

Diseño de un sistema de regeneración de bosques de huiro para la restauración del ecosistema costero de Coliumo

Hernán Díaz Gálvez, Gino Ormeño Bustos y
Jimena Alarcón Castro⁽¹⁾

Resumen: Este estudio aborda la restauración de ecosistemas costeros mediante el diseño regenerativo, focalizado en el repoblamiento de bosques de huiro (*Macrocystis pyrifera*) en Coliumo, Chile. Se analiza el potencial de la escoria alta en sílice, residuo de la producción de celulosa, como material regenerativo para el desarrollo de soportes que optimicen la adherencia, crecimiento y supervivencia inicial del alga. La investigación integra diseño industrial, biomímesis, ingeniería de materiales, biología marina y tecnologías digitales de prototipado, sumando la participación de actores relevantes de la comunidad local. Los prototipos desarrollados demuestran mejoras en la colonización biológica frente a sustratos convencionales, evidenciando la viabilidad de sistemas de cultivo innovadores y adaptativos. La propuesta metodológica combina co-creación simbiótica con principios de materiales vivos y activos, promoviendo la regeneración ecológica y la sostenibilidad. Este enfoque ofrece un modelo de economía regenerativa con impacto territorial, que optimiza recursos, fortalece capacidades locales y contribuye a la conservación de biodiversidad marina, estableciendo bases para futuras aplicaciones en restauración ecológica y manejo sostenible de recursos costeros.

Palabras clave: biomateriales - repoblamiento - restauración - regeneración de ecosistemas - transdisciplina.

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 115]

(1) Ver CV en pág. 116

Introducción

El diseño regenerativo se plantea como un cambio de paradigma a la relación entre el entorno construido y el natural. En el modelo actual, esta relación se ha deteriorado debido a la industrialización, urbanización y crecimiento poblacional, lo que ha llevado a la disminución de recursos, la contaminación y el aumento de gases de efecto invernadero,

evidenciando que la sustentabilidad como enfoque no es suficiente (Dumitrescu et al., 2021). En respuesta a esto, el diseño regenerativo es un enfoque que busca establecer una relación simbiótica de beneficio mutuo entre el medioambiente y nuestro entorno inmediato (Lares & Henríquez, 2021).

Es necesario tomar decisiones respecto de las escalas productivas y orientarlas hacia la escala humana y natural, donde el diseño puede ser un aporte fundamental para generar las condiciones propicias para una arquitectura de nuevos materiales que permitan regenerar sistemas naturales erosionados por la acción humana. Con esta nueva arquitectura de materiales se busca desarrollar espacios que permitan a la naturaleza co-crear, a través del repoblamiento, buscando de esta manera la restauración de dichos ecosistemas.

La escoria es un subproducto que se genera durante el proceso de obtención de celulosa a partir de la madera, siendo actualmente un residuo de la industria maderera, que ha mostrado potencial de uso como aditivo para la industria cementicia (Vassilev et al., 2013), y que, dadas sus características y composición, presenta oportunidades para el diseño regenerativo en entornos naturales que necesitan de dichas características (Matichenkov, 2008).

La regeneración de ecosistemas costeros es una necesidad creciente ante los desafíos del cambio climático y la pérdida de biodiversidad. El diseño regenerativo ha emergido como una estrategia que busca restaurar la funcionalidad ecológica e integrar a las comunidades locales en procesos de sostenibilidad a largo plazo. Este artículo se centra en el potencial de la escoria, un subproducto industrial, como material clave para la regeneración de bordes costeros y el cultivo de macroalgas, específicamente el huiro (*Macrocystis pyrifera*).

El repoblamiento de algas marinas, específicamente del huiro en Chile, es un esfuerzo significativo para abordar problemas medioambientales y promover la sustentabilidad económica y ambiental de las comunidades costeras. El huiro es un alga parda que forma extensos bosques submarinos, cruciales para la biodiversidad marina. Sin embargo, la sobreexplotación y el cambio climático han amenazado estos ecosistemas, afectando tanto a la vida marina como a las comunidades que dependen de ellos para su sustento.

