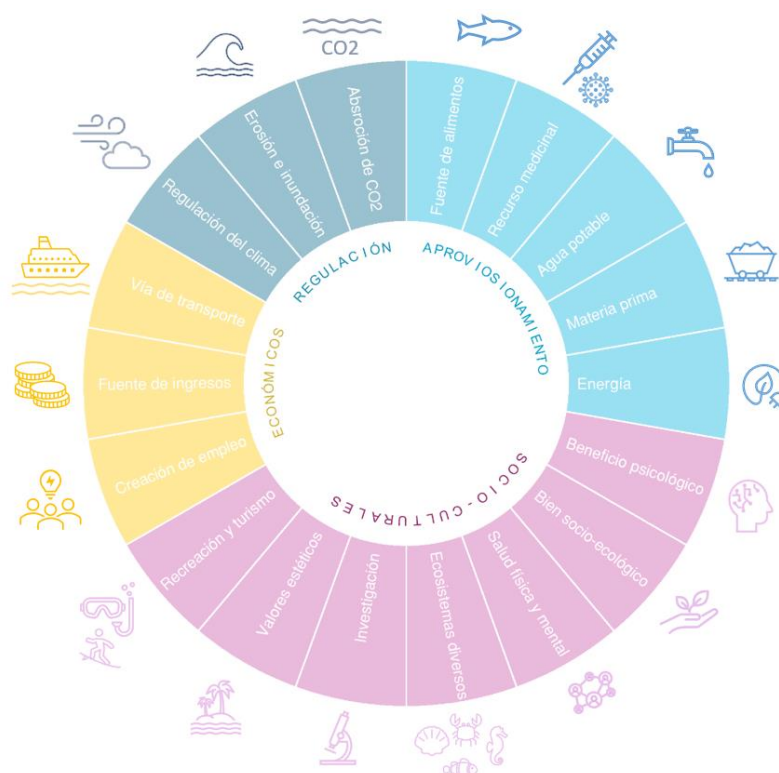


Imagen 10: Diagrama de los servicios ecosistémicos proporcionados por el océano. Fuente: elaboración propia

6. Sustitución del biotopo costero por el entorno construido

6.1. El litoral urbano y su impacto en el medio marino

La influencia antrópica desde los centros urbanos hacia las zonas rurales de la periferia (Yokohari et al., 2000), el crecimiento poblacional y la expansión de la urbanización, han invadido inevitablemente el litoral, provocando alteraciones en los ecosistemas costeros a nivel global. (De Andrés & Barragán, 2016); (*Local Action for Biodiversity Guidebook*, 2010).

Aproximadamente, 30.000 km² de océano han sido modificados por el ser humano (Imagen 11) y se espera que la huella física alcance los 39.400km² para 2028 (Bugnot et al., 2020a). Alrededor del 40% de la población mundial vive en las zonas costeras. En lo que respecta a España, según el informe de la demografía de población costera en 2020 de Eurostat, el 9,9% de los municipios es de tipo costero y ocupan el 8,6% del territorio español, albergando casi el 40% de la población total en 2020 (39,2%)(Gobierno de España, 2022). Este informe indica que la

concentración de población en las áreas costeras les confiere un carácter más urbano y evidencia que, en general, los municipios de la costa son más densamente poblados en comparación con los municipios interiores.

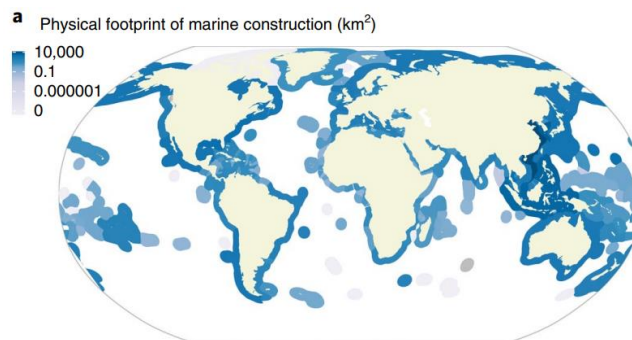


Imagen 11: Mapa de la huella física de la construcción marina a nivel mundial en kilómetros cuadrados. Fuente: (Bugnot et al., 2020b)

Debido a este crecimiento urbano, se requiere una **infraestructura expansiva** que se desarrolla en líneas costeras e invade áreas intermareales y submareales para satisfacer las necesidades de la sociedad (Dugan et al., 2011). Además, se vuelve necesaria una **alternativa de defensa** frente a las inclemencias del mar, de manera que, las líneas costeras son cada vez más **endurecidas** en todo el mundo mediante infraestructuras marinas que tiene una enorme huella ecológica (Bugnot et al., 2020a). En otras palabras, más del 50% de las líneas costeras naturales han sido reemplazadas por rompeolas, muros de contención y otras estructuras duras, en partes de Europa, Estados Unidos y Australia (Dugan et al., 2011);(Bugnot et al., 2020b).

Cabe destacar que, como se mencionó anteriormente, algunos de estos elementos antropizados sirven como espacios aceptables para la colonización de la vida marina, como las boyas (Imagen 12). Sin embargo, la huella física y ecológica de las piezas construidas es considerable, dado que el 70% de las infraestructuras marinas son de hormigón, configuradas con **superficies planas y carentes de grietas** que no facilitan el establecimiento y crecimiento de la vida marina (Imagen 13) (Cáceres, 2022).



Imagen 12: Boya colonizada por organismos marinos en Radazul, Tenerife. Fuente: elaboración propia



Imagen 13: Pared lisa de hormigón, Radazul, Tenerife. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en estuarios y bahías, el desarrollo de la línea de costa y las modificaciones asociadas a la urbanización han tenido **impactos** significativos tanto en la extensión como en la **calidad de los hábitats naturales** (Dugan et al., 2011). Esto se debe a que la infraestructura y el enrocado cubren y reemplazan la vegetación de la línea de costa y los humedales (Imagen 14), reduciéndose las funciones del ecosistema, la conectividad entre hábitats y la filtración del

agua, perdiendo la capacidad de detener los sedimentos y contaminantes del entorno urbano hacia el mar.

Cabe destacar que, la construcción masiva lleva a la **deforestación** para la liberación del espacio, **removiendo la cobertura vegetal** de manera que la tierra expuesta es removida por la lluvia y llega al agua en forma de sedimentos. Como consecuencias de la presencia antrópica en las costas, se generan desechos (pesticidas, detergentes, sedimentos...etc.) y aguas usadas que acaban llegando al océano, ocasionando el crecimiento descontrolado de algas. Estas algas requieren de espacio, luz y nutrientes provocando finalmente, debido a la **biomasa excesiva**, la asfixia o daño de los ecosistemas marinos existentes; este proceso se conoce como **eutrofización** (Imagen 15) (Meza Galicia, 2009).



Imagen 14: Deforestación del manglar en Cancún. Fuente: Colectivo Salvemos Manglar Tajamar.

Imagen 15: Muerte de organismos marinos en el Mar Menor por niveles de hipoxia. Vertido o escorrentía superficial de sustancias resultantes de la agricultura intensiva y otras actividades humanas. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Por último, cabe destacar la creciente expansión oceánica mediante la incorporación de la arquitectura flotante (imagen 16), donde el contacto entre construcción antropizada y medio acuático es aún más notable, así como su impacto directo sobre el ecosistema (Imagen 17).



Imagen 16: Casas Flotantes en IJburg, Amsterdam. Proyecto de 10652m². Fuente: ArchDaily

Las plataformas flotantes **bloquean la luz solar**, reduciendo la fotosíntesis y debilitando el crecimiento de organismos fotoautótrofos¹. Esto disminuye el oxígeno disuelto bajo las plataformas en aproximadamente un 10% sin llegar, de momento, a niveles de hipoxia. Además, **reducen la interacción aire-agua**, lo que puede influir en la cantidad de lluvia local debido a la

¹ Fotoautótrofos: organismos que utilizan la luz solar para producir compuestos orgánicos a partir de dióxido de carbono mediante la fotosíntesis.

menor evaporación, generando un microclima y afectando la transferencia de oxígeno del aire al agua. Las plataformas también elevan las temperaturas locales, ya que acumulan y dispersan el calor y actúan como **barreras contra el viento y el oleaje**, debilitando la reaeración del agua y acumulando basura en áreas estancadas. En el contacto entre la pieza construida y medio acuático, se favorece la bio-incrustación por organismos filtradores que mejoran la calidad del agua, pero aumentan la demanda de oxígeno y nutrientes que, junto a la disminución de organismos fotoautótrofos, **deterioran la calidad del agua** y favorecen la proliferación de especies invasoras (De Lima, De Graaf-van Dinther, et al., 2022);(De Lima, Boogaard, et al., 2022); (Kitazawa et al., 2010).

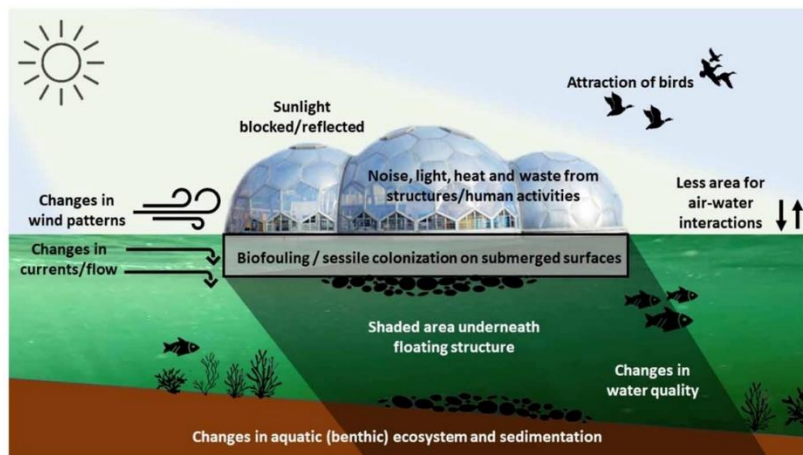


Imagen 17: Cambios que la arquitectura flotante ejerce en los ecosistemas acuáticos bentónicos. Fuente: (De Lima, De Graaf-van Dinther, et al., 2022, p. 2)

6.2. La línea costera en el contexto de Canarias

Una vez realizado un breve acercamiento desde una perspectiva global sobre el entorno urbano y su impacto sobre el medio marino ponemos el foco en las Islas Canarias.

Las Islas Canarias se encuentran dentro de uno de los 25 **puntos calientes de Biodiversidad mundial** (Henríquez, 2019), albergando unas 9000 especies marinas y fondos marinos característicos. Se ubica en una región oceánica privilegiada contando con uno de los cuatro mayores sistemas de afloramiento² del mundo, representando el 8% de la producción primaria del océano mundial y, reconociéndose, desde el Parlamento de Canarias, su importancia ecológica y su necesaria conservación (Conservación de la biodiversidad marina de Canarias, 2022).

En el contexto del archipiélago, el **crecimiento poblacional** hacia el entorno costero y su modificación mediante construcciones artificiales es también notable debido al creciente **valor social y económico de la franja litoral**. Esta zona se utiliza como punto de atracción para la recreación, ocio, descanso, contacto con la naturaleza, turismo y actividades comerciales portuarias, entre otros. Por lo tanto, el entorno marino del archipiélago es percibido públicamente como amenazado, siendo la **presión de la población costera** uno de los problemas principales (Riera et al., 2014). Esta presión se concentra en las islas más pobladas,

² Gran Ecosistema Marino de la Corriente de Canarias (CCLME, Canary Current Large Marine Ecosystem).

Tenerife y Gran Canaria, donde la densidad de población supera los 450 hab/km² en 2023. Canarias se ha identificado recientemente como la comunidad autónoma de España que cuenta con mayor área natural costera desprotegida y casi un 12% de su costa degradada en 2019 (Greenpeace España, 2019, p. 22).

La modificación de los usos del suelo en el litoral no solo implica la ocupación y alteración del paisaje natural a simple vista, sino que también cambia y reemplaza los hábitats naturales y la dinámica de los tramos costeros, tanto terrestres como marinos. Aproximadamente, en 2008, Canarias contaba con unos 142,47km de su entorno costero transformado por la construcción de **estructuras artificiales** como muros de contención, diques, rompeolas o puertos, donde el 73% de dicha cifra pertenecía los Puertos de Interés General (Riera et al., 2014);(Ramírez et al., 2008); (Lloret Capote et al., 2012).

En la Base de Datos de Presiones en Aguas Costeras y de Transición realizada en 2004, se registraron en la Demarcación Canaria un total de 219 alteraciones de la línea costera, donde 116 se trataban de la **ocupación de terrenos intermareales** y 56 a espigones. Aunque estos datos no están actualizados, se mencionan con el fin de reflejar la magnitud de las construcciones en la línea costera hace veinte años, entendiendo las cifras como datos conservadores. Estos datos se contrastan con un informe más reciente de la Demarcación Canaria, referente al período 2011-2016, en el que se registró una pérdida física de sustrato marino de 1.583.816 m², ocasionada por modificaciones antrópicas que van desde playas y diques hasta construcciones ubicadas mar adentro (Martín Partida et al., 2023, p. 15).

La mayor concentración de estructuras costeras (Riera et al., 2014) se encuentran en las zonas denominadas como territorios turísticos costeros destinadas a delimitar, proteger y promover el uso de las playas artificiales y el turismo de sol y playa característico de dichas zonas. Este desarrollo litoral urbano abarca desde la **cumbre de escarpes costeros** hasta construcciones a **línea de costa**. Con ello, se ha ido generando un nuevo paisaje satisfaciendo las demandas económicas, residenciales, turísticas, de transporte y de ocio mediante **actuaciones urbanas desligadas del lugar**. Entre estas actuaciones se encuentran los desmontes del terreno caracterizados por la destrucción de pendientes pronunciadas de roca (Imagen 18), así como la invasión de suelo marino para la expansión urbana e implantación de infraestructuras como puertos y protecciones costeras (Imagen 19).

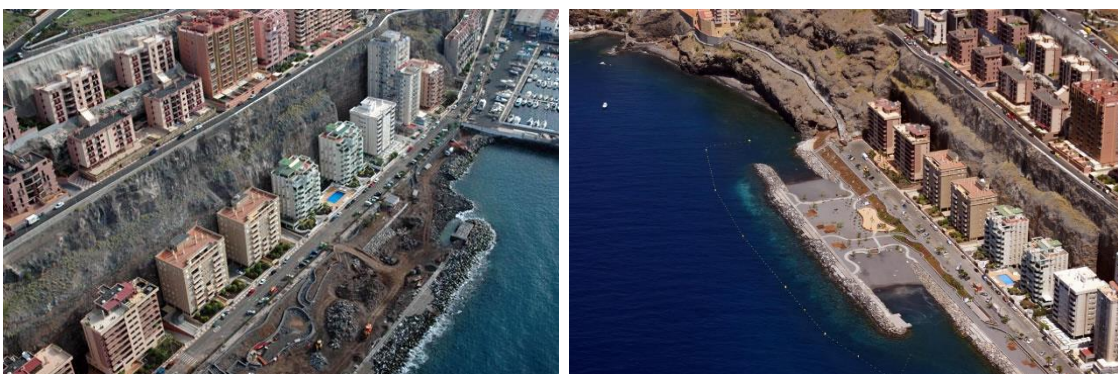


Imagen 18: Modificación y ampliación de la costa para la generación de un punto de ocio y turismo. Destrucción del acantilado para la implantación de edificios residenciales. Fuente: (Galería de Imágenes Del Proyecto (Acondicionamiento Del Frente Litoral de Radazul Entre Radazul y Tabaiba (El Rosario, Tenerife)), s. f.)



Imagen 19: Evolución del crecimiento urbano en Radazul, Tenerife. Años: 1951-1987-2023. Fuente: GRAFCAN

Todo esto evidencia la relación existente en el ámbito canario entre las construcciones y el medio marino, encontrándose ambos en contacto directo e interacción, e influyendo en el biotopo natural de las zonas intermareales y submareales modificadas.

6.3. Complejidad estructural de la zona intermareal e infralitoral de Canarias

Para entender el impacto que generan nuestras estructuras primero debemos entender cómo se conforma y comporta la zona intermareal e infralitoral.

Las aguas costeras con profundidades de hasta 200 metros constituyen entre el 5% y el 10% de la superficie total de los océanos. Sin embargo, estas áreas aportan el 25% de la producción primaria oceánica, albergan el 79% de las especies de peces conocidas y concentran el 90% de la actividad de explotación marina (Carlos Sangil Hernández, 2011).

El archipiélago de origen volcánico contaba en 2008 con una costa conformada por un 82% de sustrato tipo rocoso y un 6,87% de sustrato arenoso. Las islas más antiguas, como Fuerteventura, están más erosionadas y tienen un mayor porcentaje de costa arenosa, mientras que las islas más jóvenes, como Tenerife, presentan costas mayormente rocosas, alcanzando un 85% de su costa en 2008 (Ramírez et al., 2008);(Yanes-Luque, 2019). Esta franja costera rocosa se conforma principalmente por dos zonas diferenciadas: la **zona intermareal** y la **zona infralitoral**.

Rasas intermareales - zona intermareal

Las rasas o plataformas intermareales son áreas de sustrato rocoso con pendientes moderadas que conforman la zona de transición entre el mar y la tierra. Estas zonas experimentan alternancias periódicas entre la inmersión (pleamar) y la emersión (baja mar) (Fernando Espino Rodríguez et al., 2018), donde los organismos marinos se agrupan en estratos horizontales o permanecen asociados a los charcos y pozas formados durante la bajamar. Estos sustratos rocosos están, por tanto, sujetos a fluctuaciones naturales que ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales determinando la zonación intermareal.

Estos agentes naturales son, en primer lugar, las mareas, que actúan en el eje vertical con sus subidas y bajadas, y en segundo lugar el oleaje, que actúa horizontalmente diferenciando las costas protegidas y expuestas. Por tanto, la zonación intermareal se define por la estructuración de los organismos en el eje vertical del sustrato, según la capacidad de resistencia de las comunidades biológicas frente a la emersión durante la bajamar (Ramírez et al., 2008).

