

Sostenibilitat, Disseny, Ciència i Tecnologia:

La recerca actual del Departament
d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Editors:

**Oscar Farrerons Vidal
Noelia Olmedo Torre
Blanca Roncero Vivero
Arantza Villa Sicilia**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Sostenibilitat, Disseny, Ciència i Tecnologia: la recerca actual
del Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny - UPC

Barcelona, febrer de 2026

Sostenibilitat, Disseny, Ciència i Tecnologia: la recerca actual del Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Coordinador: Oscar Farrerons Vidal

Editors: Oscar Farrerons Vidal, Noelia Olmedo Torre, Blanca Roncero Vivero, Arantza Villa Sicilia



© 1ra edició: OmniaScience (Omnia Publisher SL), 2026

www.omniascience.com



DOI: <https://doi.org/10.3926/ege2026>

ISBN: 978-84-129686-6-8

DL: B 2773-2026

© Disseny de coberta: OmniaScience, 2026.

© Foto de coberta: Quintana, 2026

Índex

Pròleg	9
Disseny d'un dispositiu portàtil per a la recuperació de burilles de tabac, millora de la sostenibilitat ambiental i la prevenció d'incendis	13
Estudio teórico y evidencia geoquímica de las fuentes de Collserola	25
Evolució bianual canal Youtube “Projectes Expressió Gràfica”	40
Il toolkit dignity – Per una mobilità inclusiva nell’era della digitalizzazione.....	52
La inspiración de la biomímesis como una metodología multidisciplinar y de creatividad en la ingeniería del diseño	64
Diseño digital e impresión 3D para una odontología más eficiente y accesible	78
Guies quirúrgiques personalitzades: Estat de l'art i revisió exploràtoria	92
Influencia de parámetros de cultivo en la formación de esferas de celulosa bacteriana	105
Diseño de un sistema de agitación mecánico para un reactor químico tanque agitado.....	115
From Principles to Practice: Use of Fairness and Ambition Considerations in Nationally Determined Contributions	129

Bending Behavior of 3D-Printed Sandwich Panels: A Finite Element Comparison of PLA and ABS	143
Intel·ligència artificial en Disseny i a l'assignatura d'Expressió Gràfica	153
Microplastic Drinking Water Pollution Impacts and Detection Methods: A Literature Review	163
De Residu a Filament: Anàlisi de la degradació del PLA i les barreres del reciclatge distribuït de residus d'impressió 3D	175
Reaprofitament de llana d'ovella com a aïllant tèrmic i acústic en l'edificació	187
La integració de la intel·ligència artificial a l'educació superior: una anàlisi preliminar de les percepcions del professorat	198
Formació de recobriments mitjançant nanocel·lulosa aero-transportada	209
Modelización de deslizamientos inducidos por lluvia en un contexto de cambio climático.....	223
Medir para transformar: el papel de los inventarios municipales de GEI en la acción climática en Cataluña	237
Diseño de un marco metodológico para estimar las emisiones de GEI del sector industrial en el municipio de Rubí	251
Análisis de las zonas de acumulación y orígenes de la basura marina flotante en la costa de Barcelona.....	264
Cap a un assistent de feedback automàtic per a la representació dièdrica: Estudi pilot i flux híbrid.....	277
Recuperació de fibres de cel·lulosa de residus tèxtils post-consum mitjançant líquids iònics i tractaments enzimàtics	285
Un Pont Pedagògic entre Teoria i Pràctica. Aprenentatge corporitzat i habilitats humanes en la formació d'enginyeria mecànica en l'era de la IA.....	299

Emocions i aprenentatge: l'impacte de l'ansietat a l'adolescència	311
Producción científica orientada a políticas de reducción de CO2 basada en redes de cooperación.....	322
Design validation of a handstand device.....	336
Prototipos de (re)articulación creativa. Fotografía y dibujo en los procesos de proyecto del 'EG-Lab'	356

Pròleg

El llibre que teniu a les vostres mans recull les ponències presentades a la VIII Jornada de Recerca del Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny (DEGD) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), jornada que va tenir lloc el 3 de febrer de 2026. Aquesta Jornada de Recerca s'ha convertit ja en un clàssic al nostre departament, com ho confirma el nombre creixent de participacions any rere any. Si a la primera convocatòria de 2019 es van presentar 13 ponències, la xifra ha anat augmentant en anys posteriors: en la Jornada del 2025 en van ser 21, i en l'actual hem tingut 28 ponències. Aquest llibre recull els treballs presentats, escrits en forma de capítol, de manera que ens podem fer una idea bastant encertada del tipus de recerca que es porta a terme al DEGD. A la vegada, si fem una lectura dels diferents llibres que hem anat publicant en aquests vuit anys, podrem llegir fins un total de 146 treballs de recerca, tots molt variats i força interessants. Continuant amb les dades estadístiques, això suposen quasi 2200 pàgines editades, escrites per un centenar i mig de professors i investigadors, principalment en català, castellà i anglès, tot i que es permeten altres llengües habituals de recerca.

A més de les quantitats, també hem de ser conscients de la qualitat dels treballs presentats; tots mostren els àmbits de recerca en que estan treballant els docents i investigadors del DEGD, en col·laboració amb d'altres departaments de la UPC, però també amb altres universitats, centres de recerca i empreses.

La crida per portar a terme la Jornada s'inicia al setembre, i durant quatre mesos es van rebent els originals, als quals se'ls demana molta concreció, amb un nombre màxim de pàgines (que de vegades costa de complir). Els originals reben una primera revisió formal i a partir de finals de desembre s'inicia el procés de maquetació. Són habituals algunes consultes als autors per tal de fer petites correccions o aclariments. Un cop es té una primera maqueta general, les galerades són enviades als autors per tal que en facin una revisió final. Mentrestant continuem amb el procés de disseny, portada, contraportada, sol·licitud ISBN, etc.

En aquest llibre trobareu articles de la recerca que es porta a terme a les diferents seccions del DEGD. Des de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE), rebem treballs de recerca en disseny per la millora de la sostenibilitat ambiental i la prevenció d'incendis, disseny mecànic, i geoquímica de l'aigua i sostenibilitat. El grup de professors de l'EEBE que treballa en Tecnologies Mediambientals i Sostenibilitat també ha enviat treballs relacionats amb els Objectius de Desenvolupament Sostenible de l'Agenda 2030, i conseqüències del canvi climàtic. Un altre tema de recerca d'aquesta secció està relacionat amb la Intel·ligència Artificial en l'aprenentatge de l'Expressió Gràfica. Dels professors i professores de l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa podreu llegir articles sobre Disseny Avançat, multidisciplinari i creativitat, i de la secció d'Enginyeria Paperera, treballs relacionats amb fibres de cel·lulosa i disseny. La secció de l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú ha participat en treballs de recerca

d'estudis de materials, PLA i ABS. La secció departamental de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona contribueix en aquest llibre amb articles sobre ecologia urbana i sostenibilitat.

El Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny (DEGD) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) és una organització vigorosa, en constant estat de millora de la docència i la recerca. Impartim docència principal en més d'una desena de graus universitaris, en tres màsters oficials i en dos doctorats. Al DEGD s'han llegit 75 tesis doctorals, els seus professors han publicat 270 articles en revistes indexades, han participat en més de 120 projectes de R+D+I i han rebut 70 premis i reconeixements. El que teniu a les pàgines d'aquest llibre és sols una petita mostra de la feina feta en recerca en el darrer any, i un avenç de les noves línies de recerca que el departament encara cap al futur.

Gener 2026

Oscar Farrerons Vidal

*Coordinador VIII Jornada de Recerca d'Enginyeria Gràfica
i de Disseny*

Noelia Olmedo Torre

Directora Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Blanca Roncero Vivero

Sotsdirectora Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Arantza Villa Sicilia

Secretària Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Disseny d'un dispositiu portàtil per a la recuperació de burilles de tabac, millora de la sostenibilitat ambiental i la prevenció d'incendis

Adrià Frigola Racero

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Oscar Farrerons Vidal

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

El consum de cigarrets industrials es manté estès arreu del món i comporta la generació de grans quantitats de burilles tòxiques. Normalment, s'acumulen als carrers de les ciutats però es poden trobar a gairebé tot arreu: platges, espais naturals, concerts a l'aire lliure... Els compostos químics que contenen contaminen el sòl i poden ser arrossegats per la pluja afectant greument la vida aquàtica i addicionant contaminants als nostres sistemes de tractament d'aigua. A més a més, esdevenen una font d'ignició si es troben a prop d'elements combustibles com fulles seques, brossa i fusta sent una de les principals causes dels incendis forestals. Per remeiar-ho el projecte proposa un disseny d'un dispositiu portàtil per a la recollida i eliminació segura de burilles de cigarretes. El que es busca és desenvolupar un producte compacte i ergonòmic, capaç de recollir burilles de manera segura, evitant cremades i controlant els olors. L'enginy inclou un compartiment semi-estanc per a dipositar burilles, un encenedor elèctric i una bateria recarregable. El cost de producció de cada unitat s'ha estimat que suposaria uns 20.83 €, amb un preu de venda de 21.83 € per unitat i unes emissions de 10592.57 g CO₂eq. per unitat. Els materials inclouen components com el mòdul TP4056, bateria LiPo, filament Kanthal, i carcassa d'ABS-GF; aquesta última es podria imprimir amb impressora 3D.