Al respecto, el principal desafío es restaurar estos ecosistemas de manera sostenible. Esto implica no solo la repoblación de las algas, sino también la gestión adecuada de los recursos y la educación de las comunidades locales sobre prácticas sostenibles.

A través de diversas iniciativas a lo largo del país, la comunidad científica en torno a la biología marina, ha llevado a cabo estudios y experimentos tanto en laboratorio como en el contexto de crecimiento natural del alga (Avila. et al., 2010; Pla & Alveal, 2012; Westermeier R. et al, 2012; Avila & Rodríguez, 2015; Oyarzo-Miranda et al., 2023), que han demostrado que es posible tanto el cultivo como el trasplante del huiro, permitiendo su repoblamiento, sin embargo dichos estudios han arrojado desafíos que representan barreras para la masificación del trabajo de repoblación del huiro.

La presente iniciativa se enmarca desde la definición de un caso de estudio en la localidad de Coliumo en la Región del Biobío, Chile, abordando el sujeto natural propio del ecosistema, los principios de biomímesis, los resultados de las investigaciones previas y el enfoque de la participación de las comunidades habitantes del entorno como actores claves para el éxito de las iniciativas de repoblamiento y restauración, identificando barreras específicas para el repoblamiento como la dependencia de laboratorios para la fecundación

de las esporas, la presencia de depredadores naturales como el caracol negro (Pinochet et al., 2018), la presencia de corrientes marinas que dificultan la adherencia del huiro, o la falta de evidencia de soportes físicos validados que faciliten el crecimiento, lo cual ha sido cubierto, a través de la exploración de diversos materiales y formas que se han adaptado para este uso de manera experimental. También han surgido descubrimientos que pueden representar interesantes oportunidades para la mejora de los sistemas, como los comportamientos de adherencia del huiro en diferentes sustratos inorgánicos como las cuerdas de nylon, o la posibilidad de trasplantar algas formadas a zonas aledañas de manera exitosa. El diseño regenerativo se presenta como una oportunidad para el repoblamiento y restauración de ecosistemas, al enfrentar la disfuncional relación que el ser humano ha establecido con la naturaleza, a través de un proceso co-creativo con la naturaleza, para la obtención de resultados simbióticos naturaleza-humano (Dumitrescu et al., 2021). De esta manera, el proyecto se centra en la regeneración de ecosistemas costeros, específicamente en el repoblamiento de bosques de huiro (*Macrocystis pyrifera*), mediante el uso de escoria como material regenerativo.

Enfoque Metodológico

La investigación tiene como caso de estudio el residuo escoria generado en el proceso de producción de la empresa fabricante de tableros de *Pinus radiata* MASISA S.A.

Se seleccionó un escenario de pilotaje que prestara condiciones favorables tanto para el enfoque del proyecto como la factibilidad de aplicación. Luego, se realizó un estudio del contexto y del sujeto de estudio (bosque de huiro), identificando los elementos relevantes para el desarrollo biológico. Se abordó el desarrollo formal, a partir de estos elementos y el concepto de co-creación y se fabricaron prototipos para la validación en entorno real.

Material y Métodos

Se realiza un estudio de referencias científicas relativas a los distintos tipos de cultivos de huiro (*Macrocystis pyrifera*) en las costas chilenas. De manera complementaria, mediante observaciones de campo realizadas en la península de Coliumo, ubicada a 42 kilómetros de Concepción, se analiza el sistema actual de cultivo de algas implementado por la comunidad de pescadores de la mencionada localidad que permite identificar las técnicas empleadas, los materiales y las etapas del proceso de cultivo en cuerda (Figura 1).

El proceso de ideación de nuevo sistema de bosques de Huiro se desarrolla mediante propuestas desarrolladas buscan acentuar los patrones de crecimiento de *Macrocystis pyrifera*, optimizando su adaptación al entorno, a través de la combinación de cultivos verticales en bolones y cultivos horizontales en cuerda. Este enfoque favorece el desarrollo natural de la

especie al aprovechar los flotadores de las láminas de los huiros en suspensión, al tiempo que proporciona protección contra depredadores, como el caracol negro, cuya actividad afecta la superficie de los fondos rocosos intermareales, utilizados como sustrato para la fijación del huiro (Figura 2).