Esta zonación se define por 3 subniveles: intermareal superior, medio e inferior, los cuales están influenciados por la rugosidad del sustrato, la pendiente y extensión de las plataformas:

1. Intermareal superior: zona con menor biodiversidad debido al estrés al ser un ambiente seco, influenciado únicamente por la maresía e inmersiones esporádicas. El sustrato

rocoso con **perforaciones naturales** permite almacenar humedad y proporciona refugio frente al sol para los organismos.

2. Intermareal medio: esta zona está expuesta a intervalos de **emersión e inmersión**. El sustrato rocoso presenta una complejidad estructural con un gran número de **grietas y huecos** que son utilizados como refugio por los organismos marinos. Es una zona de gran interés en Canarias por los recursos marisqueros.
3. Intermareal inferior: franja mayormente sumergida y se encuentra más próxima al infralitoral. Zona rocosa dominada por las macroalgas que suministran **hábitat y refugio** a los organismos marinos.



Imagen 18: rasa intermareal mostrando las tres zonas intermareales: superior (izq. -negro), media (centro-amarilla) e inferior (dcha. -parda). Fuente: (Ramírez et al., 2008)

Fondos duros – zona infralitoral

Los fondos duros están conformados por sustratos rocosos caracterizados por la cobertura de macroalgas que pueden extenderse hasta los 25-30m de profundidad³, encontrándose la mayor abundancia (66,7%) en los primeros metros de la **zona infralitoral** (Carlos Sangil Hernández, 2011). Esta vegetación algal frondosa genera la energía para el resto del ecosistema bentónico mediante la síntesis de la materia orgánica. Además, son consideradas “**especies ingenieras/arquitectas**” debido a su capacidad para estructurar el medio con su estructura tridimensional. Las macroalgas aportan complejidad estructural y generan, de alguna manera, la “**arquitectura**” del medio marino en el litoral, ofreciendo hábitat, cobijo, protección y alimento para la flora y fauna asociada. Es por ello por lo que su alta **productividad primaria** es la base de la cadena trófica de los ecosistemas en los ambientes litorales, suponiendo una contribución del 14% de la biodiversidad marina de Canarias (Fernando Espino Rodríguez et al., 2018); (Carlos Sangil Hernández, 2011).

La presencia de estas algas, además de depender de condicionantes ambientales básicos como la luz, el dióxido de carbono, los nutrientes...etc.; cuenta con un factor clave de **supervivencia**: su capacidad de **fijación al sustrato rocoso**. Es importante destacar que en los fondos arenosos no se dan en gran medida debido a la falta de un sustrato complejo/estable al que adherirse y, se considera que la composición química del sustrato no suele ser significativa, ya que su relación principal es de fijación. Por otro lado, las características de **movilidad y textura**

³ Algunos autores consideran su extensión hasta los 60m donde la luz aun es efectiva en Canarias (Armando del Rosario & Francisco del Rosario, 2017, p. 26).

del sustrato son totalmente determinantes suponiendo tanto la dureza como la rugosidad de este, factores que intervienen en el proceso de **fijación y reclutamiento** de las diásporas y plántulas⁴. Una buena fijación/estabilidad del soporte es fundamental para generar ambientes más estables, y por ello un 97,8% de las macroalgas se distribuyen en sustratos con estas características (Carlos Sangil Hernández, 2011).



Imagen 19: *Gongolaria abies-marina*⁵. Macroalga en Canarias. Fuente: Banco de Datos de Biodiversidad Canaria

7. La pieza construida como hábitat artificial marino

Tras este breve acercamiento al funcionamiento y la composición del ecosistema costero canario, ponemos el foco en la relación entre la pieza construida y la complejidad estructural característica del medio marino.

7.1. Relación entre la pieza construida y la complejidad estructural del medio marino

7.1.1. Revisión bibliográfica en el ámbito internacional

En el ámbito internacional, diversas fuentes han estudiado el importante papel que supone la **complejidad estructural** en las interacciones biológicas y en la preservación de la biodiversidad de ecosistemas marinos bentónicos. En ellos, se concluye que este actúa como un **componente esencial y fundamental** que afecta a la diversidad y productividad del ecosistema (Juan Carlos Montes Herrera, 2018); por otro lado, vinculan la sustitución del sustrato natural del entorno costero por el sustrato artificial de las piezas construidas, empobreciendo y generando unas costas con biotopos y comunidades biológicas de baja calidad.

No se pretende detallar con exactitud todas las fuentes consultadas, pero se aporta una lista de las más reconocidas y vinculantes para luego centrarnos en el ámbito concreto de Tenerife.

- Loss of coastal ecosystem spatial connectivity and services by urbanization: Natural-to-urban integration for bay management (Aguilera et al., 2020).
- Structural complexity and component type increase intertidal biodiversity independently of area (Loke & Todd, 2016).

⁴ El ciclo de vida de las algas cuenta con un proceso pelágico y bentónico. Las diásporas son partículas en la columna de agua que buscan un sustrato al que adherirse y completar su ciclo de vida.

⁵ Se trata de una de las algas que mayor complejidad estructural aporta al medio. Sus poblaciones han sufrido un retroceso debido a la alteración de la dinámica costera por construcciones en el litoral, así como por parámetros químicos, como la contaminación por afluentes urbanos, entre otros (Alfonso-Carrillo, 2021).

- Potential impacts of marine urbanization on benthic macrofaunal diversity (Momota & Hosokawa, 2021).
- Current and projected global extent of marine built structures (Bugnot et al., 2020b).
- Enhancing the Biodiversity of Marine Artificial Structures (Evans et al., 2021).

7.1.2. Revisión bibliográfica en el ámbito de Tenerife

Se realiza una búsqueda bibliográfica enfocada en el ámbito de la Isla de Tenerife, identificándose dos fuentes bibliográficas de interés para el marco de este trabajo. Estas investigaciones relacionan el impacto generado por los sustratos artificiales costeros en la biodiversidad marina mediante su comparativa con los sustratos naturales.

En este breve apartado se pretende hacer un resumen de la información obtenida con el fin de entender la **calidad ecológica de la infraestructura costera** existente en Tenerife. Ambas fuentes resaltan la necesidad de implementar acciones específicas en el diseño exterior de las construcciones que interactúan con el mar.

- Biodiversidad marina en sustratos artificiales y naturales litorales de la isla de Tenerife (Sanabria-Fernandez, 2014).

Esta investigación se basa en el estudio de 10 localidades del litoral de Tenerife censando la biodiversidad marina en 1000m² mediante el muestreo en sustratos naturales y artificiales (puertos y espigones). Se obtienen unas diferencias significativas en varias especies, pero en general no se encontraron marcadas diferencias en los niveles de diversidad de especies y composición faunística. Sin embargo, destacan que la abundancia de algunas especies, a medida que pasan los años es mayor en sustratos naturales que en los artificiales (Sanabria-Fernandez, 2014).

Se destaca en las conclusiones de dicho artículo que, el impacto generado por la sobrepesca, incluyendo la eliminación de grandes depredadores, así como la contaminación y la alta presión turística que sufre el litoral canario, presentan una **degradación previa** tan importante que las comunidades biológicas no difieren entre los sustratos artificiales y los fondos rocosos naturales.



Imagen 20: Mapa de las localidades de muestreo entre el sustrato natural y artificial. Fuente: (Sanabria-Fernandez, 2014)

- Building up marine biodiversity loss: Artificial substrates hold lower number and abundance of low occupancy benthic and sessile species (Sanabria-Fernandez et al., 2018).

Este estudio se basó en evaluar y comparar el desempeño de sustratos artificiales y naturales en términos de diversidad y abundancia de especies marinas. Su objetivo principal era determinar si los sustratos artificiales existentes en la **isla de Tenerife** podrían servir como **sustitutos efectivos** de los naturales para la conservación de la biodiversidad marina, centrándose en la ocupación de especies bentónicas⁶ y sésiles⁷. El estudio se realiza en las mismas localidades de la investigación mencionada en el apartado anterior.

Table 1

Sampling locations (and numbers for their identification in Fig. 1) with average depth (m), latitude and longitude for both natural and artificial substrates, age of the artificial substrate (in years from submersion to sampling time) and type of material used for the construction of the breakwaters, i.e., material of artificial substrates.

Number	Location	Natural Substrate (NS)	Depth NS	Artificial Substrate (AS)	Depth AS	Age AS	Material AS
1	Garachico	28°22'17.38" N 16°45'10.33" W	5	28°22'24.13" N 16°45'09.62" W	2.5	0	Concrete
2	Teno	28°20'32.78" N 16°55'06.98" W	4.6	28°20'30.86" N 16°55'11.27" W	5.4	34	Concrete
3	Santiago	28°16'06.98" N 16°51'05.11" W	6.8	28°14'54.31" N 16°50'34.74" W	8.8	35	Concrete
4	San Juan	28°10'46.50" N 16°49'10.26" W	6.2	28°10'46.03" N 16°48'57.61" W	6.6	24	Concrete
5	Colón	28°06'00.46" N 16°45'20.83" W	7.9	28°04'47.04" N 16°44'17.59" W	7	27	Concrete
6	San Miguel	28°01'21.15" N 16°36'33.25" W	3.7	28°01'17.96" N 16°36'36.42" W	4.7	8	Concrete
7	Granadilla	28°05'16.07" N 16°29'25.39" W	6.5	28°05'14.39" N 16°36'37.25" W	3.3	18	Concrete
8	Güímar	28°17'42.79" N 16°22'21.10" W	3.8	28°17'16.32" N 16°22'42.67" W	3.2	4	Quarry rock
9	Caletillas	28°23'02.74" N 16°21'11.87" W	3.6	28°22'54.29" N 16°21'21.81" W	5.9	54	Concrete
10	Radazul	28°24'07.77" N 16°19'39.77" W	6	28°24'05.50" N 16°19'35.72" W	5.8	4	Quarry rock

Imagen 21: Tabla resumen de los puntos de muestreo. Fuente: (Sanabria-Fernandez et al., 2018)

- El estudio encontró evidencia de desempeño reducido de los sustratos artificiales existentes de hormigón y rocas en comparación con los sustratos naturales, especialmente en especies de baja ocupación con movilidad media y baja (las especies de movilidad alta tienen mayores posibilidades de colonizar otros espacios, mientras que los de movilidad media-baja dependen directamente del sustrato al que adherirse).
- Los sustratos naturales mostraron consistentemente una mayor diversidad y riqueza biológica y más especies exclusivas que en el sustrato artificial.

Como conclusión, demuestran que los sustratos artificiales existentes estudiados en la isla de Tenerife **no logran** replicar una parte importante de la biodiversidad asociada a los sustratos naturales. Por tanto, sugieren que los sustratos artificiales existentes **no son sustitutos adecuados** para sus contrapartes naturales (Sanabria-Fernandez et al., 2018). Por otro lado, mencionan algunas de las causas estudiadas por las que se identifican cambios de diversidad, destacando el condicionante de la **simplicidad formal de los sustratos artificiales** frente a la complejidad de los naturales.

⁶ Especies bentónicas: especies asociadas al fondo marino – bentos.

⁷ Especies sésiles: organismos sujetos al sustrato.

Se aportan fotos de algunos de los lugares testeados, apreciándose las superficies lisas de las piezas donde la mayor complejidad estructural se consigue mediante el apilamiento de las rocas o de los módulos de hormigón.



Imagen 22: Imagen tetrápodos de Garachico. Fuente: Juan Diego López Arquillo



Imagen 23: Escollera de Radazul. Fuente: elaboración propia

7.2. Condiciones de diseño de la pieza construida como hábitat marino artificial

Se realiza una búsqueda bibliográfica con el fin de obtener los **condicionantes de diseño** indispensables para la proyección de construcciones artificiales de **reducido impacto ecológico** en contacto con el entorno marino. De todas ellas, se seleccionan dos altamente reconocidas y recientes: la primera perteneciente a la asociación Ecological Society of America⁸ y la segunda perteneciente la Universidad de Cambridge:

- Structural complexity and component type increase intertidal biodiversity independently of area. (Loke & Todd, 2016)

La finalidad de este estudio era examinar como la complejidad estructural y el tipo de componentes del sustrato afectan la biodiversidad intermareal asociada en Singapur. Se diseñaron sustratos de hormigón de igual área con diferentes niveles de complejidad (surcos, torres y pozos) para observar la influencia de dichas variables (Loke & Todd, 2016).

⁸ ESA: Organización profesional de científicos ecológicos con sede en los Estados Unidos. Las publicaciones de esta asociación incluyen revistas revisadas por pares, hojas informativas, boletines y recursos didácticos.

Los muestreos y resultados obtenidos demuestran que los sustratos más complejos tienden a albergar una mayor diversidad de especies; y que, el tipo de estructura y su escala mediante **pozos, surcos o torres** (imagen 24) afectan directamente a la riqueza y composición de la comunidad biológica. Por otro lado, destacan la existente simplificación de los hábitats costeros caracterizados por las superficies lisas de las infraestructuras en contacto con el mar, poniendo el foco en la importante relación que existe entre los organismos identificados en los muestreos y **la amplitud del nicho de hábitat artificial**. Esta relación se debe a la existencia de un nicho capaz de retener humedad y proporcionar refugio a los organismos, destacando finalmente la importancia de la reintroducción de la complejidad mediante el **diseño superficial** en las infraestructuras costeras.

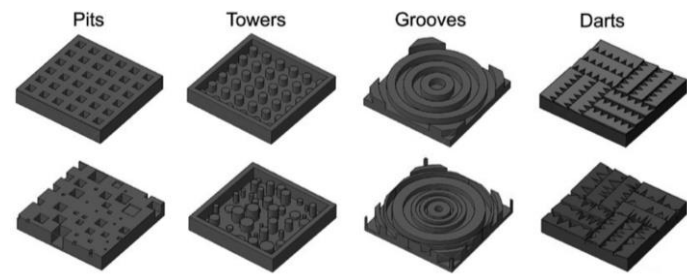


Imagen 24: Piezas con los pozos, torres y surcos para el testeo. Fuente: (Loke & Todd, 2016)

- [Enhancing the Biodiversity of Marine Artificial Structures](#) (Evans et al., 2021)

El objetivo de la investigación mencionada es recopilar y presentar la evidencia científica global sobre la efectividad de diversas intervenciones para aumentar la biodiversidad en estructuras marinas artificiales. Su finalidad es que sirva de evidencia y fuente de información para ayudar en la **toma de decisiones** para las intervenciones artificiales en contacto con el mar, promoviendo la gestión y conservación del medio marino y su biodiversidad asociada (Evans et al., 2021).

Por lo tanto, tras la revisión bibliográfica de diversas fuentes, esta guía se toma como referencia final para obtener una **recopilación de condiciones de diseños**, efectivos y científicamente comprobados, aplicables a la hora de diseñar construcciones artificiales en contacto con el medio marino. Se obtienen los siguientes criterios:

Criterios de diseño para las superficies de las construcciones artificiales en contacto con el entorno marino		
Condicionantes de diseño	Zona intermareal	Zona submareal
Superficies texturizadas	Crear superficies de texturas finas ($\leq 1\text{mm}$) para proporcionar nichos adicionales, aumentar la complejidad del hábitat y generar microhábitats	
Topografías	Crear topografías complejas imitando los hábitats naturales	Imitar la topografía compleja de los arrecifes naturales
Cavidades	Incorporar agujeros pequeños (1-50mm) y cavidades (>50mm) como refugios	Incorporar agujeros pequeños (<100mm) y cavidades (>100mm) como refugios
Ranuras y grietas	Crear ranuras (1-50mm) y grietas (50mm) generando distintos tipos de hábitats	
Protuberancias	Elevaciones pequeñas (1-50mm) y grandes (>50mm) para complejizar la estructura y ofrecer hábitats adicionales	
Pozas-piscinas	Formar pequeñas depresiones capaces de retener agua durante la marea baja	-
Conexión de cavidades	Diseñar cavidades conectadas de mayor tamaño para organismos mayores y complejidad	
Crestas o repisas	Crestas pequeñas (1-50mm) y grandes (>50mm) como variedad de refugios	

Tabla 1: Tabla resumen de los criterios de diseño obtenidos de (Evans et al., 2021). Fuente: elaboración propia

8. Propuesta de diseño arquitectónico

8.1. Introducción

Después de explorar exhaustivamente el entorno costero y la expansión oceánica global, y ante la falta de una solución clara para abordar esta invasión del territorio sin perjudicar los ecosistemas, se propone una **acción a pequeña escala** que pueda involucrar y concienciar a los arquitectos en la **toma de decisiones** respecto a sus intervenciones en contacto con el medio marino.

Se propone la aplicación del diseño paramétrico como herramienta de trabajo y proyección para la **intervención urbana**, enfocada en la sensibilización y sostenibilidad entre el **entorno construido y el ecosistema asociado**. Mediante la exploración de las formas de diseño, aplicables al diseño de las piezas construidas, se busca ampliar el campo de visión como arquitectos facilitando nuestra integración en equipos multidisciplinares y **reduciendo la huella ecológica** de las construcciones.

Por otro lado, se busca **involucrar al arquitecto** de manera **consciente** en el diseño de sus construcciones desde el inicio de su proyección. Actualmente, en el ámbito del litoral urbano, esta actuación suele ser una medida post-construcción, liderada por ingenieros y biólogos marinos, orientada a mitigar huella de las construcciones existentes cuando el ecosistema ya ha sido dañado. Con todo esto, se pretende promover que la **actuación arquitectónica no solo satisfaga las necesidades humanas**, sino que también considere, en la medida de lo posible, las necesidades del espacio invadido y modificado por dicha intervención.

8.2. Diseño paramétrico

El diseño paramétrico es un enfoque del diseño que se basa en la utilización de **algoritmos y parámetros** definidos para generar formas y estructuras. Se trata de un recurso innovador aplicable a distintas escalas como el diseño industrial, la arquitectura, el urbanismo, la joyería o el mobiliario, entre otros. En comparación con el diseño tradicional, donde las formas son creadas manualmente, el diseño paramétrico se basa en la manipulación de variables y reglas matemáticas para la construcción de **geometrías complejas y adaptativas**.

La utilización de este tipo de diseño se puede realizar mediante softwares de **modelado 3D**, por medio de herramientas como Grasshopper para Rhinoceros o Dynamo para Revit, entre otros. Para la realización de este trabajo, nos hemos apoyado en el software de modelado Rhinoceros mediante su extensión/plug-in de **Grasshopper**.