Paraules Clau: Tabac, burilles de cigarret, contaminants, metalls pesants, lixiviació, prevenció d'incendis, ABS, impressió 3D i medi ambient.

Abstract

The consumption of industrial cigarettes remains widespread throughout the world and leads to the generation of large quantities of toxic butts. Normally, they accumulate on the streets of cities but can be found almost everywhere: beaches, natural spaces, outdoor concerts... The chemical compounds they contain contaminate the soil and can be washed away by rain, seriously affecting aquatic life and adding pollutants to our water treatment systems. In addition, they become a source of ignition if they are found near combustible elements such as dry leaves, garbage and wood, being one of the main causes of forest fires. To remedy this, the project proposes a design of a portable device for the collection and safe disposal of cigarette butts. The aim is to develop a compact and ergonomic product, capable of collecting butts safely, avoiding burns and controlling odors. The device includes a semi-watertight compartment for storing cigarette butts, an electric lighter and a rechargeable battery. The production cost of each unit has been estimated to be around €20.83, with a retail price of €21.83 per unit and emissions of 10592.57 g CO₂eq. per unit. The materials include components such as the TP4056 module, LiPo battery, Kanthal filament, and ABS-GF housing; the latter could be printed with a 3D printer.

Keywords: Tobacco, cigarette butts, pollutants, heavy metals, leaching, fire prevention, ABS, 3D printing and environment.

1. Objectiu

Dissenyar un prototip portàtil pensat per portar el paquet de tabac industrial i recuperar-ne les burilles. Aquest objectiu es va treballar a fons en el Treball Final de Màster presentat a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona a febrer de 2025. [0]

2. Introducció

2.1. Motivació

El consum de cigarrets genera anualment tones de burilles tòxiques que es llencen majoritàriament al carrer però que també apareixen a platges, espais naturals i esdeveniments a l'aire lliure. Aquestes

burilles contaminen el sòl, poden ser lixiviades per la pluja i actuen com a font d'ignició, especialment en períodes de sequera, augmentant el risc d'incendis. Aproximadament 4.5 bilions a l'any dels 6 bilions de cigarrets que es produeixen acaben al medi ambient el que representa més del 75%. [1]

El problema rau no només en la quantitat i toxicitat d'aquestes sinó també en la dificultat de recol·lecció i persistència en el medi natural ja que els filtres són lleugers, es dispersen fàcilment i poden trigar més de 10 anys en degradar-se.

2.2. Història

El tabac es va consumir per primera vegada en forma de cigars o mastegant tabac a finals del segle XIX i principis del XX. No obstant això, a finals del segle XX, els cigarrets es van convertir en el mètode preferit de fumar tabac a causa del baix cost i l'eficiència en l'absorció de nicotina. Avui en dia el tabac és una de les substàncies addictives més utilitzades al món, creixent en almenys 124 països. El seu cultiu requereix de més de 4,3 milions d'hectàrees de terra el que equival a tota la petjada terrestre de Suïssa. [2]

Al 1950 les preocupacions van començar a augmentar pel que fa a la salut per efectes del tabaquisme. Els investigadors van trobar una connexió estadística entre el tabaquisme i el càncer de pulmó, i un nombre important d'articles es van publicar en revistes mèdiques i acadèmiques abordant els efectes negatius. Arran d'aquestes troballes, la indústria del tabac va respondre amb la fabricació de filtres de cigarrets.

La figura 1 mostra la distribució percentual de consumidors per edats en el període comprés entre el 2000 i el 2025 arreu del món. En el grup d'edat dels 15-24 anys el percentatge de la població projectat que consumeix tabac ja es elevat (entorn al 21% per al 2025) i es dispara entre els 35 a 64 anys on s'assoleixen els màxims que van ser

del 60% l'any 2000 i que es preveu que seran d'entorn al 44% l'any 2025.

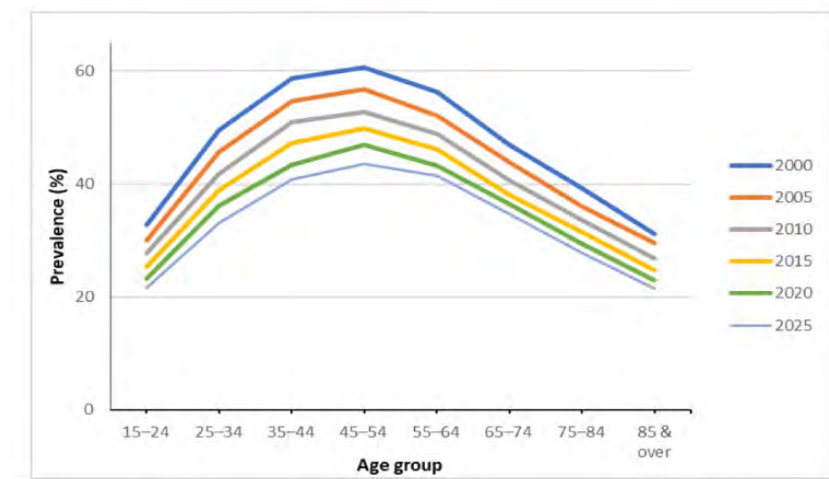


Figura 1. Tendència mundial en la prevalença del consum de tabac (%) en la població de 15 anys o superior, per grup d'edat, entre els anys 2000-2025. [3]

3. Desenvolupament

3.1. Composició i toxicitat de les burilles

Molts estudis epidemiològics relacionats amb el càncer han conclòs que aproximadament el 80-90% de tots els càncers estan relacionats amb el medi ambient i que, per tant, són potencialment evitables. El terme “relacionats amb el medi ambient” s’ha d’interpretar en el seu sentit més ampli, és a dir, tot el que no és genètic. Als Estats Units d’Amèrica, com en la gran majoria de regions del món, fumar és considerat el factor més determinant en desenvolupar càncer, concretament, càncer de pulmó però també incrementa altres tipus de càncer com el de pàncreas, úter, esòfag...[4]

El filtre del tabac està compost principalment per acetat de cel·lulosa (Figura 2) amb un alt grau de grups acetat substituïts al tractar la cel·lulosa amb àcid acètic. Això, dificulta l'accés dels microorganismes en el medi ambient per a una descomposició biològica. L'acetat de cel·lulosa es pot degradar per acció de la llum

UV però el paper que roman en la burilla retarda l'acció de la llum natural. A més a més, la hidròlisi de l'acetat de cel·lulosa és un procés lent en condicions ambientals provocant que els filtres triguin fins a una dècada en degradar-se.

Al fumar el cigarret es genera una combustió incompleta que dona com a producte quitrà un residu condensat format per milers de substàncies tòxiques, principalment hidrocarburs policíclics aromàtics com el 3,4-benzopiré. Aquest químic és el major causant dels riscos per a la salut associats amb el tabaquisme, inclòs el càncer, mentre que la nicotina és la substància química que causa addicció. A més, conté metalls pesants i alguns adherits a nanopartícules capaces de travessar barreres biològiques. Quan es llença una burilla al medi ambient, molts components tòxics es lixivien i s'acumulen en canals d'aigua, carrers, franges naturals i camins suposant una seriosa amenaça per als organismes locals i les espècies aquàtiques. Sobretot pel que fa als nens que tenen més probabilitats d'estar-ne exposats per via oral ja que els agrada explorar l'entorn amb qui tenen contacte sovint.

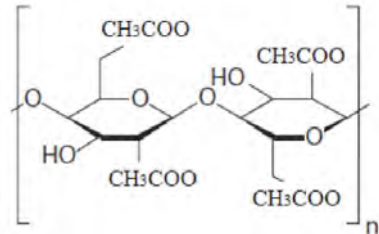


Figura 2. Fórmula estructural del monòmer del diacetat de cel·lulosa. [5]

3.2 Disseny del producte

El dispositiu s’ha basat en les premisses següents:

- **Recollidor de burilles:** ha de permetre dipositar-les de forma segura, evitant cremades amb la tapa i el propi dispositiu i amb un compartiment fàcil de buidar i netejar per minimitzar les olors.
- **Encenedor elèctric:** contindrà conductors elèctrics amb bateria per eliminar la necessitat de gas.
- **Compatibilitat amb la caixa de cigarretes:** ha de ser compacte, permetent retirar i encendre els cigarrets sense treure el paquet del dispositiu.
- **Ergonomia i portabilitat:** mida de butxaca, hermètic i resistent a agents externs per abrasió.
- **Materials:** resistents al calor i als productes químics, preferiblement renovables i amb el menor impacte mediambiental possible.

Propietat / Material	ABS-GF	PC	PLA
Resistència tèrmica	Bona	Molt bona	Baixa
Resistència a l'impacte	Alta	Molt alta	Moderada
Facilitat d'impressió	Moderada	Difícil	Senzilla
Renovable	No	No	Sí
Disponibilitat al mercat	Moderada	Baixa	Molt elevada
Preu	30-70 €/kg	40-80 €/kg	20-40 €/kg

Taula 1. Resum de les propietats dels materials més habituals en impressió 3D.