Para garantizar el crecimiento y la estabilidad del alga, es fundamental el uso de un material sustrato que facilite la adherencia y fijación de los discos basales. La selección de patrones y texturas responde al análisis morfológico del sujeto natural, rescatando geometrías simples y reconocibles de clara expresión. De este modo, se plasman los conceptos de adaptación, flotabilidad y protección, evocando las características esenciales del ecosistema marino en el que se desarrolla esta especie.



Figura 1. Proceso de cultivo en cuerda. Fuente: Archivo de proyecto.

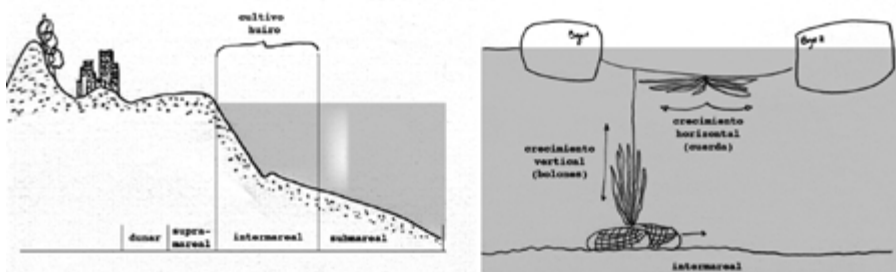


Figura 2. Estudio de campo del sistema de cultivo intermareal en cuerda (crecimiento horizontal) y bolones (crecimiento vertical). Fuente: Archivo de proyecto.

Tecnologías digitales aplicadas al proceso de ideación formal

En el presente proceso de ideación, se identifican y rescatan rasgos formales, mediante el estudio análogo de sujetos naturales, a través de bocetos y croquis. Se realiza la transición a la tridimensionalidad, mediante el uso de software CAD (Diseño Asistido por Computador), complementado con el empleo de escáneres 3D para la captura de texturas y formas complejas. Los datos obtenidos son procesados en el software de modelado Fusion 360, con el objetivo de parametrizar las formas conceptuales y generar extensiones compatibles para la conversión a G-Code. Este código es utilizado en impresoras 3D de modelado por deposición fundida (FDM, *Fused Deposition Modeling*), permitiendo la fabricación de prototipos en distintos niveles de fidelidad (baja, media y alta) (Figura 3).

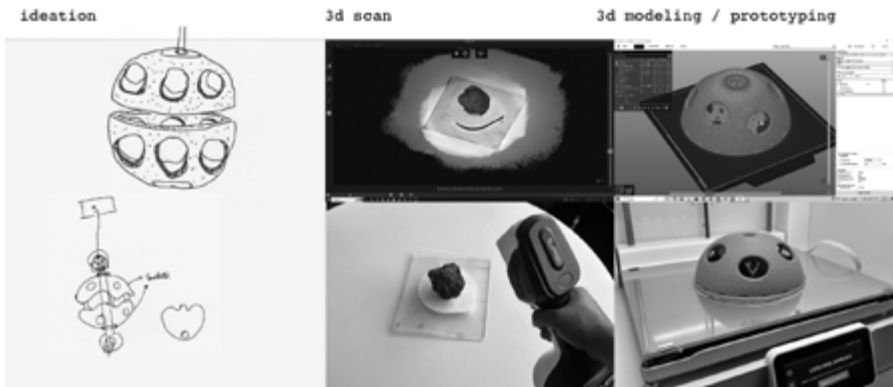


Figura 3. Proceso de uso de tecnologías digitales, rescate de textura, a través de escáner 3D, modelado e impresión 3D FDM. Fuente: Archivo del proyecto.