Grasshopper es un lenguaje de programación visual (de nodos) que se basa en la definición de unos parámetros y variables definidos como **“inputs”** que, mediante una serie de algoritmos o reglas, generan un resultado denominado **“outputs”**.

- Input: entrada de información en un sistema informático (ASALE & RAE, 2024e)
- Output: salida de información previamente procesada por un sistema informático (ASALE & RAE, 2024f).

Se muestra un ejemplo de trabajo en Grasshopper para la generación de una polilínea (Imagen 26), a modo de simulación sencilla que refleja el flujo de trabajo con el software seleccionado.

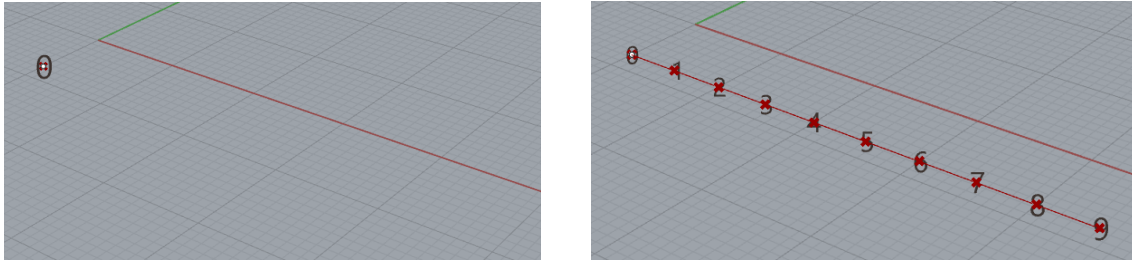


Imagen 25: Generación de una polilínea a partir del punto base 0 por medio de Grasshopper. Fuente: elaboración propia

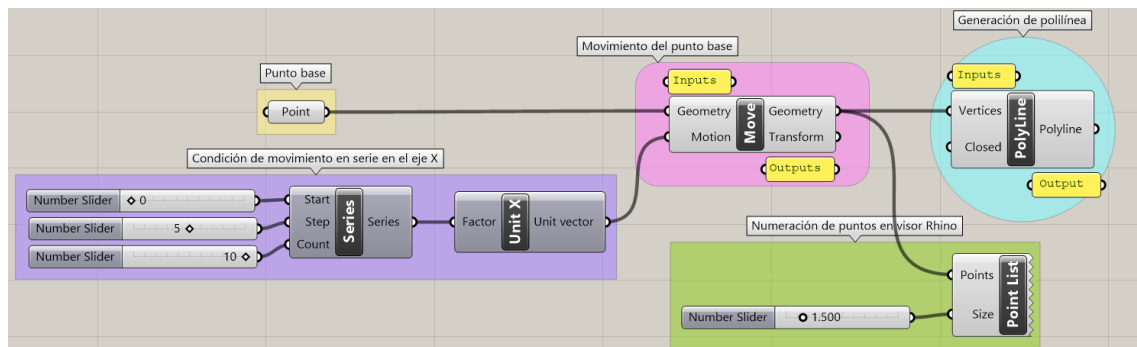


Imagen 26: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación de la polilínea a partir del punto base 0. Fuente: elaboración propia

Como se puede ver en el ejemplo anterior, todos los parámetros (input) son fácilmente modificables mediante, en este caso, los controladores “slider”. Esto permite la **iteración rápida** de múltiples opciones de diseño, visualizando automáticamente los cambios en tiempo real y facilitando la exploración y optimización de las geometrías y los modelos deseados. Por lo tanto, mediante el conjunto de inputs y outputs, se obtiene un código de componentes conformadores de la geometría proyectada que es totalmente **adaptable y manipulable** a las necesidades de diseño requeridas.

En el campo de la arquitectura destaca la aplicación del diseño paramétrico relacionado con la naturaleza, donde las pieles de los edificios (cubiertas y cerramientos) se basan en la **biomimesis**. La biomimesis o biomimética, se trata de la imitación de los diseños y procesos de la naturaleza en la resolución de procesos tecnológicos. Dentro de este campo, destaca la **morfogénesis** de la forma, es decir, el proceso de generación de la forma. Esto se trata de encontrar las leyes matemáticas detrás de dichos patrones naturales con el fin de generar algoritmos que reproduzcan esos fenómenos artificialmente (Mallo, 2013). Algunos ejemplos destacados de arquitectura biomimética son: el Al Bahar Towers en Abu Dabi, con una fachada dinámica conseguida a partir del modelado paramétrico y respondiendo a un movimiento inspirado en la respuesta de las plantas nativas al clima; y el Cubo de Agua de PTW Arquitectos para el Centro Acuático Nacional, donde se reflejan unas fachadas que siguen el patrón del diagrama de Voronoi⁹.

⁹ Diagrama de Voronoi: estructura matemática que imita la organización espacial de los sistemas naturales dividiendo un espacio en regiones, cada una asociada a un conjunto de puntos principales en el espacio.



Imagen 27: Al Bahar Towers en Abu Dabi y Cubo de Agua de PTW Arquitectos. Fuente: ArchDaily

8.3. Exploración de las formas mediante el diseño paramétrico

Nos centramos en la exploración de las formas mediante el diseño paramétrico, generando un abanico de posibilidades aplicables al diseño de las superficies exteriores de las construcciones marinas. Para esta exploración, se toman como base los condicionantes establecidos en el apartado 7.2. *Condiciones de diseño de la pieza construida como hábitat marino artificial*, que sirven de guía para adaptar nuestra proyección a las necesidades ecológicas del medio marino.

Resumen de los condicionantes básicos de diseño para la pieza construida en contacto con el medio marino:

- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Superficies texturizadas | 5. Protuberancias |
| 2. Topografías complejas | 6. Pozas-piscinas |
| 3. Cavidades | 7. Conexión de cavidades |
| 4. Ranuras y grietas | 8. Crestas o repisas |

Para ello centramos la exploración en tres apartados principales. En primer lugar, se plantea un breve acercamiento a la exploración de las formas por medio de **ecuaciones matemáticas**. Este método se realiza como ejercicio previo, **buscando el control de las formas**, y se usa como herramienta de aproximación y replanteo rápido de superficies curvas y sinuosas.

El segundo apartado, se basa en la exploración de la morfología general de los fondos marinos, basado en la **biomimesis de la pieza proyectada con su homólogo natural**. Con este apartado se obtiene una amplia visión de la complejidad morfológica del medio, sentando unas bases de **diseño armonioso** con el entorno existente.

El tercer apartado se basa en la **mimesis e interpretación de los sustratos rocosos** existentes. Como se ha detallado anteriormente, los sustratos rocosos cuentan con su propia complejidad estructural, suponiendo la base natural de adherencia de la flora y fauna marina. Se procede a su exploración formal bajo la idea de **“devolver” al medio el sustrato arrebatado**.

8.3.1. Exploración de la fórmula matemática aplicada a la geometría tridimensional

Como paso previo a la exploración de formas más complejas, se plantea un acercamiento a la generación de superficies base mediante fórmulas matemáticas proporcionando una herramienta básica para acercarnos a la configuración de las geometrías deseadas.

Para ello, se utiliza el software GeoGebra 3D, mediante el que se ha trabajado con diversas funciones matemáticas. Las condiciones para este método se basan en experimentar con **funciones periódicas**, como las funciones trigonométricas, que son capaces de generar un

modelo repetitivo, proporcionando un **patrón controlable y escalable** a las necesidades requeridas.

En esta exploración, nos centramos en las operaciones de **senos y cosenos**, de forma singular y mediante su combinación. Se muestra únicamente el caso de la operación con el $\sin(x)$, ya que se trata de un ejemplo sencillo en el que se aprecian las variaciones realizadas, siendo un método aplicable para otras fórmulas matemáticas.

Las variaciones dentro de estas pruebas se basan en la utilización de **exponentes y coeficientes** con el fin de generar superficies más sinuosas, abruptas o lisas, con la presencia de cavidades o ranuras en mayor o menor medida. Todo ello presenta un modelo que, mediante una función matemática, puede adaptarse a las distintas condiciones de diseño requeridas, permitiendo así la generación de prototipos con distintos **índices de rugosidad¹⁰ controlables**.

- **Aplicación de coeficientes:** aumenta o disminuye la amplitud de la función sinusoidal, manteniendo su trazo inicial y aportando una topografía más o menos abrupta o afilada.

La amplitud del $\sin(x)$ es 1, por lo que sus valores oscilan entre 1 y -1. Al aplicar un coeficiente, la amplitud se escala por ese factor, como se puede comprobar en la imagen 28, donde la función $4 \cdot \sin(x)$ oscila entre 4 y -4.

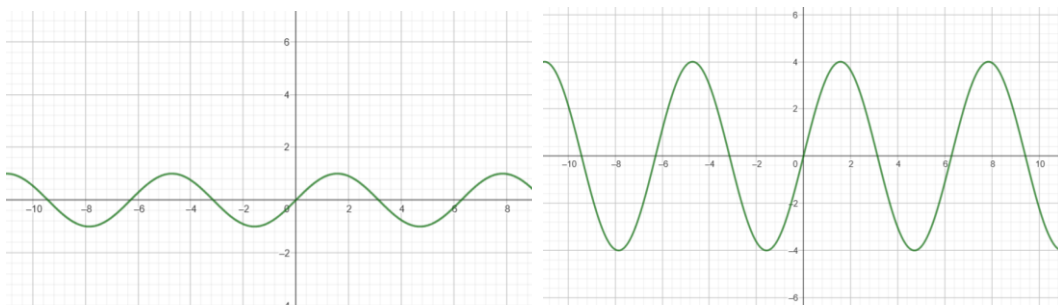


Imagen 28: 1º gráfico $f(x) = \sin(x)$; 2º gráfico $f(x) = 4 \cdot \sin(x)$. Gráficos realizados mediante GeoGebra Clásico.

- **Aplicación de exponentes:** varía la forma de la onda de dos maneras
 - Exponente par: cualquier número elevado a una potencia par es no negativo. Por tanto, la función será siempre no negativa y la onda oscilará entre los valores 0 y 1 (Imagen 29). Con ello obtenemos una superficie más rugosa y aplanada.

¹⁰ El índice de rugosidad es un valor numérico, utilizado en biología marina, que indica la complejidad de los hábitats/fondos marinos. El método de la cuerda es una técnica sencilla utilizada para su medición. Se basa en colocar una cuerda sobre la superficie del hábitat, siguiendo todas sus irregularidades, como crestas y surcos. Luego, se mide la longitud de la cuerda desplegada y se divide por la distancia lineal directa entre el inicio y el final del tramo estudiado. Este cálculo proporciona un índice de rugosidad, donde valores mayores a 1 indican superficies cada vez más complejas y rugosas.

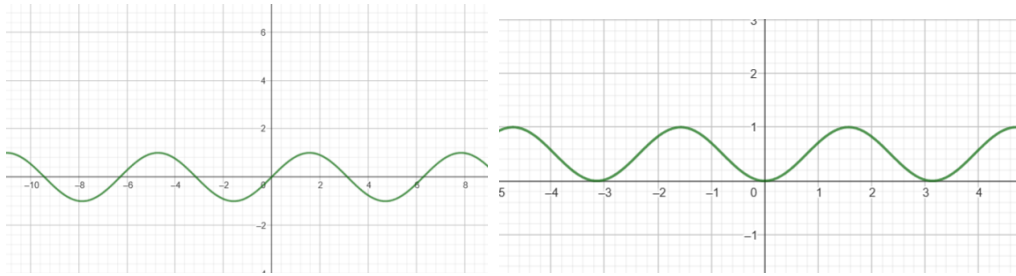


Imagen 29: 1º gráfico $f(x) = \text{sen}(x)$; 2º gráfico $f(x) = \text{sen}^2(x)$. Gráficos realizados con GeoGebra Clásico

- **Exponente impar:** cualquier número elevado a una potencia impar mantendrá su signo, por lo tanto, la función seguirá oscilando de 1 a -1, pero generando una variación respecto a la onda inicial (Imagen 30). Con ello, obtenemos una superficie más compleja que empieza a parecerse a la abstracción de una superficie rocosa.

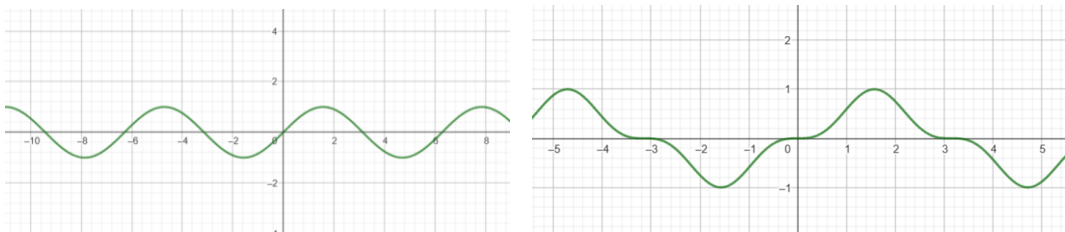


Imagen 30: 1º gráfico $f(x) = \text{sen}(x)$; 2º gráfico $f(x) = \text{sen}^3(x)$. Gráficos realizados con GeoGebra Clásico

- **Aplicación tridimensional:** para la aplicación de la fórmula matemática a la geometría tridimensional trabajamos con la función del seno en el eje X e Y.

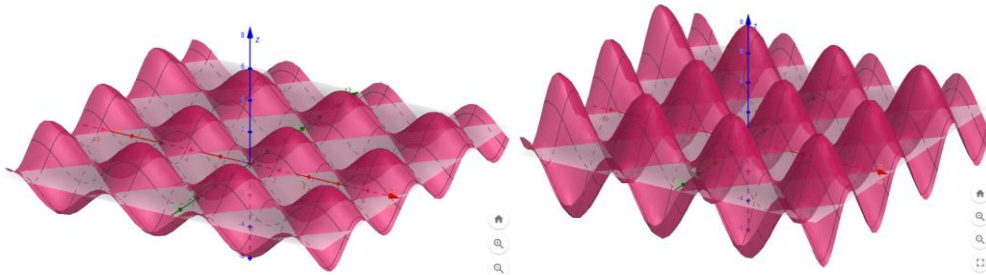


Imagen 31: Primer modelo: $a(x,y) = \text{sen}(x) + \text{sen}(y)$; Segundo modelo: $a(x,y) = 2 \cdot \text{sen}(x) + 2 \cdot \text{sen}(y)$

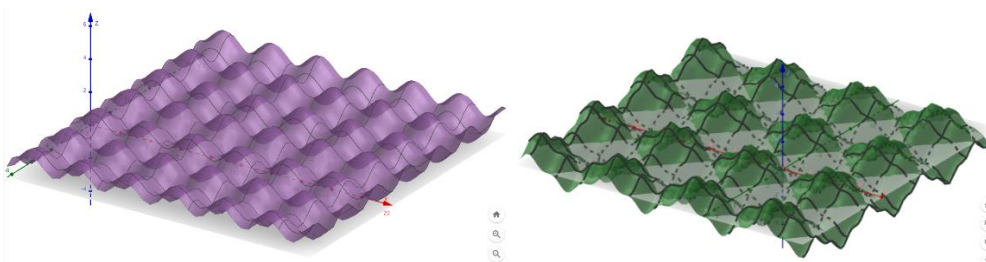


Imagen 32: Primer modelo: $a(x,y) = \text{sen}^2(x) + \text{sen}^2(y)$; Segundo modelo: $a(x,y) = \text{sen}^3(x) + \text{sen}^3(y)$

Otras posibles iteraciones matemáticas para la generación de la forma:

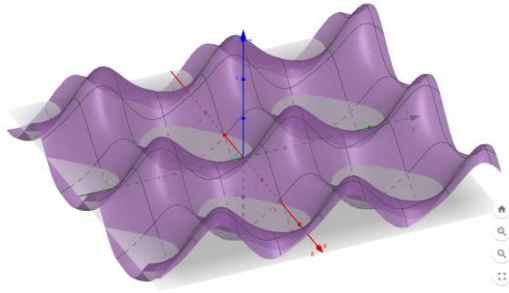


Imagen 33: $a(x,y) = \text{sen}(y) + \text{sen}(x) + \cos(\cos(x) + \cos(y))$

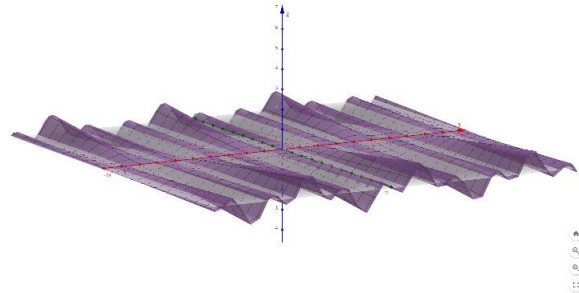


Imagen 34: $a(x,y) = 0.1y * 2 * \text{sen}(x) * \cos(2x)$

Este método sugiere una forma sencilla de testear distintos patrones y configuraciones de superficies, sirviendo como una herramienta gráfica para aproximarse a soluciones simples, que luego podrán ser reinterpretadas y complejizadas según las condiciones de diseño requeridas.

8.3.2. Exploración de la morfología de los fondos marinos

Se realiza un breve recorrido por la morfología del medio marino Canario con el fin de poder generar una intervención armoniosa con el medio mediante un **proceso de biomímesis**. Para ello se hace una revisión de las guías de biodiversidad marina de Canarias seleccionando algunos de los organismos más complejos estructuralmente.

Nos centramos específicamente en las esponjas Hemimycale Columella, Axinella Damicornis, y en las algas Hydroclathrus Clathratus y Padina Pavonica; todas ellas características de la isla de Tenerife y el archipiélago en general, capaces de reflejar la variedad morfológica de los fondos marinos.

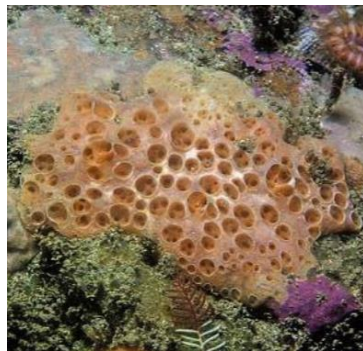


Imagen 35: Mímesis de la complejidad estructural de Hemimycale columella mediante Grasshopper. Fuente: elaboración propia.