Els materials típics per impressió 3D que s'han comparat han sigut l'ABS-GF, el PC i el PLA on els factors determinants en la elecció s'han resumit en la taula 1.

S'ha seleccionat l'ABS-GF amb 5% de fibra de vidre perquè és el que millor s'adapta a les necessitats del present projecte combinant resistència mecànica, a la humitat i durabilitat. La carcassa i mecanismes interns estaran segellats per protegir bateria i controlar olors amb opcions futures de millora que incorporin filtres de carbó actiu o materials absorbents.

La proporció de GF en el material sol rondar el 5-30% en funció del fabricant i les necessitats mecàniques del producte. A més, l'ABS es sol millorar amb additius per incrementar les seves propietats. La proporció de fibra que s'ha proposat és del 5% en massa de GF. S'ha escollit aquesta composició perquè segons els estudis realitzats a [6] és la proporció que dona millors prestacions mecàniques segons els paràmetres avaluats que són la duresa Shore D i pèrdua de massa per abrasió.

El resultat final de la peça dissenyada amb SolidWorks es mostra a la Figura 3.

Adicionalment el dispositiu incorpora els elements i característiques següents:

- Bateria: Li-Po 3.7 V, 800–1500 mAh, dimensions 40×20×6 mm, connexió USB-C, mòdul TP4056 per protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits, 300–500 cicles de vida.
- Resistència com a encenedor: fil Kanthal o Níquel-Crom, diàmetre de 0.4–0.6 mm, baixa resistència 0.5–2 Ω , temps d'escalfament 2–3 s, forma espiral compacta que consumiria uns 5–15 W per encesa.



Figura 3. Prototip dissenyat amb SolidWorks i parts principals que el conformen. [Font: pròpia]

- Circuit amb connexions elèctriques i interruptor en la pestanya lliscant.
- Dimensions: 107.50 x 76.40 x 29.80 mm
- Massa total = 103.21 g
- Ergonomia: arestes arrodonides, compartiment pensat per facilitar la neteja amb pinzell o raspallet en descartar les BC i subjectable amb una mà.

3.3. Anàlisi del cicle de vida

L'anàlisi de cicle de vida (ACV) és una eina necessària per avaluar quantitativament efectes de processos i productes en el medi ambient. Per aquesta secció s'ha seleccionat un article [7] per calcular els impactes ambientals de la impressió en 3D en productes fets de PLA, PETG i ABS.

El programa que han emprat és l'Umberto NXT per modelitzar les etapes del cicle de vida i després examinar, analitzar i calcular els impactes.

L'abast del sistema és bressol a bressol (*cradle-to-cradle*) i inclou 4 fases: extracció de matèries primeres, producció, utilització i reciclatge . La base de dades Eco-Invent 3.01 i el mètode d'avaluació ReCipe Midpoint. L'inventari del cicle de vida suposant que el 100% del material es pot reciclar ha sigut: 53.58 g ABS i 3.48 kWh consumits. Els resultats es mostren a la Figura 4.

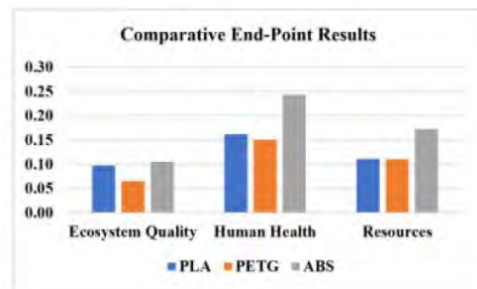


Figura 4. Comparativa dels end-point de l'ACV. [7]

Les conclusions que es poden treure de l'article analitzat en base als gràfics anteriors és que, si es volgués tenir en compte solament el factor ambiental, el PETG seria la opció a escollir per a confeccionar el producte ja que té els menors impactes ambientals. Seguidament

vindria el PLA que es podria comparar amb el PETG a excepció que consumeix més recursos i té una major afectació en la salut humana. En darrer lloc hi hauria l'ABS que al ser un plàstic amb base petroquímica [14] té el major impacte global. Les emissions convertides amb el potencial d'escalfament global (GWP) a CO₂eq. són per als tres materials (PLA, PETG i ABS): 3.6, 3.4 i 5.5 kg CO₂ eq./u respectivament. A partir de l'últim valor s'han estimat les emissions per al prototip (simplificat a 100% ABS) obtenint una xifra de: 10592.55 g CO₂eq./u ≈ 10.6 kg CO₂eq./u.

4. Conclusions

El projecte realitzat a permès aconseguir un primer prototip portàtil capaç d'emmagatzemar les burilles de cigarret fins a la seva deposició en punts de recollida per a una correcta deposició i valorització del material.

El preu de venda tenint en compte únicament el consum de materials, lloguer de la impressora, mà d'obra i transport rondaria els 21.83 € havent repercutit en el preu final unitari el servei d'enginyeria per una estimació de vendes de 100000 unitats. Les emissions de CO₂eq. per aquest producte ascendeixen a 10592.57 g CO₂eq./u determinades a partir de l'ACV *cradel-to-cradel* de l'article citat [7]. L'estudi revela que l'ABS és el material amb el major impacte ambiental entre les altres opcions: PLA i PETG. Tot i així, ha sigut el material seleccionat perquè al ser mesclat amb fibra de vidra les propietats mecàniques del compòsit incrementen significativament.

Els resultats del disseny mostren que l'enginyeria gràfica, juntament amb altres disciplines [8], fa possible un projecte que ofereix una oportunitat de millora en la reducció de la contaminació per burilles mitjançant la creació d'un sistema de recollida efectiu. Encara així el projecte obra noves vies a tota una sèrie de possibles treballs futurs per optimitzar, escalar i implementar el sistema. Per exemple:

- Cercar alternatives amb materials biodegradables que no comprometin la integritat ni la funcionalitat del producte.
- Desenvolupar i implementar polítiques de reciclatge, seguretat i emmagatzematge de burilles mitjançant la col·laboració amb el govern, agències de protecció ambiental (EPA, AEMA) i la indústria del reciclatge.
- Cooperar amb organitzacions ambientalistes, estancs, comerços i ajuntaments per instal·lar cendrers murals i promoure l'ús del dispositiu.

Referències

- [0] Frigola, A. & Farrerons, O. (director) (2025). *Disseny d'un Dispositiu Multifuncional per a Fumadors: Una Solució Innovadora per a la Recuperació de Residus i la Prevenció d'Incendis*
<http://hdl.handle.net/2117/427588>
- [1] Mercedes, J. C. & Sánchez-Moyano, E. (2002). Toward a sustainable circular economy for cigarette butts, the most common waste worldwide on the coast. *Science of the Total Environment*, 847.
- [2] Kurmus, H. & Mohajerani, A. (2020). The toxicity and valorization options of cigarette butts. *Waste Management*, 104, 104–118.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.011>
- [3] WHO (2021). *Global report on trends in prevalence of tobacco use 2000-2025* (4th edition).
- [4] Collier, T., Casey, W., Lee, D. (2024). General overview of toxicology. Reference module in *Biomedical Sciences*.
- [5] Raza, A., Farrukh, S., Hussain, A., Khan, I., Othman, M.H.D., Ahsan, M. (2021). Performance Analysis of Blended Membranes of Cellulose Acetate with Variable Degree of Acetylation for CO₂/CH₄ Separation. *Membranes*, 11, 245. <https://doi.org/10.3390/membranes11040245>
- [6] M. Bodaghi, A. Sadooghi, M. Bakhshi, S. J. Hashemi, K. Rahmani, M. Keshavarz Motamedi (2023). Glass Fiber Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene Composite Gears by FDM 3D Printing. *Adv. Mater. Interfaces*, 10.
<https://doi.org/10.1002/admi.202300337>

- [7] Kumar, R., Sharma, H., Saran, C., Shankar, T. T., Singh, S. K., Herrmann, C. (2022). A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG Materials. *Procedia CIRP*, 107, 15–20.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>
- [8] Farrerons, O; Olmedo, N. (2014). Nuevas oportunidades en el ámbito de la ingeniería gráfica industrial. *Revista del Congrés Internacional de Docència Universitària i Innovació (CIDUI)* 2, pp. 1-14.

Estudio teórico y evidencia geoquímica de las fuentes de Collserola

Clara Puig Vives

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Oscar Farrerons Vidal

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Joan de Pablo Ribas

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament d'Enginyeria Química

Resumen

En el Parque Natural de Collserola se han identificado más de 200 fuentes de agua, cada una con características particulares determinadas por su contexto geográfico y geológico, así como por la influencia de actividades antrópicas en su entorno. Este artículo se centra en el análisis químico del agua de las fuentes situadas en la vertiente oriental de la sierra. Se proporciona una visión precisa del estado actual de las fuentes de la sierra de Collserola, tanto en lo que respecta a su composición mineralógica como a la calidad de sus aguas, incluyendo también su localización geográfica. Para la determinación de los distintos parámetros analíticos se emplean diversas técnicas de laboratorio, entre las cuales se incluyen la conductimetría, la medición del pH y la cromatografía iónica, entre otras. El estudio ha permitido concluir que el agua de las fuentes de la sierra de Collserola presenta un pH neutro, una mineralización baja y una dureza elevada. Asimismo, se ha constatado una notable concentración de sodio, cloruros y calcio. En varios casos, los valores detectados superan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el agua potable, en lo que respecta a los niveles de sulfatos, hierro y nitratos.