Tecnologías convencionales aplicadas al proceso de ideación material

Esta etapa comienza con el proceso de molienda de escoria que tiene como objetivo obtener de manera directa las características físicas del material con un enfoque empírico que facilite la comprensión y dominio de los resultados obtenidos del análisis previamente realizado. El resultado de esta prueba, evidencia que el material presenta un nivel de dureza relativamente bajo, pero heterogéneo, presentando cierta facilidad para su molienda, con partes que debido a su dureza muestran mucho mayor resistencia.

De la molienda se obtienen 2 subproductos:

1. Escoria con un alto nivel de molienda, a nivel de partículas finas, equivalentes a polvo.
2. Escoria en volúmenes pequeños, aproximadamente 2 cm³ cada uno, los cuales por sus niveles de dureza no se reducen de manera significativa.

Con el resultado de la molienda se realizaron pruebas formales del núcleo del sistema de cultivo que aportará peso y será el sustrato para los discos de fijación. Las cuatro formulaciones corresponden a dos esferas H30 con aditivo de aceleración y dosificación 1:2:3 con y sin textura, las segundas formulaciones corresponden a dos esferas H21 sin aditivo de aceleración y dosificación 1:2:3 con y sin textura (Figura 4). El objetivo es evaluar el mejor funcionamiento según prestaciones del ambiente marino y su relación con el funcionamiento del sistema de cultivo.

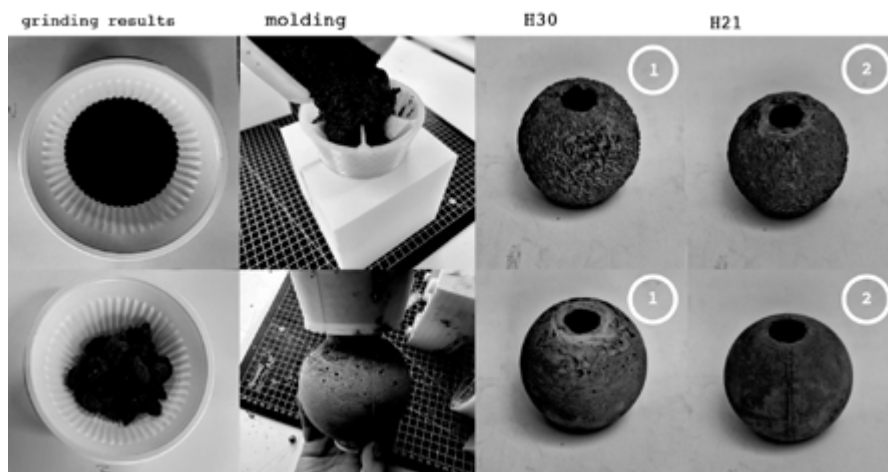


Figura 4. Proceso de producción de núcleo en dosis de hormigón H30 con y sin textura y hormigón H21 con y sin textura. Fuente: Archivo del proyecto.

Fabricación de prototipos del nuevo sistema de bosques flotantes de Huiro

Una vez definido el diseño del sistema, considerando las variables de texturas, peso, fijación de discos y materiales, comienza el desarrollo de diferentes prototipos según las opciones derivadas de las etapas de ideación. El uso de tecnologías digitales CAD / CAM permite controlar variables formales y tener un historial de los archivos del desarrollo. El proceso de producción es la impresión 3D (FDM) en filamento PLA (ácido poliláctico o poliácido láctico), ya que es de origen de caña de azúcar o maíz, por lo tanto, es coherente con el medio marino (Figura 5).



Figura 5. Prototipo de validación y monitoreo de crecimiento del huiro. Fuente: Archivo del proyecto.

Resultados

El resultado del proyecto se enmarca en la línea del diseño regenerativo, describiendo una ruta que comienza con el objetivo de desarrollar nuevos materiales vivos, activos y adaptativos, a partir de un residuo como es la escoria. Luego, la caracterización del material se estudia para encontrar posibles rutas de desarrollo, lo que arroja el potencial de uso del alto porcentaje de sílice presente en la escoria, para aportar en procesos de regeneración de ecosistemas marinos. A partir de esta ruta, se reconoce el contexto para focalizar el sujeto de estudio en el huiro, dado su rol clave en la preservación de los ecosistemas marinos de las costas chilenas. Se generan propuestas que utilizan principios formales y sistémicos, para materializarlas con el uso de tecnologías de prototipado rápido. Estas propuestas desarrollan el concepto de diseño regenerativo para facilitar la colonización biológica, promoviendo la adherencia y crecimiento del huiro en un nuevo formato.