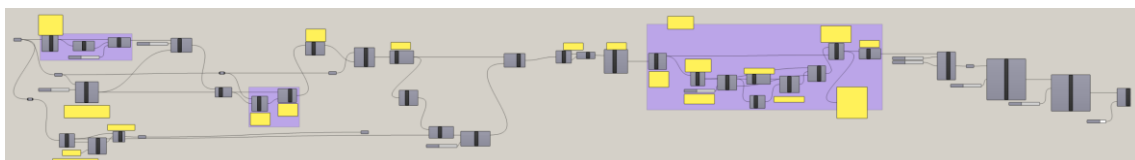


Imagen 36: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación de la forma. Fuente: elaboración propia

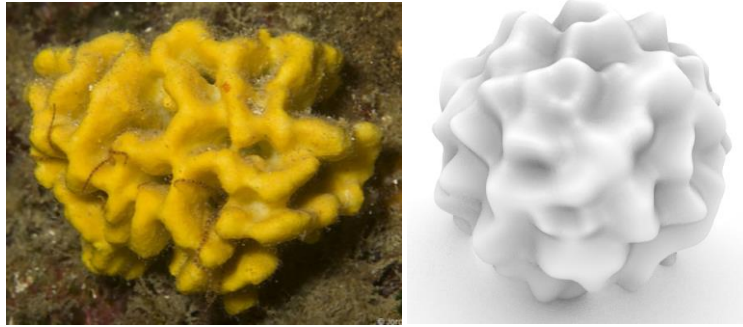


Imagen 37: Mímesis formal de *Axinella Damicornis* mediante Grasshopper. Fuente imagen: (Facultad de biología UB, 2024) Fuente del modelo: elaboración propia

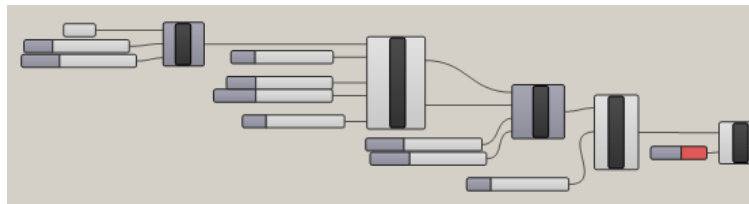


Imagen 38: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación de la forma. Fuente: elaboración propia



Imagen 39: Mímesis de la complejidad estructural del conjunto de algas *Hydroclathrus Clathratus* mediante Grasshopper. Fuente imagen: Natusfera. Fuente del modelo: elaboración propia

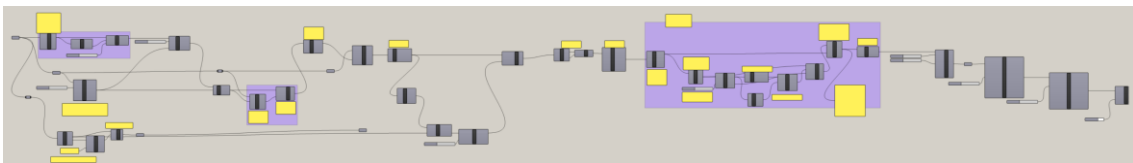


Imagen 40: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación de la forma. Fuente: elaboración propia



Imagen 41: Alga *Padina Pavonica*. Fuente: (Facultad de biología UB, 2024)

Gyroid¹¹: $\sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) \cdot \cos(x)$

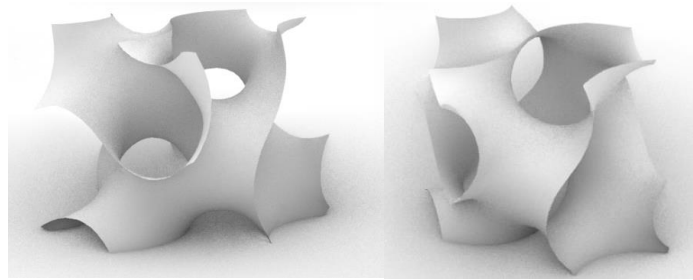


Imagen 42: Célula de Gyroid. Fuente: elaboración propia

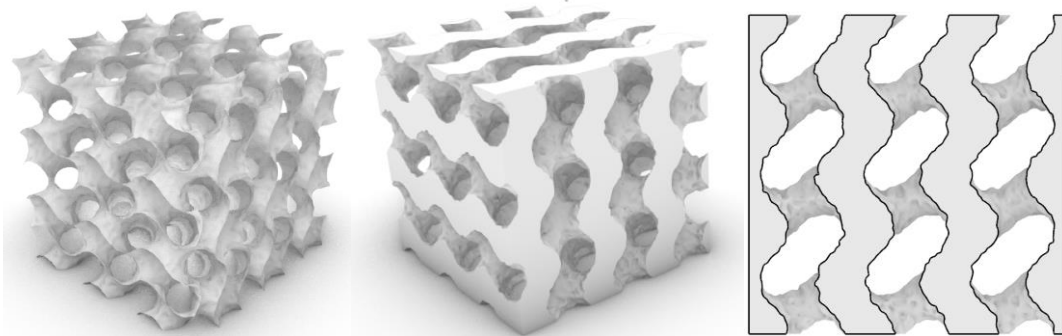


Imagen 43: Complejidad y rugosidad de la célula de Gyroid mediante Grasshopper. Fuente: elaboración propia

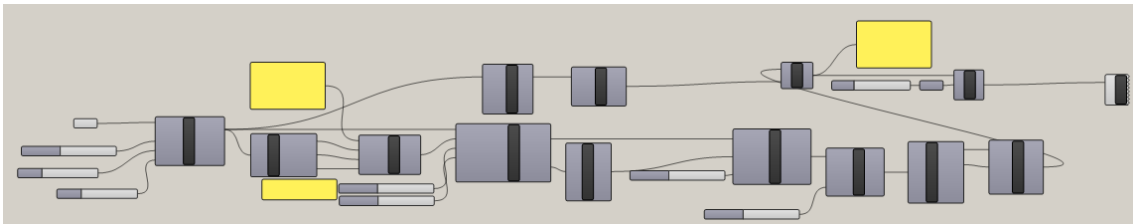


Imagen 44: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación de la célula Gyroid. Fuente: elaboración propia

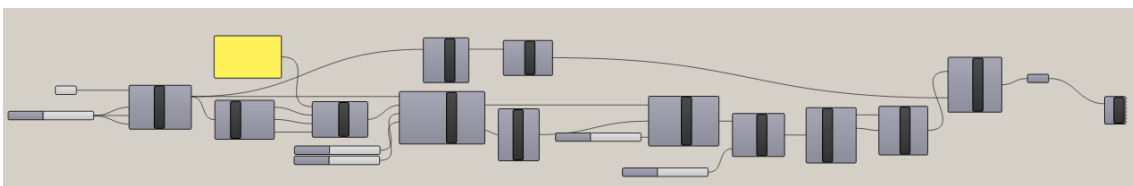


Imagen 45: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación de la complejidad y rugosidad de la célula. Fuente: elaboración propia

Obtenemos unos condicionantes comunes de diseño caracterizados por la sinuosidad de las formas, las redes de conexiones internas complejas y la presencia de cavidades individuales y conectadas entre sí, características del conjunto de la diversidad biológica marina.

¹¹ Gyroid: superficie mínima infinitamente periódica descubierta por Schoen en 1970 y que tiene tres simetrías rotacionales. El límite de la superficie se basa en las seis caras de un cubo.

8.3.4. Exploración formal de los sustratos naturales

Considerando la importancia del sustrato rocoso como base principal de adherencia de la flora y fauna marina, se procede a la **mímesis e interpretación** de este. Para ello, se realizan visitas de campo a zonas intermareales de Tenerife, obteniendo un visual general de su morfología y, observando y comprobando, como los condicionantes de diseño mencionados en la Tabla 1 del apartado 7.2. *Condiciones de diseño de la pieza construida como hábitat marino artificial* de este documento, se ven reflejados en los sustratos naturales.

Se visitaron dos lugares específicos influenciados por la presión antrópica del litoral urbano. El primer lugar es Bocacangrejo, un pueblo en la línea de costa caracterizado por la autoconstrucción en el propio sustrato rocoso del litoral (imagen 46). El segundo lugar es El Puerto de la Cruz, caracterizado por ser un territorio turístico costero de interés en la isla de Tenerife con una población de 30.849 habitantes en el año 2023 (imagen 47).

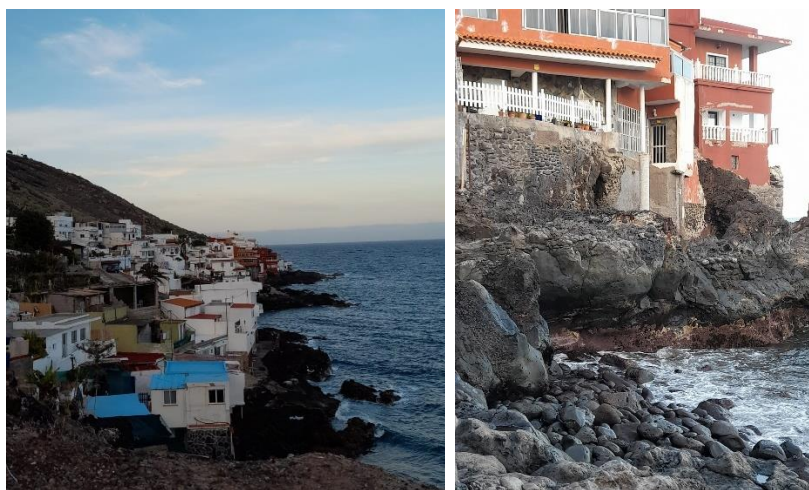


Imagen 46: Pueblo de Bocacangrejo, Tenerife. Localización para toma de fotos del sustrato rocoso. Fuente: elaboración propia



Imagen 47: Puerto de la Cruz, Tenerife. Localización para toma de fotos del sustrato rocoso. Fuente: elaboración propia

Recopilación de fotos de interés:

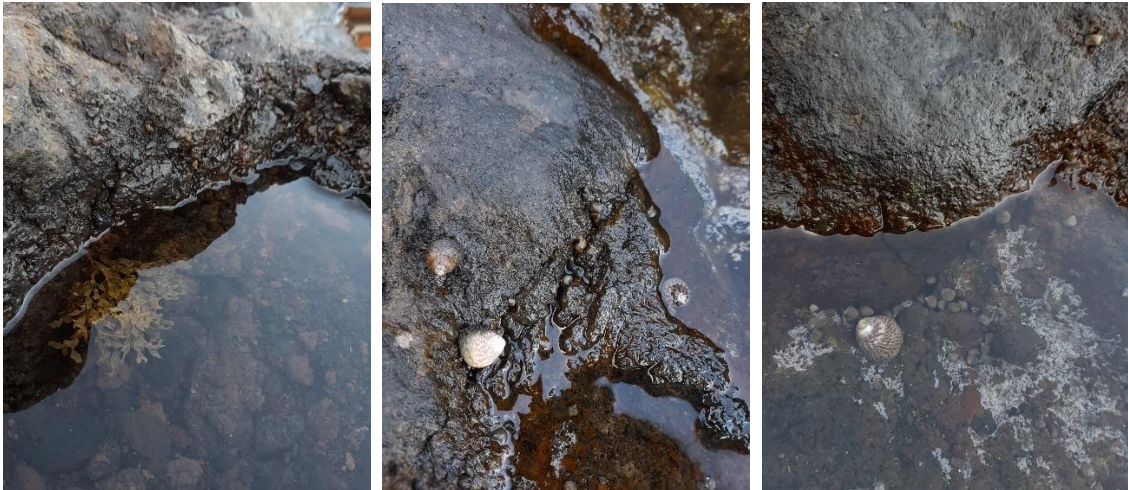


Imagen 48: Adherencia de algas y moluscos a las grietas y orificios del sustrato natural de Bocacangrejo, Tenerife. Fuente: elaboración propia



Imagen 49: Complejidad estructural mediante grietas y orificios de los sustratos naturales de Bocacangrejo, Tenerife. Fuente: elaboración propia





*Imagen 50: Complejidad estructural del sustrato rocoso la zona intermareal de El Puerto de la Cruz, Tenerife.
Fuente: elaboración propia*

Tras este breve acercamiento, se procede a explorar modelos de diseño para la mimesis y reinterpretación de las rocas mediante Grasshopper.

Mimesis y reinterpretación de la complejidad estructural del sustrato natural:

Se plantea la exploración del diseño partiendo de una interpretación general de la complejidad estructural del sustrato rocoso. Este método se basa en proyectar una **topografía abrupta** y una **superficie texturizada** mediante la generación de pequeñas cavidades y elevaciones, a través de un diseño sinuoso obtenido a partir de la función matemática del seno. Con este planteamiento, se generan esos nichos que ofrecen espacios de protección para los organismos, así como un sustrato complejo, rígido y estable, favorable para la adherencia de la flora asociada. Se parte del modelo básico matemático $\text{sen}(x)+\text{sen}(y)$ como referencia para su posterior reinterpretación y complejización:

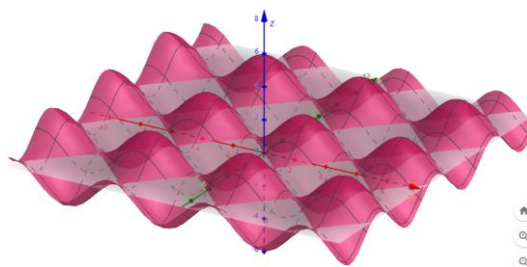


Imagen 51: Modelo básico matemático de referencia: $a(x,y)=\text{sen}(x)+\text{sen}(y)$. Fuente: elaboración propia mediante el software Geogebra3D

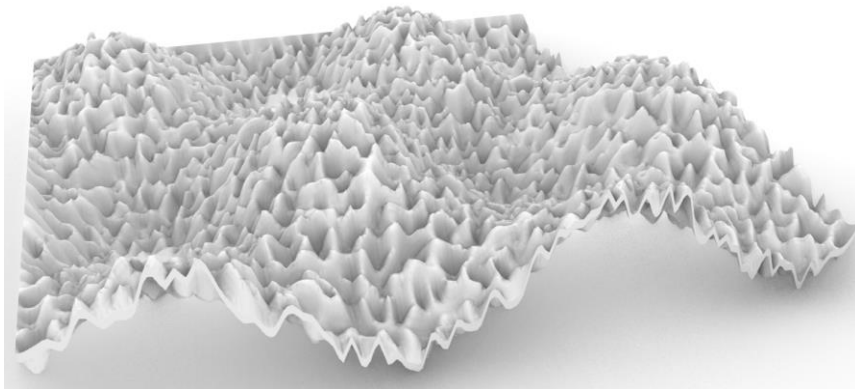
Modelo 00:

Imagen 52: Perspectiva Modelo 00. Fuente: elaboración propia mediante Grasshopper.

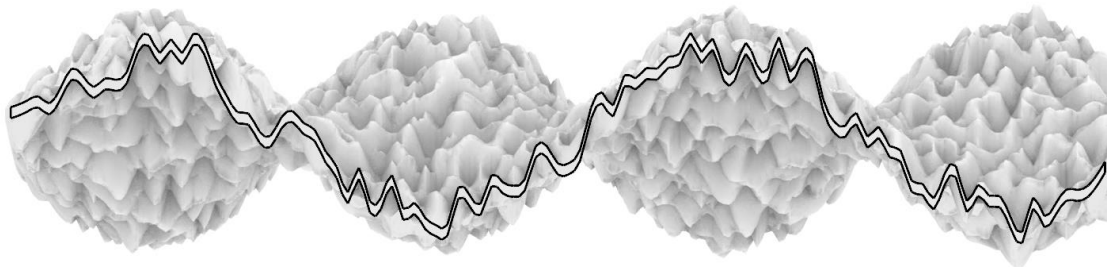


Imagen 53: Sección-alzado X Modelo 00. Fuente: elaboración propia mediante Grasshopper.

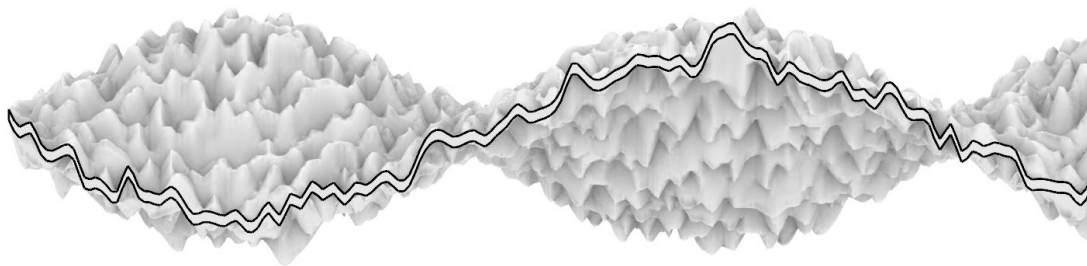


Imagen 54: Sección-alzado Y Modelo 00. Fuente: elaboración propia mediante Grasshopper.

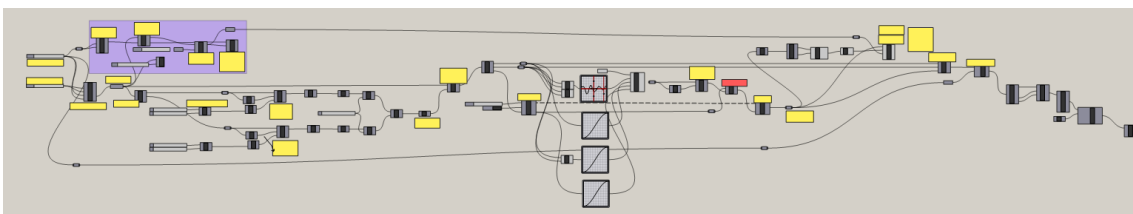


Imagen 55: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación del Modelo 00. Fuente: elaboración propia

Imitación del sustrato natural mediante una foto de base:

Previo al trabajo con los modelos, se realiza una breve recopilación de imágenes de interés que representan a nivel formal la complejidad de las rocas volcánicas de la isla de Tenerife. En ellas, se observa la topografía compleja a pequeña escala característica de las rocas, así como patrones en su composición que incluyen orificios y conexiones internas de cavidades.