Abstract

More than 200 water springs have been identified in the Collserola Natural Park, each with particular characteristics determined by its geographical and geological context, as well as by the influence of human activities in its surroundings. This article focuses on the chemical analysis of the water from the springs located on the eastern slopes of the mountain range. A precise overview of the current state of the Collserola mountain range springs is provided, both in terms of their mineralogical composition and water quality, including their geographical location. Various laboratory techniques are used to determine the different analytical parameters, including conductimetry, pH measurement, and ion chromatography, among others. The study has concluded that the water from the Collserola mountain range springs has a neutral pH, low mineralization, and high hardness. A significant concentration of sodium, chlorides, and calcium has also been observed. In several cases, the detected values exceed the limits established by the World Health Organization (WHO) for drinking water, with regard to the levels of sulfates, iron and nitrates.

1. Introducción

Para poder analizar mineralógicamente el agua de las fuentes de Collserola se planificaron diversas rutas que permitieran recorrer la mayor parte del territorio y localizar grupos de fuentes cercanas entre sí. Tras estudiar el mapa del parque y los municipios que lo conforman, se recogieron 50 cL de agua de cada fuente con caudal suficiente para posteriormente realizar los análisis en laboratorio. Los métodos analíticos empleados incluyen: medición de pH, conductividad, valoración ácido-base, cromatografía iónica e ICP, entre otros.

Se estudia el estado actual de las fuentes y evalúa cómo el cambio climático y la escasez de agua han afectado a su funcionamiento. El objetivo principal es analizar las muestras recogidas para identificar los minerales presentes.

Una vez obtenidos los resultados, se comparan entre sí para establecer relaciones entre parámetros como altitud, conductividad o

dureza; además se contrastan con un estudio previo de 2014 y con estudios realizados en el Montseny.

El alcance del trabajo se centra en las fuentes situadas en los municipios que forman parte del Parque Natural: Barcelona, Cerdanyola del Vallès, Esplugues de Llobregat, Montcada i Reixac, Sant Cugat del Vallès y Sant Just Desvern.

El estudio se enfoca especialmente en la vertiente oriental de la sierra. Se incluye un mapa donde se señalan las fuentes visitadas, clasificadas en tres colores según su estado; color azul para las que presentaban caudal, rojo para las que se encontraban secas y verde las clasificadas en no encontradas/inaccesibles/destruidas.



Figura 1. Plano de las fuentes visitadas.

El nombre de Collserola proviene del catalán antiguo *coll* hace referencia a un puerto de montaña, y *erola* designa un pequeño claro utilizado para el cultivo en medio de la montaña. Su geografía está formada por una sierra de 8.000 hectáreas y una longitud de 17 km, con la cima del Tibidabo, de 512 m, como la más alta. La superficie de la sierra es montañosa, formada por multitud de torrentes y colinas redondeadas.

Geológicamente, la zona está formada principalmente por rocas ígneas y metamórficas como pizarras, filitas y granito junto con zonas calcáreas, lo que influye directamente en la composición mineral del agua de las fuentes.

Collserola tiene clima mediterráneo, caracterizado por inviernos suaves, veranos secos y precipitaciones irregulares. Marzo de 2025, cuando se llevó a cabo el trabajo de campo, fue uno de los meses más lluviosos en los últimos 25 años, afectando al caudal de algunas fuentes. El parque natural disfruta de gran biodiversidad, con una amplia variedad de especies vegetales y animales, así como la interacción histórica entre humanos y entorno, lo que ha dejado un importante patrimonio cultural.

En Collserola existen alrededor de 200 fuentes naturales, muchas de caudal intermitente y depende tanto de las lluvias como de la escorrentía. Históricamente, muchas fuentes abastecían masías o sirvieron como espacios de ocio, merenderos o puntos de encuentro. Algunas se han vuelto emblemáticas por su historia, su arquitectura o las características de sus aguas, como las fuentes ferruginosas o las utilizadas antiguamente para embotellar agua.



Figura 2. Fotografías de algunas de las fuentes del estudio.

El agua adquiere minerales al fluir a través del subsuelo y las rocas del entorno. Si circula por rocas calcáreas, aumenta su contenido en calcio y magnesio, lo que incrementa la dureza; mientras que el granito aporta sodio, potasio o silicatos. El tiempo de contacto del agua con las rocas influye directamente en la concentración de iones disueltos. Se destaca que las diferencias de composición entre zonas pueden deberse tanto a la geología local como al clima y a posibles actividades humanas cercanas.

El agua recogida en estudios previos en fuentes que forman parte del Montseny es más blanda y menos mineralizada debido a su geología granítica, mientras que en Collserola predominan aguas más duras y

con mayores concentraciones de iones como calcio, magnesio o nitratos.

2. Procedimiento

El trabajo de campo consistió en visitar personalmente todas las fuentes seleccionadas del Parque Natural de Collserola. Se recorrieron alrededor de 190 km a pie por zonas de montaña, siempre partiendo de los puntos accesibles mediante transporte público, para poder llegar a cada fuente prevista en las rutas planificadas previamente. Estas rutas se organizaron siguiendo la distribución de los municipios del parque, conectando fuentes cercanas entre sí para optimizar el recorrido.

Durante las visitas se tomó nota de diversos parámetros, como el estado de la fuente, la accesibilidad, y si disponía de caudal. Asimismo, se elaboró un listado exhaustivo de todas las fuentes visitadas, clasificándolas por municipios y por su estado: con agua, secas, destruidas, inaccesibles o no encontradas. En total se visitaron 99 fuentes, de las cuales 41 tenían agua, mientras que los 58 restantes se catalogaron como secas, no encontradas, inaccesibles o destruidas.

Para facilitar la organización y el posterior análisis, se generó un mapa digital accesible mediante un código QR, donde se registran todas las fuentes visitadas y su ubicación exacta en Google Maps.



Figura 3. Código QR de acceso al mapa con el registro de las fuentes visitadas en Google Maps.

3. Resultados

El estudio comprende un total de cuarenta y una fuentes con caudal suficiente para el muestreo, donde cada una de estas muestras

permite comprender mejor la relación entre la geología de Collserola, las precipitaciones recientes y la influencia humana sobre la calidad del agua. Durante los meses del muestreo —febrero, marzo y abril 2025— se registraron intensas precipitaciones, especialmente en marzo, que fue uno de los meses más lluviosos en veinticinco años. Esta abundancia de agua infiltrada tuvo un efecto directo sobre la composición fisicoquímica de las fuentes: por un lado, diluyó muchos los iones presentes de forma habitual en el acuífero; por otro, arrastró materiales, sedimentos e incluso sustancias procedentes de la superficie, con lo que algunos parámetros aumentaron de forma notable. Por tanto, el estudio demuestra que estos resultados han sido totalmente influidos por una transición brusca entre sequía y lluvias intensas.

En la siguiente tabla se muestran los valores promedio, mínimos y máximos de distintos parámetros de calidad de agua. El caudal varía ampliamente (0,02–11,45 L/min) y el pH se mantiene en un rango moderado (6,31–8,27). La conductividad muestra aguas relativamente mineralizadas (211–1662 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con bicarbonato y alcalinidad bajos a moderados. La dureza es alta (186–618 mg/L) y los iones mayoritarios como cloruro, nitrato y sulfato presentan variaciones amplias, especialmente el sulfato. Los metales y otras especies (hierro, azufre, sodio, calcio y magnesio) también muestran fluctuaciones notables, destacando calcio y sulfato como los más elevados. En conjunto, los datos indican un agua con alta mineralización y variabilidad según el parámetro.

El análisis del pH revela que las aguas de Collserola se mantienen en valores esencialmente neutros, situándose entre rangos que suelen oscilar del ligeramente ácido al ligeramente básico. Esta estabilidad coincide con estudios anteriores, lo que apunta a que la geología del parque ejerce un control fuerte sobre el equilibrio ácido-base del agua, independientemente de variaciones climáticas puntuales. Las rocas

mayoritariamente silíceas del parque —pizarras, filitas, gneises y granito— liberan pocos minerales alcalinos, lo que contribuye a que el pH se mantenga estable en el tiempo.