Conclusiones

El presente estudio evidencia el potencial de la escoria como material regenerativo en procesos de restauración de ecosistemas costeros, particularmente en el repoblamiento de macroalgas como *Macrocystis pyrifera*. Desde un enfoque de diseño regenerativo, se demuestra que la integración entre materialidad, forma y contexto ecológico puede generar soluciones innovadoras orientadas a la rehabilitación ambiental. Los resultados obtenidos

permiten inferir que, si bien no es posible determinar de manera concluyente el aporte específico de la sílice en el crecimiento del huiro, la totalidad de los ensayos exitosos sugiere que el sistema propuesto constituye una alternativa viable. La evidencia destaca que la variable más determinante corresponde a la configuración formal y superficial del sustrato, donde la textura cumple un rol clave en los procesos de adherencia y colonización biológica. La incorporación de tecnologías digitales y procesos de co-creación con actores locales refuerza el carácter transdisciplinar del proyecto, promoviendo no solo soluciones técnicas, sino también modelos de desarrollo sustentables con impacto territorial. De este modo, la investigación sienta bases para futuras exploraciones orientadas a optimizar materiales, validar desempeños en el largo plazo y escalar sistemas regenerativos aplicables a diversos contextos costeros. La investigación aporta a la consolidación del diseño regenerativo como herramienta estratégica para enfrentar la degradación de ecosistemas marinos, articulando innovación material, conocimiento científico y participación comunitaria hacia una restauración ecológica efectiva y sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Avila L., M., Merino P., C., Guissen S., K., & Piel W., M. I. (2010). *Manual de Cultivo de Macroalgas Pardas: desde el laboratorio al océano*. Universidad Arturo Prat. https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/manual_cultivo_pardas_UArturo_Prat.pdf
- Avila, Marcela & Rodríguez, Daniel. (2015). *Manual para el repoblamiento de algas: desde la extracción hacia la agronomía marina. Resultados y lecciones aprendidas*. DOI: 10.13140/RG.2.1.1868.4325
- Dumitrescu, L., Bliuc, I., Baran, I., Pescaru, R. A., & Parincu, P. D. (2021). *Regenerative design - General principles and implementation strategies in building design*. Buletinul Institutului Politehnic "Gheorghe Asachi" din Iasi. Sectia Constructii. Arhitectura, 67(4), 1-21. <https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0031>
- Lares, L., & Henríquez, A. (2021). *Diseño Regenerativo y Economía Circular. Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*. Ensayos, (134), 19-34.
- Matichenkov, V. (2008, November). *Deficiencia y funcionalidad del sílice en suelos, Cosechas y Alimentos*. In II Conferencia Internacional sobre EcoBiología del Suelo y el Compost (pp. 26-29).
- Oyarzo-Miranda, C., Otaíza, R., Bellorín, A., Vega, J. A., Tala, F., Lagos, N. A., Oyarzún, F. X., Estévez, R. A., Latorre-Padilla, N., Tapia, A. M. M., Figueroa-Fábrega, L., Jara-Yáñez, R., Bulboa, C., & Contreras-Porcía, L. (2023). *Seaweed restocking along the Chilean coast: History, present, and inspiring recommendations for sustainability*. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1062481>
- Pinochet, R., Soto, J. C., Palacios, M., & Oyarzún, S. (2018, December). *Selección dietaria de Tegula atra (Lesson, 1830) como una aproximación de preferencia sobre distintas especies de macroalgas en el sur de Chile*. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 46, No. 3, pp. 51-60). Universidad de Magallanes.