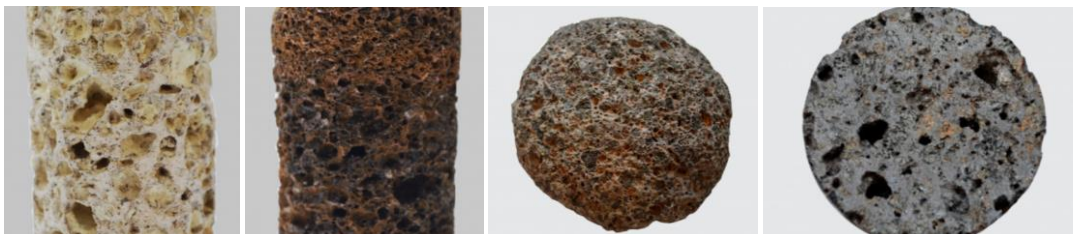


Imagen 56: Ignimbrita soldada con pómez. Roca explosiva. Arico, Tenerife.

Imagen 57: Reticulita fonolítica del Teide. Roca efusiva. La Orotava, Tenerife.

Imagen 58: Basalto ankaramítico. Roca efusiva. Candelaria, Tenerife.

Imagen 59: Ignimbrita no soldada masiva. Roca explosiva, Tenerife.

Fuente de las fotos: Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC.

Mediante este método de proyección, nos centramos en el aspecto superficial de las rocas, demostrando la capacidad de mimesis que se puede realizar de ellas. Trabajamos con la complejidad de su superficie mediante la lectura de los orificios y cavidades a través de Grasshopper, para luego proceder a su reinterpretación y materialización en una pieza cerrada de base plana. Para ello, tras la realización de una serie de prototipos, se presentan 3 modelos en particular que resumen las posibilidades de diseño de la pieza construida.

*Cabe destacar que en los modelos descritos no se especifican dimensiones, dado que, al tratarse de diseño paramétrico, la pieza se encuentra en constante posibilidad de modificación y adaptación a los requerimientos de diseño deseados.

Modelo 01:

Puesto que hablamos de metodología y exploración de la forma, se selecciona la imagen de la roca explosiva Ignimbrita no soldada masiva, ya que es de interés formal por sus marcados orificios y cavidades, presentando una **superficie rugosa ideal** para su tratamiento de mimesis.

Evaluando el modelo 01 mediante los condicionantes de diseño de la Tabla 1, este presenta una topografía compleja, imitando el sustrato natural y ofreciendo una textura rugosa al sustrato artificial (Imagen 60). Así mismo, presenta agujeros, pequeños y grandes, aptos para albergar el refugio de los organismos a distintas escalas (imagen 62). Por otro lado, la conexión de cavidades genera una estructura compleja que, a su vez, crea ciertas ranuras y pozas a pequeña escala, favoreciendo la posibilidad de mantener la humedad (Imagen 63).

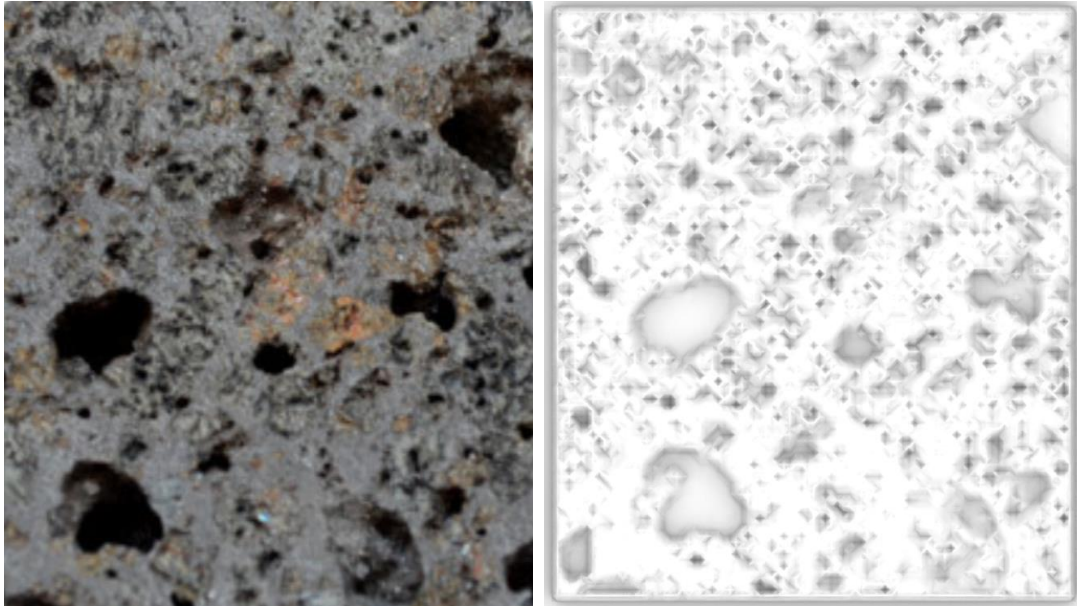


Imagen 60: Modelo 01 en planta. Imitación e interpretación de la roca explosiva Ignimbrita. Fuente de la foto: Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC. Fuente del modelo: elaboración propia.

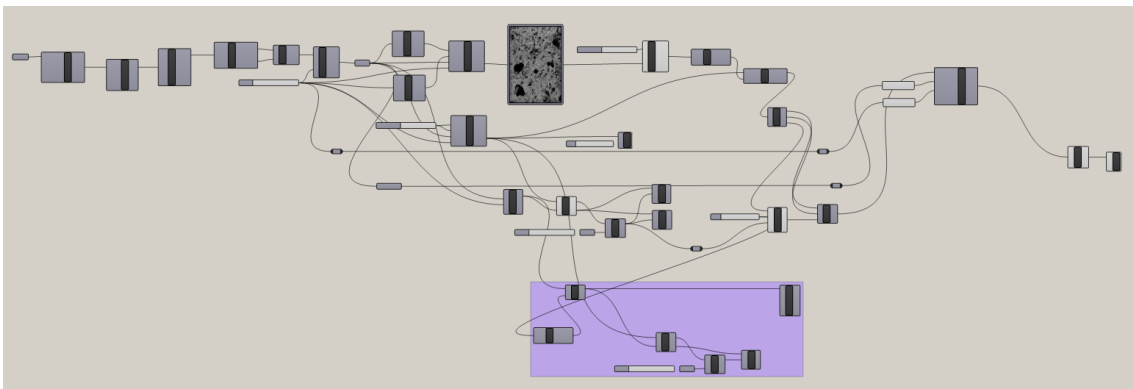


Imagen 61: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación del Modelo 01. Fuente: elaboración propia

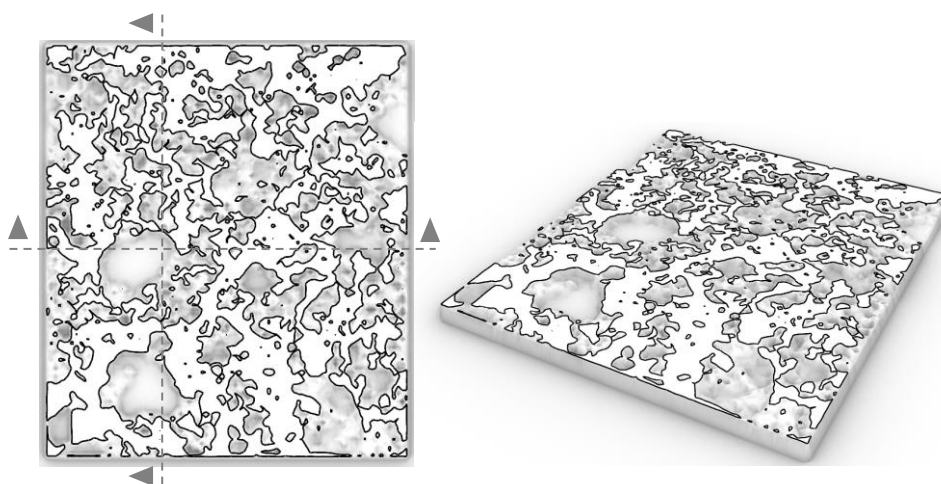


Imagen 62: Planta y perspectiva de la pieza seccionada donde se aprecia la conexión de las cavidades y la topografía compleja. Fuente: elaboración propia



Imagen 63: Sección-alzado Y Modelo 01. Formación de ranuras junto a una topografía compleja de carácter rugoso. Fuente: elaboración propia



Imagen 64: Sección-alzado X Modelo 01. Formación de ranuras junto a una topografía compleja de carácter rugoso. Fuente: elaboración propia

Modelo 02:

Mediante este método se pretende generar una **interpretación más abstracta y minimalista** del sustrato rocoso, obteniendo superficies más rectilíneas, pero con alta complejidad estructural. Este modelo se muestra como alternativa al requerimiento de soluciones no tan detalladas y complejas como la anterior, capaz de ajustarse a las necesidades requeridas en el ecosistema en el que se implante y con mayor facilidad de materialización.

En este modelo predominan los agujeros mayores (Imagen 65), pero existe una topografía con elevaciones de mayor y menor medida, generando crestas y valles más pronunciadas (Imagen 68), capaces de ofrecer una serie de hábitats a diferentes escalas. Además, sigue cumpliendo con la conexión de las cavidades, creando grietas aptas para ser colonizadas (Imagen 67).

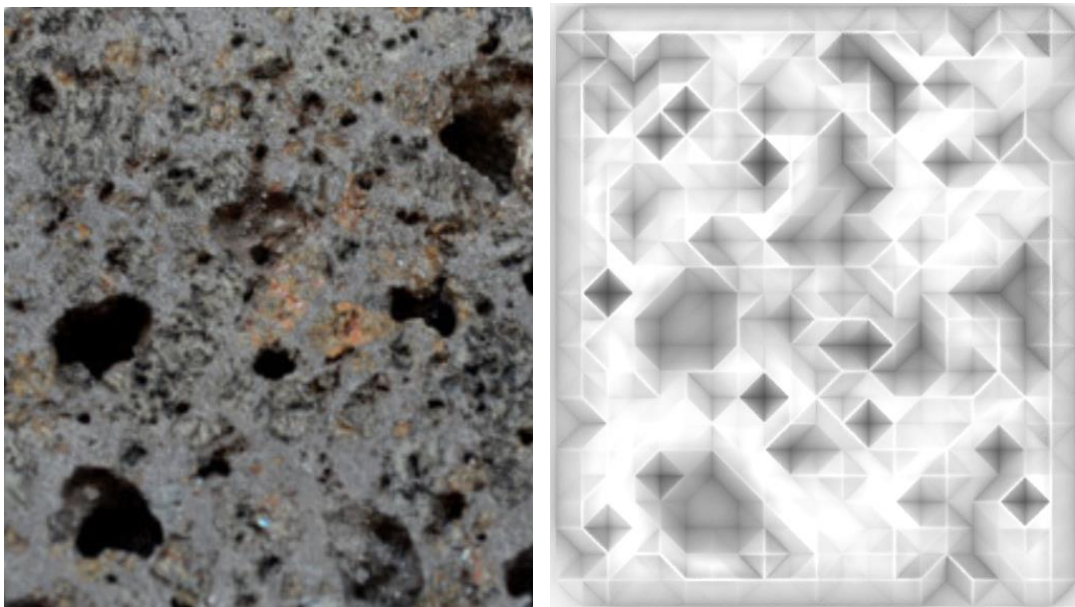


Imagen 65: Mímesis abstracta del sustrato natural mediante Grasshopper. Generación de hoyos y protuberancias. Fuente del modelo: elaboración propia. Fuente de la imagen: Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC

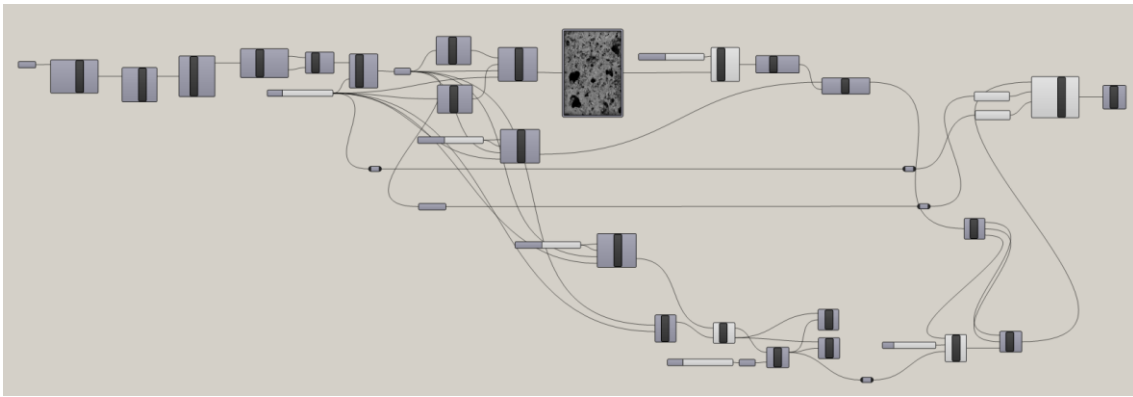


Imagen 66: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación del Modelo 02. Fuente: elaboración propia

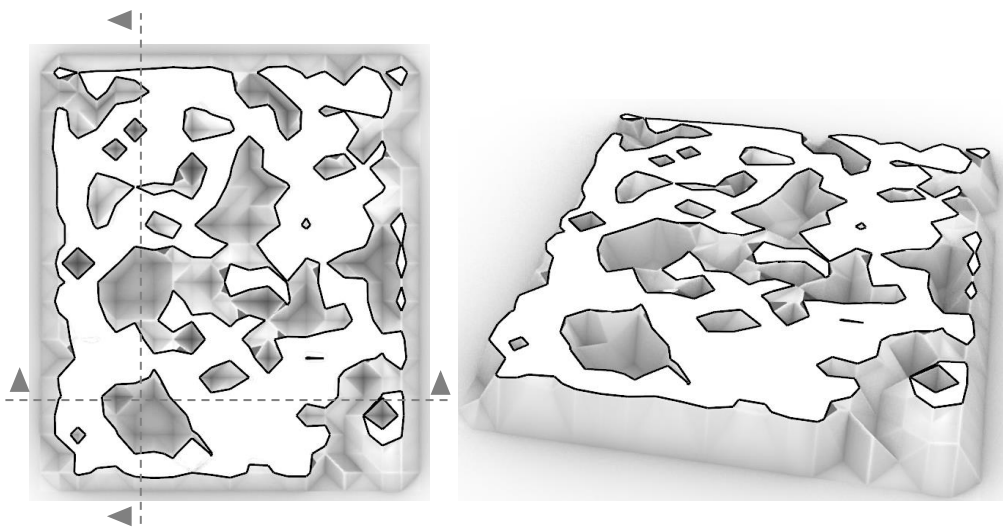


Imagen 67: Planta y perspectiva del Modelo 02 seccionado. Conexión de cavidades y formación de grietas. Fuente: elaboración propia

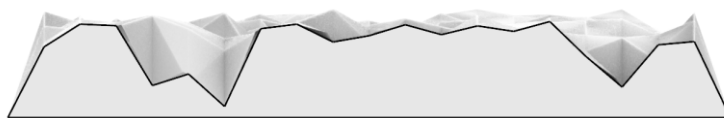


Imagen 68: Alzado X del modelo 02. Elevaciones y crestas conformando una topografía compleja mediante cavidades mayores y menores. Fuente: elaboración propia



Imagen 69: Alzado Y del Modelo 02. Elevaciones y crestas conformando una topografía compleja mediante cavidades mayores y menores. Fuente: elaboración propia

Modelo 03:

Por último, se trabaja desde una escala mayor con el objetivo de reproducir la **mímesis general del conjunto del sustrato natural**. Además, se busca la posibilidad de **moldear** nuestra proyección a placer mediante la suavización de las formas, obteniendo un texturizado de la pieza final más acorde con el medio marino.

Para ello, se toma de base una de las fotos realizadas durante la salida de campo. Esta foto, a diferencia de los dos modelos anteriores, se toma desde un punto de vista más lejano, permitiendo observar no solo la porosidad de la roca, sino también la complejidad estructural superficial del sustrato. De esta manera, se pueden apreciar las ranuras y protuberancias resultantes de su exposición a la intemperie y los procesos de erosión del agua y el viento.

Con todo ello, se obtiene un modelo capaz de interpretar las grietas y protuberancias que caracterizan al sustrato natural (Imagen 70), presentando un texturizado rugoso y una topografía compleja mediante la generación de elevaciones a pequeña escala y la conexión de cavidades (Imagen 73).