Parámetros	Valor promedio	Núm.	Valor mín.	Núm.	Valor máx.
Caudal	2,50 L/min	2	0,02 L/min	37	11,45 L/min
pH	7,33	30	6,31	2	8,27
Conductividad	954,98 μ S/cm	1	210,00 μ S/cm	14	1662,00 μ S/cm
Bicarbonato	7,67E-04 M	7	2,08E-04 M	23	1,79E-03 M
Alcalinidad	38,36 mg/L	7	10,42 mg/L	23	89,58 mg/L
Dureza	381,73 mg/L	33	186,35 mg/L	19	617,86 mg/L
Cloruro	159,82 ppm	25	17,04 ppm	31	345,04 ppm
Nitrato	82,69 ppm	41	17,25 ppm	14	514,55 ppm
Sulfato	289,91 ppm	41	37,16 ppm	19	724,11 ppm
Hierro	0,95 ppm	38	0,01 ppm	4	4,57 ppm
Azufre	96,64 ppm	41	12,39 ppm	19	241,37 ppm
Sodio	80,38 ppm	25	27,51 ppm	14	207,80 ppm
Calcio	108,93 ppm	40	51,90 ppm	19	185,81 ppm
Magnesio	26,58 ppm	1	9,36 ppm	8	48,00 ppm

Tabla 1. Valores promedio, mínimos y máximos obtenidos de los métodos analíticos.

En cuanto a la mineralización total, el conjunto de las muestras indica una mineralización moderada o baja, coherente con terrenos formados por rocas poco solubles. Sin embargo, dentro de esta baja mineralización general, se observan concentraciones elevadas de ciertos iones, en particular calcio, magnesio, sodio y cloruros. Esta situación se refleja de manera clara en los valores de dureza del agua.

Las aguas de Collserola se clasifican como duras o incluso muy duras, debido especialmente a la presencia de calcio y magnesio disueltos. Estos cationes provienen tanto de la meteorización de la roca madre como de fracturas y zonas calcáreas locales, que incrementan notablemente la dureza final. La dureza no solo caracteriza químicamente las aguas del parque, sino que también constituye uno de los indicadores más sensibles a la litología del terreno.

Entre los resultados más significativos del estudio se encuentran ciertos valores que superan los límites recomendados por organismos como la OMS. Las concentraciones de sulfatos alcanzan en algunas fuentes niveles excepcionalmente altos, superando claramente los valores considerados aceptables para el consumo humano. Lo mismo ocurre con el hierro, cuyo contenido puede ser muy elevado, especialmente en fuentes situadas en zonas con mayor presencia de rocas ricas en sulfuros o donde la oxidación de minerales metálicos es frecuente. No obstante, el caso más preocupante es el de los nitratos, cuyos valores llegan a superar ampliamente los 500 ppm en algunos puntos, rebasando en gran medida el límite de 50 ppm establecido para agua potable. Estos niveles indican una clara influencia de actividades humanas cercanas, ya sea por la presencia de áreas agrícolas, filtraciones de antiguas fosas sépticas o aportes de escorrentía cargada de materia orgánica. Los resultados muestran así una dualidad: por un lado, el agua refleja fielmente la geología del parque; por otro, revela la huella reciente del uso humano del territorio.

La figura 4 es un diagrama de dispersión del total de iones esta ilustra visualmente la heterogeneidad, mostrando cómo las concentraciones de sodio, calcio, magnesio, sulfato, cloruro y nitrato fluctúan entre las 41 fuentes estudiadas. Permite identificar tanto tendencias generales como valores atípicos que reflejan la compleja composición química del acuífero. Hay que destacar que han sido representados todos los iones analizados excepto el hierro debido a su bajo rango de concentraciones en comparación al resto de iones.

Los iones más predominantes son los sulfatos con algunos picos por encima de 400 ppm, cloruros con varios casos superiores a 250 ppm y calcio con concentraciones de entre 50-100 ppm. El sodio se encuentra generalmente en concentraciones constantes, entre 50-120 ppm. Por otro lado, la concentración de nitrato es más variable y también más baja, entre 0-50 ppm.

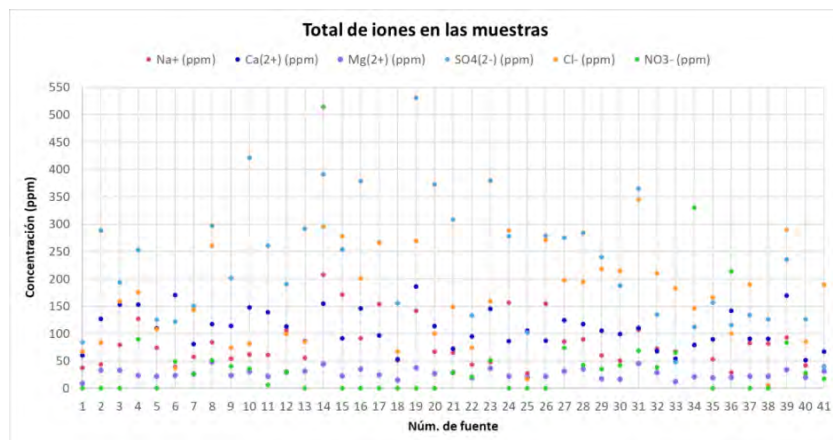


Figura 4. Gráfico recopilatorio de los iones analizados.

Una parte importante de la discusión se dedica a examinar la relación entre los parámetros analíticos. El estudio observa correlaciones muy marcadas entre la dureza del agua y la concentración de calcio y magnesio, lo cual es coherente con la química básica del agua subterránea. Del mismo modo, la conductividad se relaciona estrechamente con el contenido de sodio y cloruros, iones muy móviles que aumentan de manera destacada la capacidad del agua para conducir electricidad. Estas relaciones confirman que la composición iónica de las aguas responde tanto a procesos naturales como a influencias externas detectables a partir de estos patrones.

El trabajo no se limita a describir el estado actual, sino que también compara los resultados con un estudio previo realizado en 2014. Esta comparación permite observar cambios significativos. Por ejemplo, aunque el número de fuentes con agua ha aumentado ligeramente, el caudal medio ha disminuido considerablemente, lo que sugiere una tendencia general de menor aportación hídrica asociada a la sequía prolongada de los últimos años.

El pH, en cambio, ha permanecido estable; y aunque los nitratos siguen apareciendo como uno de los indicadores más elevados, la fuente con mayores concentraciones no es la misma en ambos estudios, lo que indica que los focos de contaminación difusa pueden desplazarse en función de las actividades humanas próximas o de variaciones en la escorrentía superficial.

A la vez, se establece una comparación con estudios realizados en el macizo del Montseny. Las diferencias entre ambos espacios naturales son claras: mientras que Collserola presenta aguas mucho más duras y con mayores concentraciones de iones como calcio, magnesio o nitratos, las aguas del Montseny tienen una mineralización mucho menor y valores de dureza extremadamente bajos.

Esta diferencia se explica principalmente por la composición del sustrato: el Montseny está formado por rocas graníticas muy pobres en carbonatos, mientras que Collserola contiene zonas calcáreas que enriquecen el agua en minerales. El contraste entre ambos sistemas subraya el papel fundamental de la litología en la determinación de la calidad del agua.

4. Conclusiones

El estudio realizado en las fuentes de la sierra de Collserola ofrece una visión precisa y actualizada tanto de su estado físico como de la composición mineralógica de sus aguas. Tras visitar y documentar decenas de fuentes, se estableció su localización, el estado de conservación y la presencia o ausencia de caudal. De aquellas que aún mantenían actividad hídrica, se recogieron muestras que permitieron evaluar su calidad mediante técnicas analíticas contrastadas con la normativa vigente sobre aguas potables.

Los resultados revelan un pH neutro, coherente con las características hidrogeológicas del parque, y una mineralización baja, atribuida a la

naturaleza silíceas y poco soluble del terreno y al escaso tiempo de contacto del agua con el subsuelo. No obstante, esta baja mineralización contrasta con una dureza extremadamente elevada, que se explica por la abundancia de calcio y magnesio procedentes de la calcita presente en el sustrato geológico. Este rasgo favorece la acumulación de incrustaciones, observables en algunos surtidores.

El análisis detectó también concentraciones que superan los límites recomendados por la OMS, especialmente en sulfatos, nitratos y hierro, lo que apunta a posibles focos de contaminación, ya sea por infiltración de fosas sépticas o por actividad agrícola cercana. Estas alteraciones subrayan la importancia de considerar las fuentes naturales como indicadores del estado de las masas de agua subterránea, aunque sin garantía sanitaria.

En 2025 se han registrado un 11% más de fuentes activas en comparación con 2014. Sin embargo, el caudal medio ha disminuido de 6 L/min a 2,5 L/min debido a la reciente sequía. El pH se ha mantenido estable en la diferencia de años, lo que indica una composición mineral constante del agua. Al relacionar los datos con estudios de años anteriores, se observa un incremento en el número de fuentes activas respecto a 2014, pero también una disminución significativa del caudal medio, probablemente influida por la fuerte sequía reciente.

La dureza del agua es significativamente mayor en Collserola debido a su elevado contenido en calcio o magnesio. En contraste, el Montseny, con suelos graníticos, presenta aguas de baja salinidad y dureza.

Finalmente, este estudio destaca la importancia de revisar periódicamente la calidad del agua de las fuentes naturales, no solo para comprender su evolución, sino también para asegurar una correcta gestión de los recursos hídricos y anticipar los posibles efectos derivados del cambio climático. Mantener este seguimiento de forma anual —o incluso semestral— permitiría detectar variaciones

ligadas a los ciclos de lluvia y proteger adecuadamente tanto al ecosistema como a los usuarios que visitan el parque.