- Pla, P. C., & Alveal, K. (2012). *Development of *Macrocystis pyrifera* from spores and gametes on artificial substrate. Algal production in a surface culture. Latin American Journal Of Aquatic Research*, 40(2), 292-299. <https://doi.org/10.3856/vol40-issue2-fulltext-5>
- Westermeier, R., Patiño, D., Murúa, P., Muñoz, L., Ruiz, A., & Atero, C. (2012). *Repoblamiento de *M. integrifolia* en la Región de Atacama*. Universidad Austral de Chile.
-

Abstract: This study addresses coastal ecosystem restoration through regenerative design, focused on the repopulation of kelp forests (*Macrocystis pyrifera*) in Coliumo, Chile. It analyzes the potential of high silica slag, a byproduct from cellulose production, as a regenerative material for medium design that optimize adhesion, growth, and initial survival of the algae. The research integrates industrial design, biomimesis, materials engineering, marine biology, and digital prototyping technologies, with participation of relevant actors from the local community. The developed prototypes show improvements in biological colonization compared to conventional substrates, demonstrating the viability of innovative and adaptive cultivation systems. The methodological proposal combines symbiotic co-creation with principles of living and active materials, promoting ecological regeneration and sustainability. This approach offers a regenerative economy model with territorial impact, optimizing resources, strengthening local capacities, and contributing to marine biodiversity conservation, establishing a foundation for future applications in ecological restoration and sustainable coastal resource management.

Keywords: biomaterials - repopulation - restoration - ecosystem regeneration - transdiscipline.

Resumo: Este estudo aborda a restauração de ecossistemas costeiros por meio do design regenerativo, focado no repovoamento de florestas de algas (*Macrocystis pyrifera*) em Coliumo, Chile. Analisa o potencial da escória rica em sílica, um subproduto da produção de celulose, como material regenerativo para geração de suporte que otimizem a aderência, o crescimento e a sobrevivência inicial da alga. A pesquisa integra design industrial, biomimética, engenharia de materiais, biologia marinha e tecnologias digitais de prototipagem, com a participação de atores relevantes da comunidade local. Os protótipos desenvolvidos mostram melhorias na colonização biológica em comparação com substratos convencionais, demonstrando a viabilidade de sistemas de cultivo inovadores e adaptativos. A proposta metodológica combina co-criação simbiótica com princípios de materiais vivos e ativos, promovendo a regeneração ecológica e a sustentabilidade. Essa abordagem oferece um modelo de economia regenerativa com impacto territorial, otimizando recursos, fortalecendo capacidades locais e contribuindo para a conservação da biodiversidade marinha, estabelecendo bases para futuras aplicações em restauração ecológica e manejo sustentável de recursos costeiros.

Palavras-chave: biomateriais - repovoamento - restauração - regeneração de ecossistemas - transdisciplina.

[Las traducciones de los abstracts fueron supervisadas por el autor de cada artículo.]

Hernán Díaz Gálvez. Académico del Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño de la Universidad del Bío-Bío. Es Diseñador por la Pontificia Universidad Católica de Chile y Magíster en Innovación y Emprendimiento Tecnológico por la Universidad de Concepción. Se especializa en innovación, emprendimiento tecnológico y diseño centrado en procesos creativos aplicados a la investigación y desarrollo en diseño.

Gino Ormeño Bustos. Académico del Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño de la Universidad del Bío-Bío. Es Licenciado en Diseño Industrial y Magíster en Construcción en Madera por la misma universidad. Sus especializaciones incluyen diseño industrial con énfasis en tecnologías digitales, prototipado, procesos productivos y construcción en madera, así como investigación aplicada en diseño sustentable y regenerativo.

Jimena Alarcón Castro. Académica del Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño de la Universidad del Bío-Bío. Es Doctora en Gestión del Diseño por la Universidad Politécnica de Valencia, Magíster en Construcción en Madera y Licenciada en Diseño Industrial. Se especializa en gestión del diseño, diseño de materiales, biomimética e ingeniería Kansei, con amplia trayectoria en investigación y docencia en innovación y gestión creativa del diseño.