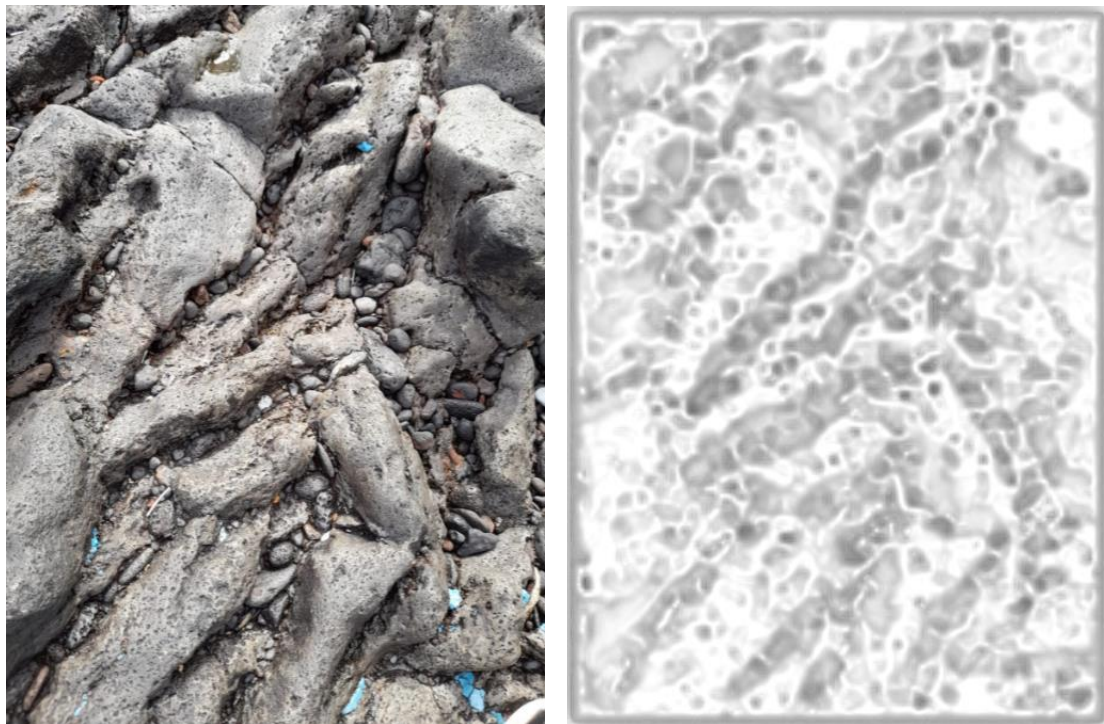


Imagen 70: Planta Modelo 03. Simulación de grietas y complejidad general de sustrato mediante Grasshopper.
Fuente de la foto y el modelo: elaboración propia

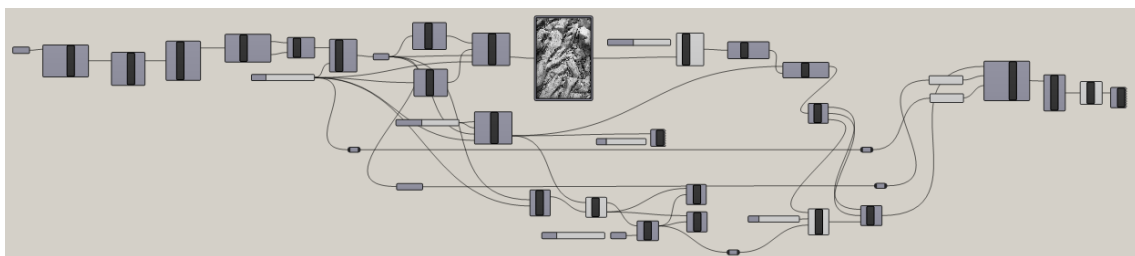


Imagen 71: Archivo de trabajo con Grasshopper para la generación del modelo 03. Fuente: elaboración propia

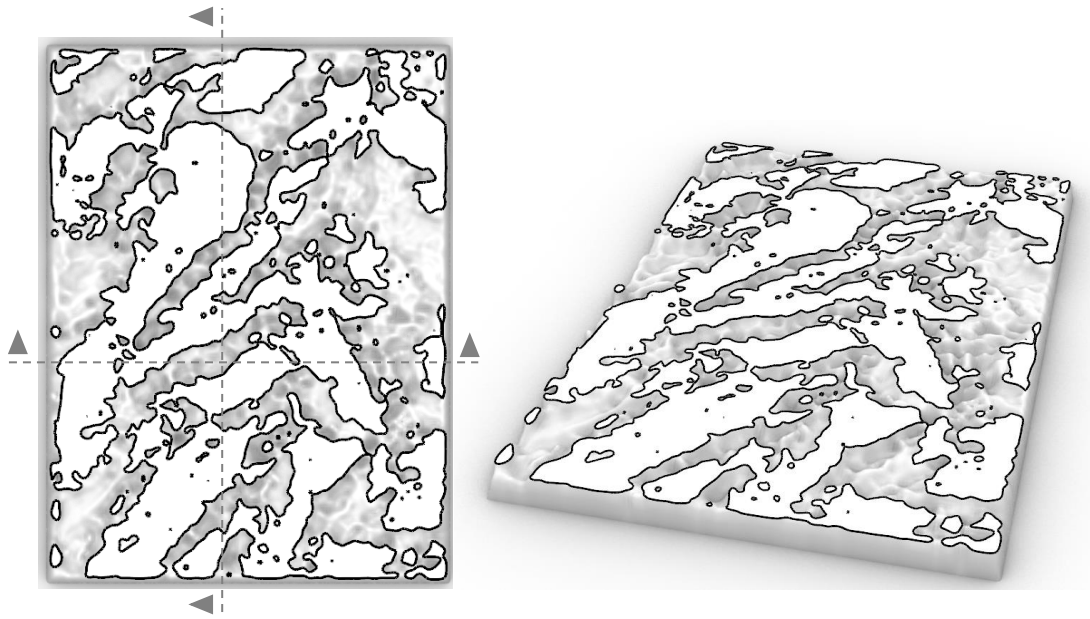


Imagen 72: Planta y perspectiva seccionada del Modelo 03. Fuente: elaboración propia

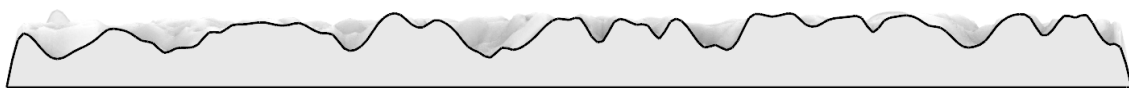


Imagen 73: Alzado Y Modelo 03. Fuente: elaboración propia

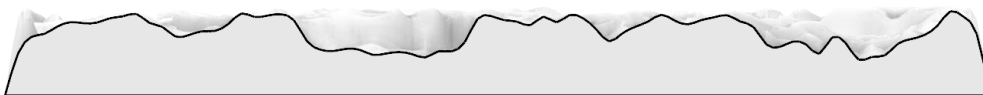


Imagen 74: Alzado X Modelo 03. Fuente: elaboración propia

8.4. Impresión 3D

Posterior a la proyección de distintos diseños se procede a su materialización mediante impresión 3D. Para ello, se eligen dos tipos de impresión: estereolitografía y cemento. Esta selección se realiza por los siguientes motivos:

- Son **tecnologías disponibles** en la isla de Tenerife.
- Permiten la **comparativa** entre la definición de diseño entre ambas técnicas.
- No se cuenta con financiación, por lo que se acota el rango de presupuesto:
 - SLA: impresión relativamente **económica**. Ambas piezas tuvieron un coste total de 44€, con unas dimensiones del Modelo 03: 120mx157mmx11mm y del Modelo 02: 120mmx135mmx17mm.
 - Cemento 3D: existe **interés** por parte de la empresa de impresión en la línea de investigación, por lo que se ofrece su materialización cubriendo ellos los costes.

8.4.1. Estereolitografía (SLA)

La **estereolitografía** es una tecnología de impresión 3D basada en un proceso de fabricación aditiva por medio de **resina líquida** fotosensible. Las tolerancias de este tipo de impresión suelen ser menores de 0,05mm, lo que permite obtener superficies suaves y detalladas, ajustándose a los niveles de detalle de los modelos realizados en esta investigación.

Para la impresión, primero se crea el modelo 3D y se exporta en formato STL. Posteriormente, este archivo se procesa con un software especializado que permite ajustar y preparar el modelo para la impresión. A través del "slicer", se realiza un corte del modelo en capas delgadas con un espesor definido para poder llevar a cabo la impresión de manera precisa. Durante el proceso de impresión, un láser ultravioleta escanea la superficie de la resina líquida, siguiendo el modelo 3D importado, y cura con precisión cada una de las capas generadas.

Con el fin de verificar la viabilidad de materialización de los modelos proyectados en los apartados anteriores, se procede a la impresión de dos de ellos. Mediante esta técnica de impresión, se espera que el detalle resultante sea el mismo al proyectado en los modelos 3D, demostrando así su ejecución mediante este tipo de impresión.

Modelo 02: Mímesis abstracta del sustrato natural.

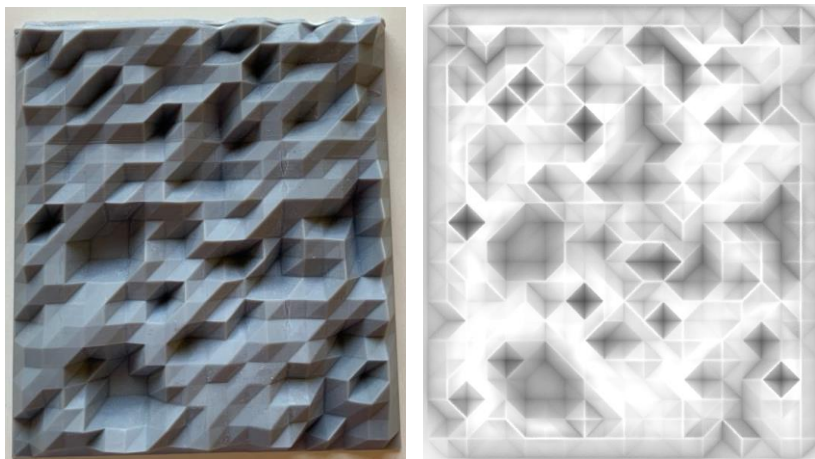


Imagen 75: Modelo 02. Comparativa entre el modelo impreso en SLA y el modelo 3D. Fuente del modelo: elaboración propia. Impresión realiza con una empresa de Tenerife.

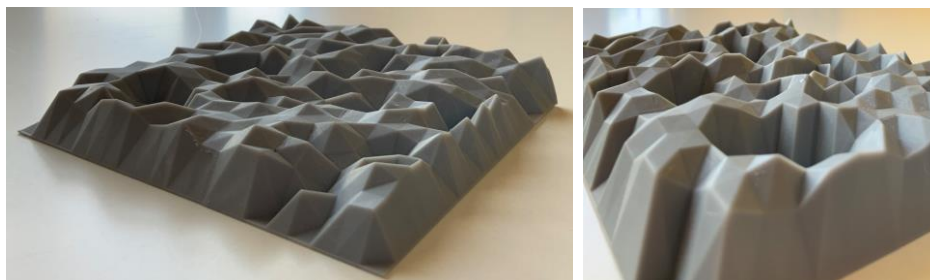


Imagen 76: Modelo 02. Impresión en SLA. Dimensiones de 120mmx135mmx17mm. Fuente del modelo: elaboración propia. Impresión realiza con una empresa de Tenerife.

Modelo 03: Mímesis general del conjunto del sustrato natural.

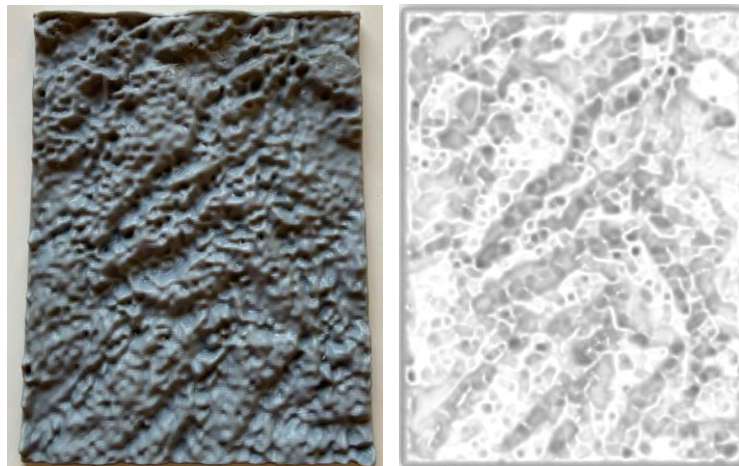


Imagen 77: Modelo 02. Comparativa entre el modelo impreso en SLA y el modelo 3D. Fuente del modelo: elaboración propia. Impresión realiza con una empresa de Tenerife.



Imagen 78: Modelo 03. Impresión en SLA. Dimensiones de 120mmx157mmx11mm. Fuente del modelo: elaboración propia. Impresión realiza con una empresa de Tenerife.

Se obtienen resultados exitosos donde se aprecia un alto nivel de detalle, reflejado en unas piezas reales que se asemejan a la morfología de las rocas. Este acercamiento se basó en una iteración rápida para el testeo de prototipos iniciales. A continuación, se procede a su materialización mediante un **proceso iterativo** de impresión en **cemento 3D**, adecuado para su implantación en el medio marino.

8.4.2. Cemento 3D

El papel de la fabricación aditiva en la industria de la construcción se ha vuelto cada vez más importante. A través de esta tecnología ya se han construido viviendas de hormigón en varios países del mundo, incluidos Alemania, Bélgica, Dubái, Francia y Marruecos.

En el marco de esta investigación, se ha contactado con la **empresa *Impressora.org*** para la impresión de los modelos. Esta empresa, ubicada en Tenerife, se especializa en la impresión de viviendas, mobiliario urbano y artefactos en gran formato utilizando sus propios materiales avanzados de cementos con áridos ecológicos. Es relevante destacar que la empresa está trabajando actualmente en la impresión a gran formato de **módulos de arrecife artificial** para los fondos de las Islas Canarias, lo cual valida la tecnología y los materiales utilizados en el ámbito marino en el que se enmarca esta investigación.

Para la impresión, se realiza el modelo 3D comprobando que la geometría se encuentra como “closed mesh”. Posteriormente, se exporta en formato STL. generando el corte por capas mediante el “slicer” y ajustando los parámetros relevantes para guiar el cabezal de impresión

según las especificaciones requeridas. Con ello, se obtiene el archivo G-code final que controla la impresora 3D durante la ejecución del trabajo.

Se selecciona modelo 01 del apartado de mimesis e interpretación del sustrato rocosa, debido a sus cavidades bien definidas y alta complejidad estructural. No se espera obtener un resultado fiel al modelo 3D proyectado mediante esta impresión, dado que los **materiales son más densos** y la **boquilla de extrusión tiene mayores dimensiones**, lo cual afecta el nivel de detalle final. Los materiales utilizados son:



Imagen 79: Impresora de extrusión de materiales fluidos y mezclador del material. Material y herramientas: compañía impressora.org. Fuente de la imagen: elaboración propia



*Imagen 80: Boquilla de 4mm Imagen 81: Lote de material de cemento y ceniza Imagen 82: Boquilla 6mm
Fuente imágenes: elaboración propia. Material y herramientas: compañía Impressora.org*

Se estuvo presente en el proceso de impresión, recabando la información necesaria y el procedimiento de trabajo realizado por el equipo técnico, interviniendo principalmente:

- Jefe de I+D+I liderando la impresión, los tiempos y el uso de la máquina.
- Arquitecto con el que se trabajó la adaptación del modelo 3D junto con los ajustes y modificaciones del G-code.
- Químico encargado de la preparación de los lotes del material.
- Persona de apoyo encargada de los ajustes necesarios de impresión y preparación de los lotes de material.

En cuanto al material utilizado, se menciona que consiste en cemento Sikacrete 3D, ceniza volcánica y agua. Es relevante destacar que la empresa adapta este material para la impresión en pequeño formato mediante la incorporación de **áridos ecológicos**, como la ceniza volcánica de La Palma. Sin embargo, las composición y proporciones específicas son datos confidenciales de la empresa.

Los cementos preparados para la impresión 3D se basan en la misma estructura básica del cemento Portland, pero incluyen agregados distintos. Además del Clinker y la arena, se añaden químicos aceleradores como ácidos tartáricos para **acelerar el proceso de fraguado**, así como superfluidificantes y plastificantes para mejorar la **trabajabilidad de la mezcla**. Estos componentes permiten la rápida superposición de las capas durante la impresión y reducen el tiempo de fraguado del material en torno a los 13-14 días. El tiempo estimado necesario para la superposición de capas es de aproximadamente 1-2 minutos, permitiendo un secado suficiente que garantice la adherencia del material sin arrastrar el depositado.

Para la impresión de las piezas los componentes del material se mezclaban durante 2.50min y eran vertidos por lotes de 500gr en el recipiente, siempre en movimiento mientras se procedía con la extrusión del material. Este proceso se realiza cada 4-5min entre lotes para ir rellenando constantemente el recipiente y evitar zonas sin material depositado.

El **proceso iterativo** se dividió en tres bloques principales, diferenciados los dos primeros por el diámetro de la boquilla de extrusión del material y el último donde se genera un modelo adaptado a la tecnología existente.

8.4.2.1. Impresión con boquilla de 4mm

Previo al proceso de impresión, se lleva a cabo el procedimiento mencionado anteriormente. Se adapta el modelo 3D en el programa Simplify3D y se calibra la impresora junto con una boquilla de vertido de 4 mm de diámetro. Con el objetivo de obtener los resultados más precisos, partiendo de los condicionantes de dimensión de boquilla y el material denso, se selecciona una zona de interés en el modelo principal, realizando una impresión con mayor detalle y escala. La pieza obtenida es de 27,5 cm x 27,5 cm.

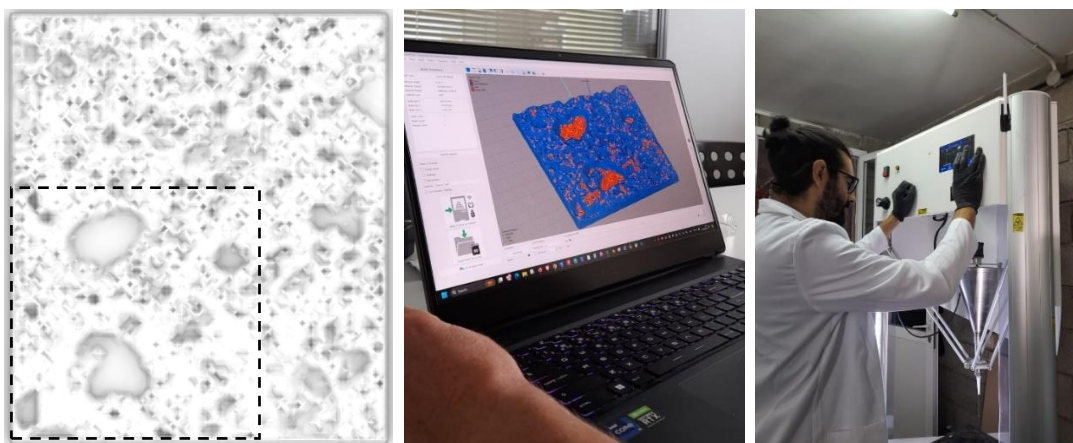


Imagen 83: Preparación previa del Modelo 01 en el software Simplify3D con el arquitecto y preparación previa de impresión con el jefe de I+D+I. Fuente: elaboración propia. Materiales y herramientas: empresa impressora.org

A través de las primeras pruebas, se realizaron los ajustes pertinentes en lo que respecta a la altura de impresión “Zmax”, altura de capa, velocidad de impresión “Feed” y flujo del material “Flow”. Todas ellas, resultaron iteraciones con un resultado “no favorable”, pero fueron

absolutamente determinantes para definir los parámetros necesarios que permitirían una impresión final adecuada. Se presentaron varios problemas derivados de dichos factores:



Imagen 84: Parámetros de impresión "Flow" y "Feed" manipulables desde la impresora. Fuente: elaboración propia. Material: empresa impresora.org

- a. Altura de capa del modelo: La altura de las capas del modelo inicial contaban con un valor demasiado bajo de 0.5mm (prueba 4a). Este parámetro determina la distancia que la boquilla de impresión sube en cada capa. Dado que se utiliza una boquilla de 4 mm y un material relativamente denso, esta configuración resultó en el arrastre del material de la capa inferior, lo que dificultó la definición precisa del modelo.