Referencias

- ¿Por Qué Medir La Alcalinidad En El Agua Potable? HANNA® Instruments México. Accessed April 7, 2025. <https://h.hannainst.com.mx/blog/por-que-medir-la-alcalinidad-en-el-agua-potable/>
- Bolaños, N., et al. (2008). *Diagnosi socioambiental de les fonts més representatives del parc de Collserola*.
- Boyes, W. (2003). *Instrumentation Reference Book*. 3rd ed.
- Bozorg-Haddad, O. ,et al. (2021). Water Quality, Hygiene, and Health. *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources*, January, 217–57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90567-1.00008-5>
- Cabrera, Ll., et al. (2014). Geologia_barcelona. *Institut d'Estudis Catalans*.
- Cai, C., & Kun, Z. (2022). Metal Additive Manufacturing. *Digital Manufacturing: The Industrialization of "Art to Part" 3D Additive Printing*, January, 247–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95062-6.00005-X>.
- Centre de Recerca en Tecnologia Multiescala de Barcelona. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. Accessed June 2025.
- Chart of PH Indicator Ranges. n.d. Accessed March 1, 2025. https://www.sciencecompany.com/ph_indicator_ranges.aspx
- Drever, J.I. (1982). *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice Hall.
- España, Culligan. (2025). ¿Qué Significa La Presencia de Calcio y Magnesio En El Agua? Accessed April 2025. <https://www.culligan.es/presencia-calcio-y-magnesio-en-el-agua/>.
- Farrerons Vidal, Ó. (2024). El Parque Natural de Collserola. *Revista Meer*. <https://www.meer.com/es/79859-el-parque-natural-de-collserola>
- Farrerons Vidal, Ó., & Anton Recasens, M. (2018). *Collserola en transport públic*. Editorial Farell.
- Farrerons Vidal, Ó.r; Prat, Fortià. 2017. *Anàlisis mineralògica de les fonts del Montseny nord*. *Ausa*, 27(178), 693-719. <http://hdl.handle.net/2117/107158>
- Farrerons Vidal, Ó; Prat, Fortià. 2018. *Anàlisis mineralògiques de les fonts del Montseny oest i l'alt Congost*. *Ausa*, 28(180), 533-555. <http://hdl.handle.net/2117/123051>

- Farrerons Vidal, Ó; Prat, F. (2019). Comparativa hidromineralògica d'aigües de fonts de tres zones geogràfiques del Montseny. *Ausa*, 183, 153-168.
<http://hdl.handle.net/2117/178733>
- Farrerons Vidal, Ó; Font Valentí, G. (2017). *Les fonts del Montseny. Un patrimoni natural i cultural a preservar*. La Sitja del Llop-Revista del Montseny 43 p. 13-16. <http://hdl.handle.net/2117/111153>
- Farrerons Vidal, Ó; Pagespetit, LI (2021). *El Montseny. 51 passejades per descobrir*. Editorial Farell. 2a edició.
- Fonts de Collserola. Fes Fonts Fent Fonting" n.d. Accessed March 2025.
<https://fontscollserola.com>
- Garfella, C. (2025). *Cataluña Da Por Terminada La Peor Sequía Del Siglo y Levanta La Alerta En Barcelona* | Noticias de Cataluña | El País April 5, 2025.
- González Núñez, V.. n.d. *Curvas de Titulación de Ácidos-Bases*.
- Guàrdia, MI. (2011). *La Revolución Del Agua En Barcelona*.
- Iriondo Martínez, M. (2014). *Avaluació de La Gestió i de La Qualitat de l'aigua de Les principals Fonts Naturals Del Parc de Collserola*. Projecte Final de Llicenciatura Facultat Ciències Ambientals. Curs 2013-2014 Universitat Autònoma de Barcelona.
- Kussmaul, H. (2003). Mineral water | Sources and Analysis. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, January, 4017–20.
<https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00797-5>
- PH Theory Guide A Guide to PH Measurement Theory and Practice of PH Applications Industry Environment. 2016.
- Prat, F., & Farrerons Vidal, O. (2023). Proyecto "Fonts del Montseny": Siete años de investigación sobre la calidad mineral de las fuentes de la Reserva de la Biosfera del Montseny. *Tecnoaqua* 63, 1-9. Infoedita Comunicacion Profesional <http://hdl.handle.net/2117/394223>
- Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, BOE-A-2023-628.
- Sancho, J. (2018). *Barcelona Impulsa La Recuperación de Fuentes Emblemáticas de Collserola*. La Vanguardia. Accessed April 2025.
- Segura, X. (2025). Sequía En Cataluña: Evolución de La Lluvia y El Nivel de Los Embalses. https://es.ara.cat/medio-y-crisi-climatica/termometro-sequia-cataluna-lluvia-nivel-embalses_1_4964100.html
- Skoog, D.A. et al. (2015). *Fundamentos de Química Analítica*. Cengage Learning.

Técnica Cromatografía Iónica (IC). Accessed April 2025.

<https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas-geologicas/tecnicas/cromatografia-ionica-ic/36/>

Tormos Rami, M. (2007). *Camins d'aigua. Passejades per 100 fonts de Collserola*. Ediciones Desnivel.

Universidad de Almería. *Agua Ultrapura*. Accessed June 2, 2025.

<https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/tecnicos/auxiliares/agua-ultrapura>

Zhuiykov, S. (2012). Solid-State Sensors Monitoring Parameters of Water Quality for the next Generation of Wireless Sensor Networks. *Sensors and Actuators, B: Chemical*.

Evolució bianual canal Youtube “Projectes Expressió Gràfica”

Oscar Farrerons Vidal

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

L'any 2024 varem presentar, en aquesta Jornada de Recerca, una comunicació que explicava el Canal Youtube “Projectes Expressió Gràfica (Solidworks)”. La present comunicació analitza els canvis que han tingut lloc en les estadístiques del canal en aquests dos anys, per comprovar si realment és usat pels alumnes con una eina d'aprenentatge, independentment del seu ús obert a tota la societat. L'article mostra les característiques del canal de Youtube amb més de 220 vídeos de projectes d'Enginyeria Gràfica des de 2010 fins a l'actualitat. Els vídeos són treballs acadèmics fets pels alumnes de les assignatures d'Expressió Gràfica a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (UPC). Es destaquen els vídeos amb més visualitzacions, els països i ciutats d'on es produeixen principalment, i característiques com sexe, edat i estat de subscripció dels espectadors de la llista Youtube. De tot plegat se'n treu com a conclusió que la llista és una eina adequada per afavorir el treball d'autoaprenentatge per a les assignatures d'enginyeria gràfica.

Abstract

In 2024, at this same Research Conference, we presented a paper explaining the YouTube Channel “Projectes Expressió Gràfica (Solidworks)”. This paper analyses the changes that have taken place in the channel's statistics in these two years, to verify whether it is really used by students as a learning tool, regardless of its use being open to the whole of society. The article shows the characteristics of the YouTube channel with more than 220 videos of Graphic Engineering projects from 2010 to the present. The videos are academic work done by students of the Graphic Expression subjects at the Barcelona East School of Engineering (UPC). The videos with the most views, the countries and cities where they are mainly produced, and characteristics such as gender, age and subscription status of the viewers of the YouTube list are highlighted.

From all of this, the conclusion is that the list is an appropriate tool to promote self-learning work for graphic engineering subjects.

1. Assignatures d'Expressió Gràfica al pla d'estudis 2009

Tal i com explicàvem al 2024, el departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny (EGD) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) imparteix diferents assignatures a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE). Les dues que ens interessen per aquesta comunicació són: Expressió Gràfica (EG) i Ampliació Expressió Gràfica i Disseny Mecànic (AEGDM). La primera (1er quadrimestre) és una assignatura troncal per als set graus que s'imparteixen a l'EEBE, mentre que la segona és obligatòria (5è quadrimestre) pel grau d'enginyeria mecànica. Per saber-ne més de les característiques de les assignatures es pot llegir

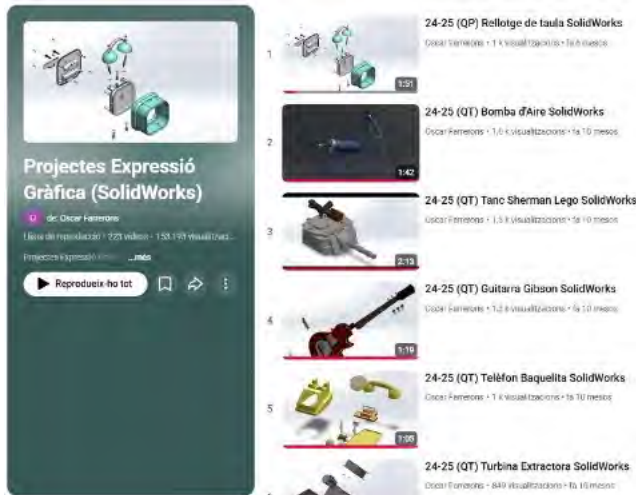


Figura 1. Llista de reproducció "Projectes Expressió Gràfica (SolidWorks)"
(Captura pantalla Youtube)

el punt 1 de l'article presentat a la VI Jornada de Recerca Enginyeria Gràfica i de Disseny (Farrerons, 2024).