Este aspecto se corrige mediante la modificación del G-code. Ajustando los espesores de capa a 1mm (prueba 4b), 1.5mm (prueba 4c) y 2mm (prueba 4d).

- b. Zmax: Este parámetro, conocido como altura inicial de capa, determina la altura desde la cual se inicia la deposición del material con respecto a la base de impresión. En conjunto con los problemas mencionados previamente, fue necesario modificar este parámetro para asegurar que la impresión comenzara a la altura adecuada. Cuando este valor estaba configurado demasiado bajo, similar al caso anterior, resultaba en un aplastamiento de la capa impresa debido a que la boquilla estaba muy cercana a la superficie de impresión.
- c. Feed y Flow: Se realizaron ajustes necesarios en la velocidad y flujo de material en función de la complejidad de cada capa del modelo. Ambos parámetros son críticos para lograr resultados más o menos detallados.

En cuanto a la velocidad "Feed", es evidente que una velocidad más baja permite una deposición de material más precisa. No obstante, se debe considerar el tiempo de fraguado del material, ya que una velocidad más baja conlleva a un aumento en el tiempo de impresión y aumenta el riesgo de que el lote preparado se seque antes de ser completamente impreso, dificultando la trabajabilidad y vertido del material.

En lo que respecta al flujo "Flow", este determina la cantidad de material depositado, afectando la densidad y el espesor de las capas. Un mayor flujo de material puede provocar aplastamiento excesivo y derrames en la hilada de cemento, lo cual deteriora la definición del modelo.

La corrección de estos parámetros se realizó de manera continua durante la impresión por capas. Se monitoreó constantemente para ajustarlos según la complejidad de la zona impresa y el estado de fraguado del material en cada momento.

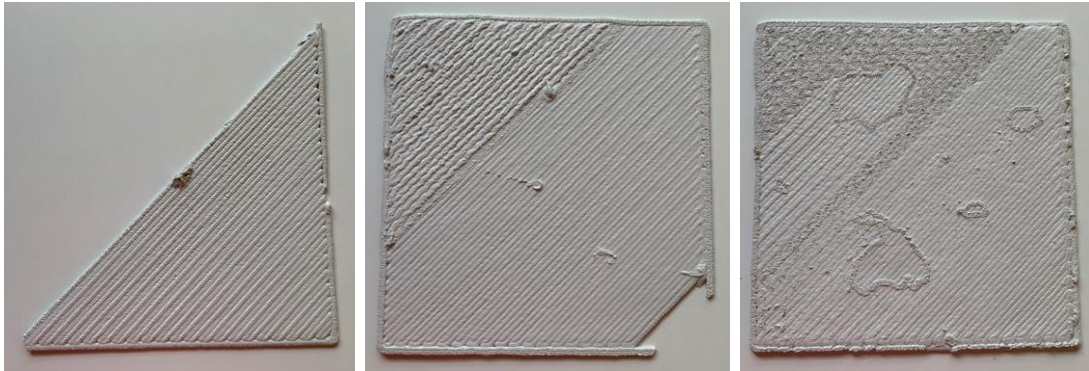


Imagen 85: Pruebas de ajustes de los parámetros de impresión. Prueba 4a-4b-4c. Fuente: elaboración propia. Impresión realiza con la empresa impressora.org



Imagen 86: Proceso de impresión pruebas 4a y 4b. Fuente: elaboración propia. Materiales e impresión: empresa impressora.org

Una vez ajustados los parámetros críticos, se procedió a la impresión final de la pieza. Durante el proceso (Imagen 85), se observó un nivel de **detalle y precisión favorable** en la deposición de la hilada de cemento, así como en la altura y consistencia de las capas. Del mismo modo, la generación de los orificios se realizó conforme a lo esperado, respetando las hiladas del nivel inferior y proporcionando el **texturizado deseado**. No obstante, en la capa final (Imagen 86) se aprecia un resultado más desfavorable, identificándose variaciones en la consistencia y el grosor de las hiladas, que finalmente derivan en la **pérdida de material** en la tercera capa de impresión. Esto se debe a la obstrucción del material.

La boquilla utilizada tiene un diámetro de 4 mm, siendo la más pequeña disponible para este tipo de impresión en cemento. Con la mezcla del cemento, y debido a la pequeña dimensión de la salida del fluido, se produce una acumulación gradual del material que **finalmente obstruye la boquilla**. Para abordar este problema, se ajustaron los parámetros de "Feed" y "Flow" con la intención de desobstruir la boquilla y continuar con la impresión. Estos ajustes resultaron en las variaciones observadas entre las hiladas mencionadas anteriormente, y no resultaron una medida eficiente. Como consecuencia se procede a la detención final de la impresión.

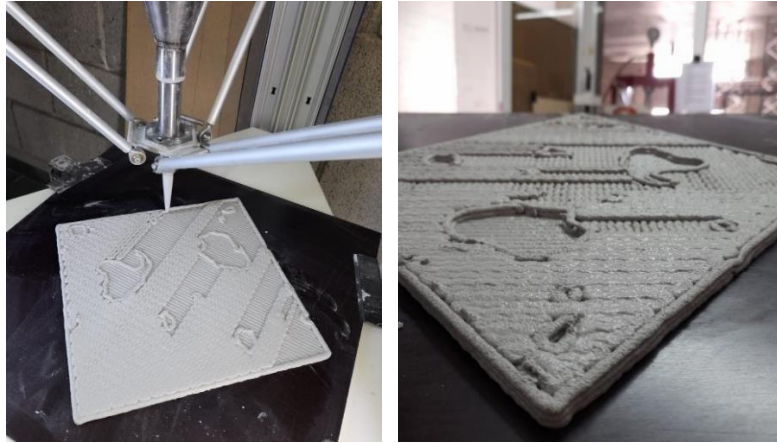


Imagen 85: Proceso de impresión pruebas 4d. Fuente: elaboración propia. Materiales e impresión: empresa impressora.org



Imagen 86: Prueba 4d impresa. Se aprecia el cambio de grosor de las hiladas de la última capa. Fuente: elaboración propia. Impresión realiza con la empresa impressora.org

8.4.2.2. Impresión con boquilla de 6mm

Debido al problema de obstrucción, se decidió realizar una última prueba utilizando una **boquilla de 6 mm** para determinar si era viable la impresión. Para ello, se seleccionó una sección de la pieza impresa en las pruebas anteriores y se aumentó su escala para ajustar el nivel de detalle necesario con respecto al aumento del área de vertido de material de 6mm. La pieza obtenida es de 25,5 cm x 25,5 cm.

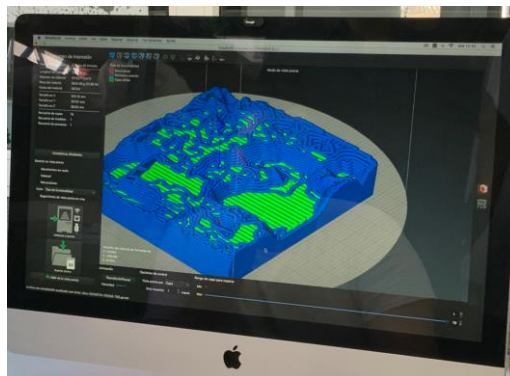


Imagen 87: Aumento de escala del modelo y preparación del G-Code con la persona encargada del manejo del software. Se presenta el modelo por capas, simulando su impresión en las hiladas de cemento. Fuente: elaboración propia

En este proceso se realizaron únicamente dos pruebas, ya que se habían ajustado los parámetros necesarios durante el proceso iterativo anterior. En la primera prueba surgieron problemas debido a la deshidratación del material, que se densificó y obstruyó la boquilla debido a las altas temperaturas en el laboratorio ese día. Para la segunda prueba, se aumentó el porcentaje de agua en la mezcla del material y, finalmente, se obtuvo un **resultado favorable**: Modelo 01-Prueba 6b (imagen 88).

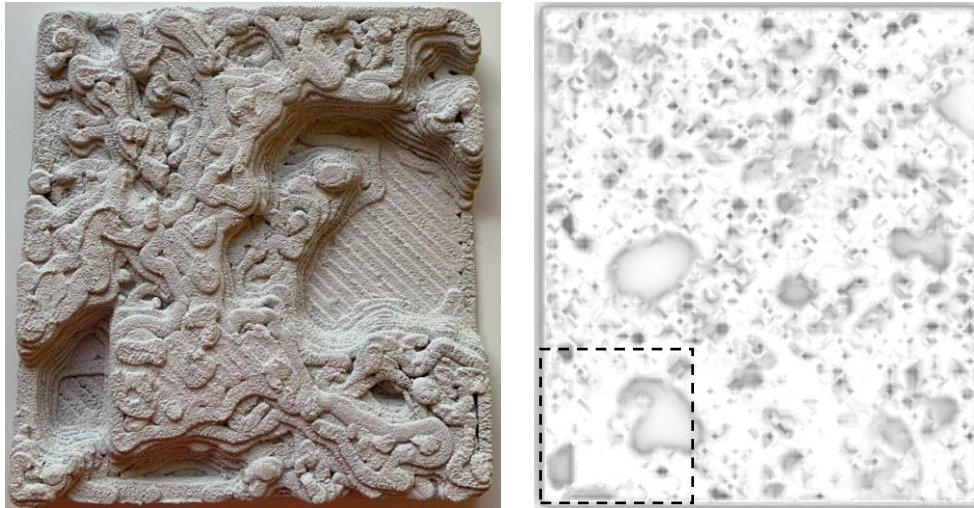


Imagen 88: Modelo 01- Prueba 6b impresa y modelo digital. Fuente: elaboración propia. Impresión realiza con la empresa impressora.org



Imagen 89: Modelo 01- Prueba 6b impresa. Fuente: elaboración propia. Impresión: empresa impressora.org

Se obtienen los resultados esperados resaltando una **clara diferencia** entre el modelo proyectado en 3D y el modelo impreso en cemento. La superposición de las capas es favorable, generando la **textura entre hiladas deseada de 2mm** y sin la presencia del derrumbe del material. Sin embargo, en la última capa se observó una **menor precisión** en el vertido del

material. Esto se debe a que el modelo digital incluye detalles muy pequeños que no son adecuados para una impresión de cemento utilizando una boquilla de extrusión de 6mm.

Este método de impresión es más eficaz cuando se utilizan **hiladas continuas y cerradas**. Por lo tanto, al llegar a la última capa, donde la instrucción era rellenar puntos mínimos, la impresora comenzó a hacer más pausas entre los puntos de vertido del material, lo que, junto a la velocidad de impresión, causó movimientos no deseados y la imprecisión en la deposición del material. Como consecuencia, fue necesario estar presente con una pequeña espátula para corregir **manualmente** estos desplazamientos y asegurar la adherencia adecuada del material.

Con todo esto, comprobamos que esta tecnología es capaz de replicar con precisión las **mayores cavidades proyectadas** en los diseños realizados, lo que determina la necesidad de realizar modelos texturizados con cavidades y salientes bien definidos. Esto facilita el proceso de impresión y se ajusta al diseño que esta impresora es capaz de ejecutar de manera efectiva.

8.4.2.3. Impresión de modelo adaptado

Finalmente, tras el recorrido de impresión de los modelos complejos y tras identificar los condicionantes que generan dificultades a la hora de imprimir con dicha tecnología, se procede al desarrollo de un prototipo rápido que se ajuste a los requerimientos identificados, así como a las premisas de diseño de la tabla 1 del apartado 7.2. *Condiciones de diseño de la pieza construida como hábitat marino artificial*.

Este modelo adaptado, se desarrolla en dos ejes de impresión de forma sencilla, pero generando la complejidad requerida. El desarrollo de la complejidad formal se elabora en el eje X, mediante una línea sinuosa conformadora de entradas y salidas; mientras que, la extrusión en altura del modelo se desarrolla en el eje Y. Además, se tiene en cuenta un aspecto no considerado hasta el momento: la propia textura que aporta la impresión en cemento 3D. Con esto, nos adaptamos a los requerimientos de diseño de una superficie rugosa sin complejizar en exceso el modelo 3D, facilitando su posterior impresión. El recorrido de la línea sinuosa está determinado por la intención de aportar una mayor complejidad estructural mediante la generación de pozas y protuberancias, capaces de mantener el agua en bajamar y ofrecer espacios de cobijo a la diversidad biológica asociada.

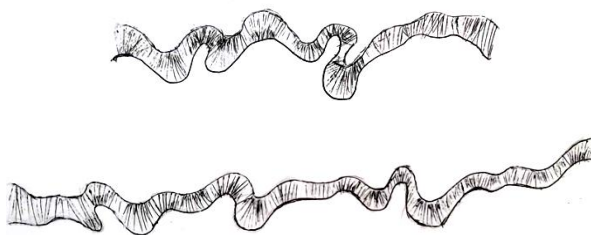


Imagen 90: Bocetaje rápido para exploración de la forma. Búsqueda de grietas, salientes y posibles pozas para la retención del agua mediante un diseño estético. Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en los bocetos, en un principio se pretendía generar niveles de impresión desplazados por capas, creando topografías complejas como en el modelo anterior. Sin embargo, por cuestiones de facilidad de ejecución y gasto de material, y teniendo en cuenta que la empresa decidió ofrecer sus servicios sin coste económico, se adaptó un diseño final lo más sencillo posible que cumpliera con las premisas principales de diseño de texturizado, salientes y pozas.

La definición de este modelo "sencillo" es posible gracias al texturizado propio del proceso de impresión del cemento. Este genera una superficie rugosa que, por sí sola, aporta una topografía compleja conformada por las capas impresas de 2 mm de altura. En la Tabla 1, se recomiendan texturas finas de menos de 1 mm; sin embargo, se comprobó que imprimir con una altura de capa de 1 mm ocasionaba el aplastamiento y desplazamiento de la propia hilada de cemento impresa.

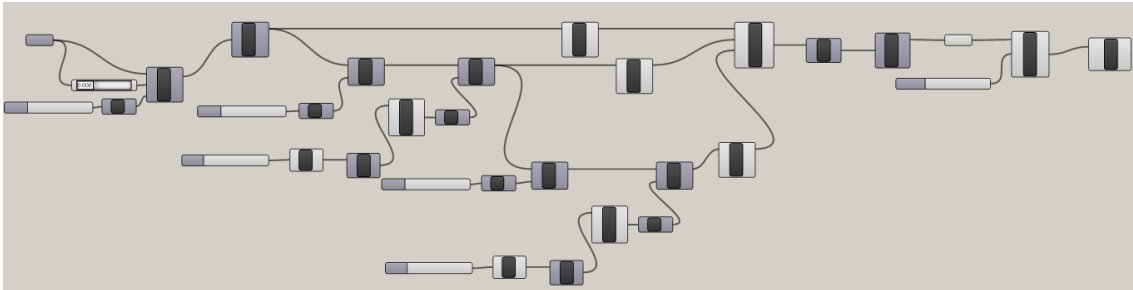


Imagen 91: Archivo de trabajo para la generación de la forma mediante Grasshopper. Fuente: elaboración propia



Imagen 92: Modelo adaptado. La parte izquierda (foto1) queda cerrada para su fijación y la derecha constituye el hábitat. Fuente del modelo: elaboración propia. Impresión del modelo: realizado con la compañía Impressora.org

8.4.3. Comparativa de resultados impresos

Como se esperaba, los resultados más favorables obtenidos en lo que respecta a la definición del modelo proyectado se han conseguido con la impresión de SLA. La impresión en cemento 3D mediante la boquilla de 4mm fue favorable hasta que se obstruyó la boquilla, por lo que no se pudo comprobar un resultado final con el que poder comparar la superficie generada y la proyectada en el modelo 3D.

Las diferencias principales parten del tipo de material utilizado y el tipo de tecnología. La impresión SLA se trata de una tecnología más precisa capaz de proporcionar detalles de hasta 0,05mm mediante su material fluido y láser, mientras que, la tecnología del cemento 3D, con la que se contaba en la isla de Tenerife, se ajustaba a unos detalles condicionados por la boquilla de 4mm y un material más denso.

Cabe destacar que, la obstrucción de la boquilla probablemente habría sido posible evitarla si se aumentaba la fluidez del lote de material, ya sea retirando la cantidad de ceniza o aumentando la cantidad de agua. Sin embargo, la variación de su composición no era una opción ya que se partía de los materiales ajustados y proporcionados por la compañía. Por otro lado, una posible manera de permitir un parón en la impresión, que permitiera la limpieza de la boquilla para evitar su obstrucción, se trataría de separar el modelo a imprimir en distintos G-code. De esta manera, si sabemos que la boquilla se obstruye en la capa 3 de impresión, podríamos dividir la impresión en distintos archivos considerando el tiempo efectivo de vertido de la boquilla, permitiendo un parón para proceder con su limpieza y sustitución.

El cambio de boquilla a 6mm fue favorable obteniendo los resultados esperados. El modelo impreso no es fiel al modelo 3D digital, sin embargo, ha sido capaz de reflejar la complejidad estructural que se deseaba generar, no solo mediante una topografía y una superficie compleja, sino también por la propia rugosidad que presenta el material utilizado. Mediante la mimesis del sustrato rocoso no se esperaba obtener una imitación exacta del mismo, y mediante el proceso iterativo se han obtenido resultados interesantes que suponen una reinterpretación final del modelo proyectado. Se considera que se ha obtenido un resultado exitoso mediante la boquilla de 6mm, lo que lleva a imaginar la mayor definición que sería capaz de aportar si se finaliza la impresión mediante la boquilla de 4mm. Por cuestiones de tiempo y accesibilidad al material de impresión no se puede seguir con el proceso iterativo en el marco de este trabajo.

Se comprueba en el último modelo adaptado como la impresión de cemento 3D es viable si adaptamos nuestras condiciones de diseño según las restricciones y fortalezas de estas tecnologías. Esto refleja que la tecnología utilizada no cuenta actualmente con los avances requeridos para poder ajustarse a los diseños complejos proyectados, pero por otro lado evidencia la necesidad de **proyectar coherentemente** en función del tipo de tecnología con la que contamos.

8.5. Consideraciones finales de la propuesta

Cabe destacar que los modelos desarrollados se han realizado partiendo de los criterios generales de diseño obtenidos en la revisión bibliográfica (Tabla 1). Sin embargo, estos modelos son totalmente manipulables y adaptables a las necesidades requeridas ya que, **previo al diseño y definición de un prototipo**, es necesario estudiar las características del medio concreto. Esto incluye, por ejemplo, el índice de rugosidad que presenta el entorno natural marino, así como las especies a las que irá dirigida la pieza construida, adaptando así las condiciones de diseño al **ecosistema específico**. Todo ello se escapa de nuestras competencias como arquitectos, siendo de vital importancia generar **equipos multidisciplinares** que puedan evaluar las condiciones del entorno para proporcionarnos la información pertinente, que luego **reinterpretaremos** para generar el diseño de nuestras construcciones.

Por otro lado, no se pretende que el trabajo realizado sirva como justificación de la expansión oceánica y la sustitución de biotopos naturales costeros. Se ha planteado bajo unos principios de **reducción de la huella ecológica** existente y futura, tratando de “**restar invasión**” al océano e intentando **devolver**, en la medida de lo posible, el sustrato previamente arrebatado al medio, regenerando por tanto el ecosistema, y **aumentando la calidad** existente de los entornos costeros **antropizados**.

9. Conclusiones

Mediante el recorrido realizado se demuestra la existente relación entre **construcción antrópica y medio marino**. Se documenta la baja calidad ecológica con la que cuentan las infraestructuras costeras de la isla de Tenerife y la problemática de sus superficies lisas en sustitución del biotopo natural complejo de los entornos intermareales e infralitorales. Con ello, se resalta la necesidad de integrar actuaciones ambientalmente sensibles y de reducida huella ecológica en el diseño de las piezas construidas.

La exploración de la forma por medio del **diseño paramétrico** ha sido un recorrido formal, gráfico y material con el que se compilan parte de las competencias desarrolladas durante la formación académica del grado. Esta capacidad y solvencia del manejo **espacial y proyectual** se combina con la indispensable ampliación de la disciplina a través de la **cooperación con otros campos de estudio**, permitiendo, con ello, la reinterpretación de sus datos para su aplicación posterior en el medio intervenido. Por ello, un análisis previo en colaboración multidisciplinar es indispensable para reflejar una **capacidad propositiva** responsable como arquitectos.

Así, se evidencia la **responsabilidad** que tenemos como arquitectos frente a la planificación e intervención en zonas costeras, quedando en nuestras manos informarnos y preocuparnos por el espacio en el que intervenimos, contribuyendo a su conservación e integración en la **propuesta arquitectónica**. Ser conscientes de estos aspectos es clave con el fin de entender cómo debe funcionar el espacio público, los paseos marítimos, el impacto de nuestras construcciones y el tipo de actividades a fomentar, de modo que, se visibilice y genere **una participación y activación ciudadana respetuosa y educativa**, poniendo en valor y mostrando la biodiversidad y ecosistemas que forman parte y caracterizan el entorno ocupado. Además, la integración de la biodiversidad marina en nuestras construcciones no solo aporta las mejoras de las **condiciones ecológicas** del litoral, como la calidad del agua (organismos filtradores), la salud de las comunidades biológicas, el control de la erosión y la absorción natural de CO₂, entre otros; sino que también supone el **aprovechamiento del capital natural** existente para la generación de un **punto de interés atractor**, fomentando la **activación urbana** mediante actividades de calidad como, por ejemplo, el ecoturismo, y **valorizando** económica y socialmente el entorno urbano asociado.

En definitiva, reconocer otras formas de vida como usuarios condicionantes e interactuantes con nuestra construcción, resulta en la **proyección consciente de una arquitectura viva en simbiosis** con el ecosistema que ocupa. Esto conlleva formar parte de manera activa en la regeneración del medio antropizado, procurando minimizar la invasión del espacio y, bajo unos principios de conservación, crear biotopos artificiales resultantes de la interacción y el diálogo con nuestro entorno.

10. Perspectivas futuras de investigación

A raíz de esta investigación se abren otros posibles campos de estudio:

1. De la cuna a la cuna: Utilización del propio sustrato rocoso costero que se ha eliminado como material base en la composición de las piezas construidas. Se **devuelve el material** a su medio natural favoreciendo una construcción bajo los principios de extracción, procesamiento y utilización de este, además de, posiblemente, favorecer la colonización marina por **compatibilidad precedente**. El fin de ciclo de vida de dicho material vuelve a formar parte de su ciclo de vida inicial, expuesto a la erosión y descomposición en el mar pasando a formar parte de los ciclos propios del entorno marino. Esto implicaría:

- **Compatibilidad de materiales:** investigar la compatibilidad entre los materiales extraídos y los convencionales propios de construcción, asegurando el cumplimiento de los requisitos básicos y estructurales para su construcción.
- **Tecnologías de impresión 3D:** Examinar la compatibilidad de las tecnologías de impresión 3D con el uso de material extraído, adaptando tecnologías ambientalmente sensibles en la construcción.
- **Colonización marina:** investigar, en el ámbito de biología marina, si la colonización marina se ve favorecida por compatibilidad precedente del material reutilizado.

2. Aspectos formales:

- **Comportamiento frente a la erosión:** Identificar qué formas y superficies son más idóneas y duraderas frente a los agentes naturales.
- **Formas complejas y tecnologías de impresión:** Profundizar en la exploración de formas complejas que se adapten a las capacidades de las tecnologías de impresión disponibles en Tenerife.

3. Aspectos técnicos:

- **Diseño superficial y estructural:** Investigar si el diseño superficial y la pieza construida deben ser elementos independientes o pueden conformar una única pieza. En caso de ser independientes, estudiar métodos de adherencia y anclaje, así como el mantenimiento y vida útil. Si se trata de una única pieza con una superficie exterior compleja, evaluar las propiedades mecánicas y estructurales del conjunto, así como su materialización.
- **Mantenimiento y vida útil:** Investigación sobre el mantenimiento y vida útil de las estructuras convencionales frente a estructuras colonizadas por organismos marinos. Comprobar si la colonización puede tratarse de una bio-alternativa de protección o, por lo contrario, perjudica la capacidad mecánica o estructural de la pieza construida.

11. Bibliografía

- Aguilera, M. A., Tapia, J., Gallardo, C., Núñez, P., & Varas-Belemmi, K. (2020). Loss of coastal ecosystem spatial connectivity and services by urbanization: Natural-to-urban integration for bay management. *Journal of Environmental Management*, 276, 111297. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111297>
- AIVP, P. la biodiversidad. (2023). Proteger la biodiversidad. *AIVP*. <https://www.aivp.org/es/compromisos/proteger-la-biodiversidad/>
- Armando del Rosario & Francisco del Rosario. (2017). *Guía de la fauna marina de Canarias. Peces, ballenas, delfines y tortugas* (tercera).
- ASALE, R.-, & RAE. (2024a). *Abiótico, abiótica* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/abiótico>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024b). *Biotopo* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/biotopo>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024c). *Construcción* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/construcción>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024d). *Ecosistema* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/ecosistema>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024e). *Input* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/input>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024f). *Output* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/output>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024g). *Simbiosis* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/simbiosis>
- Berghöfer, A. (2011). *TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management* (2011). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity*. <https://teebweb.org/publications/other/teeb-cities/>

- Bugnot, A. B., Mayer-Pinto, M., Airoidi, L., Heery, E. C., Johnston, E. L., Critchley, L. P., Strain, E. M. A., Morris, R. L., Loke, L. H. L., Bishop, M. J., Sheehan, E. V., Coleman, R. A., & Dafforn, K. A. (2020a). Current and projected global extent of marine built structures. *Nature Sustainability*, 4(1), 33-41. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00595-1>
- Bugnot, A. B., Mayer-Pinto, M., Airoidi, L., Heery, E. C., Johnston, E. L., Critchley, L. P., Strain, E. M. A., Morris, R. L., Loke, L. H. L., Bishop, M. J., Sheehan, E. V., Coleman, R. A., & Dafforn, K. A. (2020b). Current and projected global extent of marine built structures. *Nature Sustainability*, 4(1), 33-41. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00595-1>
- Cáceres, P. (2022, julio 15). 'Hormigón ecológico' para mejorar las infraestructuras marinas. EL ÁGORA DIARIO. <https://www.elagoradiario.com/ciencia-e-innovacion/hormigon-ecologico-mar-econcrete/>
- Carlos Sangil Hernández. (2011). *La vegetación sublitoral de sustratos rocosos en las Islas Canarias: Estructura, composición y dinámica de las comunidades de macroalgas* [Tesis doctoral, Universidad de La Laguna]. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/21136>
- Chapman, M. G., & Underwood, A. J. (2011). Evaluation of ecological engineering of "armoured" shorelines to improve their value as habitat. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400(1-2), 302-313. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.02.025>
- Conservación de la biodiversidad marina de Canarias*. (2022). [Declaración institucional]. Parlamento de Canarias.
- Cowan, M. A., Callan, M. N., Watson, M. J., Watson, D. M., Doherty, T. S., Michael, D. R., Dunlop, J. A., Turner, J. M., Moore, H. A., Watchorn, D. J., & Nimmo, D. G. (2021). Artificial refuges for wildlife conservation: What is the state of the science? *Biological Reviews*, 96(6), 2735-2754. <https://doi.org/10.1111/brv.12776>
- De Andrés, M., & Barragán, J. M. (2016). Desarrollo Urbano en el Litoral a Escala Mundial. Método de Estudio para su Cuantificación. *Revista de Estudios Andaluces*, 33(1), 64-83. <https://doi.org/10.12795/rea.2016.i33.04>

- De Lima, R. L. P., Boogaard, F. C., & Sazonov, V. (2022). Assessing the Influence of Floating Constructions on Water Quality and Ecology. En Ł. Piątek, S. H. Lim, C. M. Wang, & R. De Graaf-van Dinther (Eds.), *WCFS2020* (Vol. 158, pp. 397-406). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2256-4_24
- De Lima, R. L. P., De Graaf-van Dinther, R. E., & Boogaard, F. C. (2022). Impacts of floating urbanization on water quality and aquatic ecosystems: A study based on *in situ* data and observations. *Journal of Water and Climate Change*, 13(3), 1185-1203. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.325>
- Dugan, J. E., Airoidi, L., Chapman, M. G., Walker, S. J., & Schlacher, T. (2011). Estuarine and Coastal Structures. En *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (pp. 17-41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00802-0>
- Evans, A., Moore, P., Louise, F., Smith, R., & Sutherland, W. (2021). *Enhancing the Biodiversity of Marine Artificial Structures Global Evidence for the Effects of Interventions*. University of Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.78592>
- Facultad de biología UB. (2024). *Club de Inmersión Biología: 03. Algas pardas, Padina pavonica*. https://www.cibsub.cat/bioespecie_es-padina_pavonica-32235
- Fernando Espino Rodríguez, Arturo Boyra López, Cristina Fernández Gil, & Fernando Tuyas Cortés. (2018). *Guía de Biodiversidad Marina de Canarias* (primera). Oceanográfica. Divulgación, educación y ciencia.
- Galería de imágenes del proyecto (Acondicionamiento del frente litoral de Radazul entre Radazul y Tabaiba (El Rosario, Tenerife))*. (s. f.). Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico. Recuperado 14 de julio de 2024, de <https://www.miteco.gob.es/en/costas/temas/proteccion-costa/actuaciones-proteccion-costa/santa-cruz-tenerife/38-0325-galeria-multimedia.html>
- Gobierno de España. (2022). *Demografía de la población costera en España 2020* (Análisis y Prospectiva 5). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Greenpeace España. (2019). *A toda costa 2019* [Análisis de los ecosistemas naturales costeros vulnerables a la urbanización masiva del litoral]. Greenpeace. <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/informes/a-toda-costa/>
- Henríquez, P. S. (2019). *La riqueza de la biodiversidad de Canarias*.
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A. J., Vandermeer, J., & Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3-35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>
- Juan Carlos Montes Herrera. (2018). *Complejidad estructural de ecosistemas béticos mediante fotogrametría y SIG en la Bahía de La Paz, B.C.S.* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur]. <https://biblio.uabcs.mx/tesis/te4067.pdf>
- Kitazawa, D., Tabeta, S., Fujino, M., & Kato, T. (2010). Assessment of environmental variations caused by a very large floating structure in a semi-closed bay. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165(1-4), 461-474. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0959-9>
- Knight, A. T., Cowling, R. M., & Campbell, B. M. (2006). An Operational Model for Implementing Conservation Action. *Conservation Biology*, 20(2), 408-419. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00305.x>
- Living Ports Projects*. (2023). LIVING PORTS. <https://www.livingports.eu/es>
- Lloret Capote, A., del Barrio Alvarelos, I., & Moreno Aranda, I. M. (2012). *Demarcación Marina Canaria Evaluación Inicial Parte II: Análisis de presiones e impactos* (Estrategias marinas: Evaluación inicial, buen estado ambiental y objetivos ambientales Parte II). Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente.
- Local action for biodiversity guidebook: Biodiversity management for local governments*. (2010). ICLEI - Local Governments for Sustainability. <https://portals.iucn.org/library/node/45803>

- Loke, L. H. L., & Todd, P. A. (2016). Structural complexity and component type increase intertidal biodiversity independently of area. *Ecology*, 97(2), 383-393. <https://doi.org/10.1890/15-0257.1>
- Mace, G. M., Norris, K., & Fitter, A. H. (2012). Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(1), 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006>
- Mallo, M. (2013). *Biomímesis 2.0—María Mallo*. Arquitectura Viva. <https://arquitecturaviva.com/articulos/biomimesis-20>
- Martín Partida, I., Arrieta Algarra, S., Martínez García-Denche, L., Paloma Ramos Fernandez, Paula Valcarce Arenas, & Marta Martínez-Gil Pardo de Vera. (2023). *Análisis de presiones e impactos- Parte II*. MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO.
- Mathey, J., & Rink, D. (2010). Urban Wastelands – A Chance for Biodiversity in Cities? Ecological Aspects, Social Perceptions and Acceptance of Wilderness by Residents. En N. Müller, P. Werner, & J. G. Kelcey (Eds.), *Urban Biodiversity and Design* (1.ª ed., pp. 406-424). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444318654.ch21>
- McKinney, M. L. (2008). Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals. *Urban Ecosystems*, 11(2), 161-176. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0045-4>
- Meza Galicia, L. (2009). *Los arrecifes naturales y artificiales como una alternativa al cambio climático global*. Instituto Politécnico Nacional. Escuela superior de ingeniería y arquitectura.
- Momota, K., & Hosokawa, S. (2021). Potential impacts of marine urbanization on benthic macrofaunal diversity. *Scientific Reports*, 11(1), 4028. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83597-z>
- Montoya, J. (2016). Reconocimiento de la Biodiversidad, urbana para la planeación en contextos de crecimiento informal. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 9(18), 232-275.

- Moran, M. (2023). Océanos. Naciones Unidas. *Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>
- Paşca Palmer, C. (2023). *La biodiversidad y los ecosistemas marinos mantienen la salud del planeta y sostienen el bienestar social* | Naciones Unidas. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-biodiversidad-y-los-ecosistemas-marinos-mantienen-la-salud-del-planeta-y-sostienen-el-bienestar>
- Ramírez, R., Fernando, T., & J. Haroun, R. (2008). *El Intermareal Canario Poblaciones de lapas, burgados y cañadillas*. BIOGES.
- Rey Rocha, J., Velasco Martín, M., & P. Martín, M. (2023). La paradoja de la pérdida de biodiversidad y la aparición de nuevas formas de vida, ligadas a efectos antrópicos. *Astrágalo. Cultura de la Arquitectura y la Ciudad*, 32, 203-222.
<https://doi.org/10.12795/astragalo.2023.i32.11>
- Riera, R., Becerro, M. A., Stuart-Smith, R. D., Delgado, J. D., & Edgar, G. J. (2014). Out of sight, out of mind: Threats to the marine biodiversity of the Canary Islands (NE Atlantic Ocean). *Marine Pollution Bulletin*, 86(1-2), 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.014>
- Rincón Ruiz, A. (with Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt). (2014). *Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Romera Castillo, C. (2022). *Antropoceano*. Espasa.
- Sanabria-Fernandez, J. A. (2014). *Chronica naturae 4 (2014)*.
- Sanabria-Fernandez, J. A., Lazzari, N., Riera, R., & Becerro, M. A. (2018). Building up marine biodiversity loss: Artificial substrates hold lower number and abundance of low occupancy benthic and sessile species. *Marine Environmental Research*, 140, 190-199.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.06.010>

- Savard, J.-P. L., Clergeau, P., & Mennechez, G. (2000). Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, 48(3-4), 131-142.
[https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00037-2)
- Thungerb, G. (2022). *El libro del clima*. Lumen.
- Unit, B. (2016, mayo 13). *Text of the Convention*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int/convention/text/>
- Yanes-Luque, A. (2019). The Rocky Coastlines of the Canary Islands. En J. A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems* (pp. 167-185). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_8
- Yokohari, M., Takeuchi, K., Watanabe, T., & Yokota, S. (2000). Beyond greenbelts and zoning: A new planning concept for the environment of Asian mega-cities. *Landscape and Urban Planning*.
- Zamora, J. L., & Gómez, Y. M. C. (2015). *El edificio como biotopo*.