Els vídeos dels millors projectes, dels alumnes que han cursat alguna de les assignatures d'Expressió Gràfica amb l'autor d'aquest article, han estat recollits des de 2010 en el canal de Youtube, propietat d'Oscar Farrerons, “Projectes Expressió Gràfica” (Figura 1).

2. YouTube “Projectes Expressió Gràfica (SolidWorks)”

En el moment de redactar aquest article (desembre 2025), a la llista de reproducció hi ha allotjats 223 vídeos. Aquesta xifra anirà augmentant en els propers cursos perquè cada quadrimestre, en acabar les classes i recollir els projectes, el propietari del canal selecciona els millors vídeos dels treballs acadèmics per afegir-los. Encara que la llista de vídeos de Projectes d'Expressió Gràfica està allotjada al canal de Youtube “Oscar Farrerons”, en què hi ha un petit nombre de vídeos d'altres temàtiques, la principal dedicació del canal és la llista de Projectes d'Expressió Gràfica.

La llista de Youtube té per finalitat mostrar un recull dels millors projectes (a criteri d'aquest professor), dels alumnes que han realitzat una de les dues assignatures: EG o AEGDM. Tot i la limitació de grups impartits pel professor, o la discontinuïtat per quadrimestres, sembla que pot tenir interès un recull estadístic actual, i la seva comparació en el treball presentat fa dos anys.

Tots els vídeos de la llista han estat pujats a Youtube amb la indicació “Vídeo NO creat per a nens”, seguint les instruccions obligatòries de Youtube en que cal indicar “Sí” o “No” a la pregunta sobre si ha estat creat per infants. Els vídeos tenen llicència de Youtube estàndard, i en l'apartat en que cal triar (obligatòriament) la categoria del vídeo s'ha escollit “educació”.

3. Dades generals

Malgrat que es tracta d'un canal Youtube particular, on a més d'aquesta llista de reproducció hi ha allotjades tres llistes més d'altres temes, sols es tindran en compte les dades de la llista "Projectes Expressió Gràfica". El canal té, en el moment de redacció d'aquest article, un total de 396 subscriptors, xifra variable en el temps, donades les altes i baixes que van succeint periòdicament.

A la llista Youtube es troben vídeos de Projectes d'Enginyeria Gràfica de l'assignatura EG, de 1er quadrimestre, però també de l'assignatura AEGDM, de 5è quadrimestre, que es van començar a afegir a partir de l'any 2012. Cada un dels vídeos està identificat a quina assignatura correspon, igualment com el curs acadèmic i el quadrimestre.

Els vídeos de la llista estan ordenats manualment de manera cronològica descendent, des del 2025 al 2010. El nom del vídeo indica el curs acadèmic, seguit del quadrimestre (QT o QP), i un nom identificatiu del projecte (per exemple "rellotge de taula"). El nom dels alumnes autors del projecte es pot veure sempre en el propi vídeo, ja sigui a l'inici o al final, en forma de crèdits (no es permet entregar cap vídeo sense autoria).

La taula 1 mostra les dades principals dels 5 primers vídeos en número de visualitzacions (i amb hores i impressions), amb dades a desembre 2025. Les impressions són les vegades que s'han mostrat les miniatures dels vídeos als usuaris (sols comptabilitzades des de 2018).

Si comparem aquesta actual taula dels vídeos top 5 per més visualitzacions en número o en hores, amb la taula del top 5 que vàrem fer al novembre 2023, podem apreciar que es tracta dels mateixos 5 vídeos, en que tots han pujat en nombre de visualitzacions lleugerament, excepte el titulat "Màquina de Cosir" que ha pujat més de dos mil visualitzacions, i abans estava en la posició 5a i ara està en la 4a. A part d'aquesta variació la resta es manté molt estable.

Curs (Quad.)	Vídeo	Número Visualitzacions	Temps visualització	Impressions
15-16 (QT)	Grapadora	61.014	792,5	390.907
12-13 (QT)	Ventilador	21.035	269,8	66.311
15-16 (QP)	Gato mecánico	10.654	124,6	126.427
14-15 (QT)	Màquina Cosir Sigma	10.142	159,3	140.538
16-17 (QT)	Banqueta pianista	8.743	110,9	73.656

Taula 1. Els 5 vídeos amb més visualitzacions, amb indicacions d'hores de visualització i impressions, acumulat des de 2010. (Font pròpia a partir de dades Youtube)

Les dades generals Youtube del número total de visualitzacions (des de la creació de la llista) sumen 330.288, quan al novembre 2023 sumaven 276.607 (un 19% d'augment en aquests dos anys); el d'hores 5.949, quan al novembre 2023 sumaven 4.562 (un increment del 30%); i les impressions 2.555.951, quan al novembre 2023 sumaven 1.935.942 (un 32% més). A grans trets doncs, en aquests dos anys la llista ha incrementat en una cinquena part el número de visualitzacions, i a la vegada els espectadors han estat més estona mirant els vídeos (una tercera part més).

Com a curiositat podem destacar que el vídeo “Grapadora” té 81 “me gusta”, el “Ventilador” 39 “me gusta”, el “Gato mecánico” 38 “me gusta”, el “Màquina de cosir” 163 “me gusta”, i el “Banqueta pianista” 102 “me gusta”.

De la mateixa manera que vàrem fer al novembre 2023, analitzem el número de visualitzacions (i hores) de la llista “Projectes Expressió Gràfica” el darrer any (des de 2/12/2024 a 2/12/2025), dades que es materialitzen a la taula 2.

Curs (Quad.)	Vídeo	Número Visualitzacions	Temps visualització	Duració vídeo
24-25 (QT)	Bomba d'Aire	1.714	40.4	1:42
24-25 (QT)	Guitarra Gibson	1.346	25.2	1:19
24-25 (QT)	Tanc Sherman Lego	1.345	41.4	2:13
24-25 (QP)	Rellotge de Taula	1.062	27.1	1:50
23-24 (QP)	Bomba de Buit	1.001	31.1	2:13

Taula 2. Els 5 vídeos amb més visualitzacions, amb indicacions d'hores de visualització, en el període 2/12/2024 a 2/12/2025. (Font pròpia a partir de dades Youtube)

Igual com passava al 2023, el temps de visualització (mesurat en hores) està clarament relacionat amb el número de visualitzacions i el temps de cada vídeo, tal i com es pot veure en la taula número 2, en que hem incorporat la duració de cada un dels vídeos (en minuts:segons), tot i que el temps de visualització inclou no sols la visualització complerta sinó també quan ha estat parcial.

Tots els cinc vídeos més visualitzats en el darrer any (mesurats en número de visualitzacions o en hores), són vídeos actuals, cap dels vídeos que han aparegut a la taula 1, o els cinc vídeos més visualitzats fa dos anys. Aquest dada ens indica que els espectadors de la llista “Projectes Expressió Gràfica” solen mirar sobre tot els primers vídeos de la llista, i no pas un repàs general ni una tria entre els més de 200 vídeos.

4. Visualitzacions per país i ciutat

Del total de 330.228 visualitzacions que acumula la llista “Projectes Expressió Gràfica” (des de l’inici fins el moment de redactar aquest article) sols un 59.5% està identificat el país de procedència (196.514

visualitzacions). Els 5 principals països en número de visualitzacions a la llista s'indiquen a la figura 2.

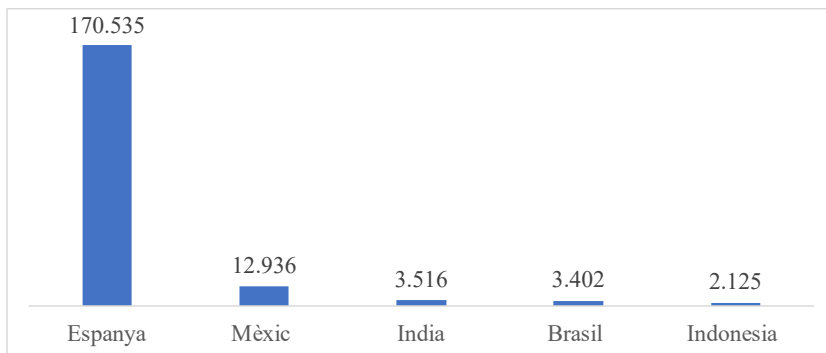


Figura 2. Número de visualitzacions per país. (Font pròpia a partir de dades Youtube)

El país de procedència amb més visualitzacions identificades és Espanya amb un 51.6% de les visualitzacions (un 46.7% al 2023), seguit de Mèxic amb un 3.8% (4.5% al 2023), Índia amb 1.1% (igual al 2023), Brasil amb un 1.0% (1.2% al 2023) i Indonèsia amb un 0.7% (0.8% al 2023). Són dades molt similars al 2023, que demostren que la llista es consultada principalment a Espanya.

Si refinem les estadístiques de la llista Youtube pel número de visualitzacions per ciutat veurem que actualment la primera posició és per Barcelona, amb 30.924 visualitzacions, la segona Sant Adrià de Besòs amb 3.956, la tercera L'Hospitalet de Llobregat amb 825, i la quarta Santa Coloma de Gramenet amb 369. A partir d'aquí segueixen per ordre Sant Cugat del Vallès, Badalona, Viladecans, Cerdanyola, Montcada i Reixac, Vic, Mataró, Castelldefels, Granollers, Rubí, Cornellà, Sabadell, Molins de Rei, Gavà, Terrassa, etc, tots en valors baixos. La primera ciutat no espanyola que apareix és Jakarta, amb 106

visualitzacions. Igual com al 2023, es confirma que és una llista Youtube de consulta local.

5. Sexe, edat i estat de subscripció

Les dades Youtube de la nostra llista “Projectes Expressió Gràfica” classifica els espectadors amb un 69.9% de visualitzacions de perfils declarats homes (73.6% al 2023), i un 30.1% de dones (26.4% al 2023).

Respecte l'edat dels espectadors de la nostra llista de Youtube, es poden observar a la figura 3, en que es pot apreciar que el públic majoritari (del total de visualitzacions fins el moment de l'estudi) al 2023 estava comprés a la franja entre els 18 i els 24 anys (corresponent a l'edat principal dels estudiants d'enginyeria a l'EEBE), mentre que al 2025 el públic majoritari es concentra a la frana 55 a 64 anys. Tant en l'estudi estadístic del 2023 con en el 2025, les franges d'edat menor de 18 anys i major de 65 són menyspreables, i la franja 45-54 anys molt petita.

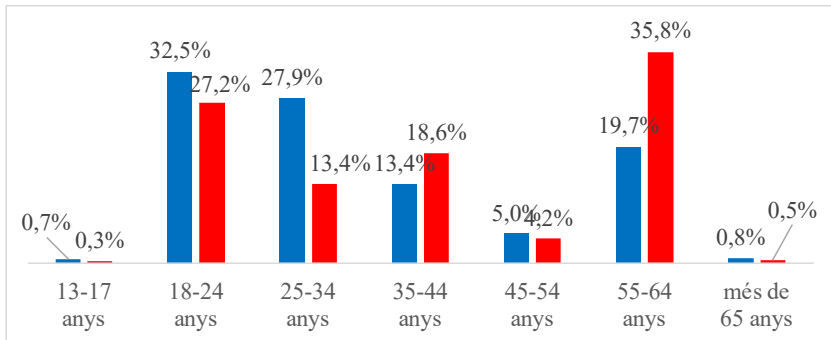


Figura 3. Percentatge dels espectadors de la llista “Projectes Expressió Gràfica” (des de sempre) per franges d'edat. La columna blava correspon a les dades del 2023, la vermella a les dades de l'actual estudi 2025. (Font pròpia a partir de dades de Youtube)

Del total de 330.288 visualitzacions, han estat portades a terme per espectadors subscrits al canal Youtube un 4.3% (2.7% al 2023), però la gran majoria de les visualitzacions són d'usuaris no subscrits, en un 95.8% (97.3% al 2023).

6. Dades específiques de la llista

Els 223 vídeos de la llista no s'han incorporat d'una manera homogènia durant els diversos cursos, sinó que les condicions acadèmiques, i la qualitat dels projectes, han influït en el número de vídeos per curs. La figura 4 ens mostra els vídeos de cada curs.

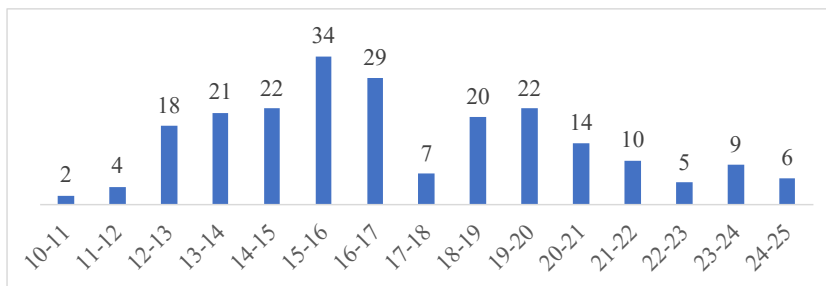


Figura 4. Número de vídeos de la llista segons curs acadèmic.

Aquesta quantitat total de 223 de vídeos que veiem que no està repartida de manera homogènia per cursos, tampoc ho està per quadrimestres, ja que 85 són del quadrimestre de primavera (38%) i 138 de tardor (62%). La distribució la podem veure a la figura 5, en que queda clar que quasi sempre hi ha més vídeos corresponents al quadrimestre de tardor.

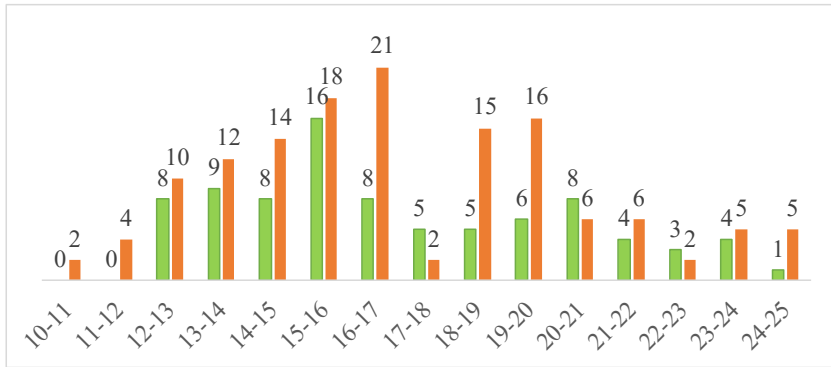


Figura 5. Número de vídeos per quadrimestre i curs.
Primavera en verd, Tardor en marró.

La majoria dels vídeos dels projectes són de l'assignatura Ampliació Expressió Gràfica i Disseny Mecànic (AEGDM), en concret 154 (69%), per sols 69 (31%) de l'assignatura Expressió Gràfica (EG). Sembla lògic pensar la majoria dels vídeos siguin de l'assignatura de cinquè quadrimestre, en que els coneixements dels alumnes són molt més avançats en l'àmbit de l'Enginyeria Gràfica. La figura 6 ens mostra la distribució dels vídeos segons assignatura i curs, en que es pot apreciar com en els darrers dos anys (del 2023 al 2025) hi ha més vídeos EG que de l'assignatura AEGDM (per circumstàncies alienes a la qualitat dels treballs presentats).

El que hem vist a les figures 4, 5 i 6 deixa clar que de les dades de la llista no podem extreure conclusions generals de l'assignatura, perquè la quantitat de vídeos per cursos, quadrimestres o assignatures és força variable, però a criteri del que signa aquest article si que permet tenir una idea bastant aproximada del que es demana als alumnes en l'aprenentatge autònom del projecte d'Enginyeria Gràfica, i aquesta és, a priori, una virtut de la llista, al permetre mostrar als alumnes allò que

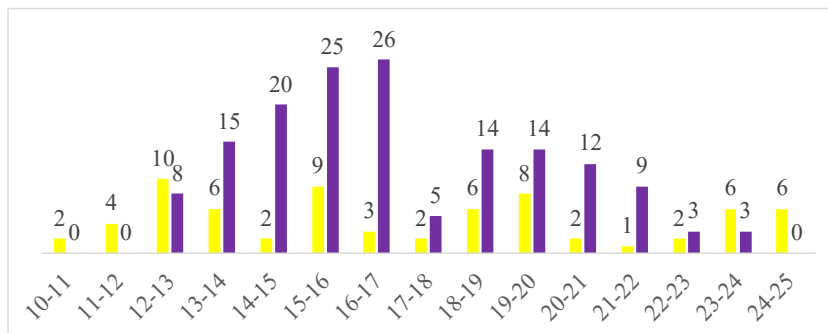


Figura 6. Número de vídeos per assignatura i curs.
Assignatura EG en grog, assignatura AEGDM en lila.

s’espera d’ells en el darrer treball que entregaran en l’assignatura (independentment que també es facilita als alumnes un llistat detallat dels elements que ha d’incorporar el projecte, específicament un rúbrica per EG i una altra rúbrica per AEGDM).

7. Conclusions

La finalitat de la llista de reproducció Youtube “Projectes Expressió Gràfica (Solidworks)” ha estat sempre un objectiu docent, en cap cap s’ha pretès per monetitzar el canal per a guanys econòmics (independentment que queda molt lluny dels mínims que demana Youtube per monetitzar les visualitzacions).

La llista està configurada per l’autor de manera que permet la inserció de comentaris per part dels usuaris que la visualitzen. Els comentaris dels espectadors són de dos tipus. Els que feliciten per la feina feta; i els que demanen els models SW amb que s’han creat els vídeos (en cap cas s’han facilitat arxius ni documents als espectadors). Aquesta llista sols és una eina per visualitzar treballs acadèmics ja executats en les assignatures EG i AEGDM de l’EEBE, però no facilita mai els fitxers originals.

La implantació del pla d'estudis 2009 a les assignatures d'Expressió Gràfica i Ampliació Expressió Gràfica i Disseny Mecànic, va propiciar que és desenvolupés la competència acadèmica de treball autònom, i això es va concretar en el lliurament final d'un Projecte d'Enginyeria Gràfica. L'autor d'aquest article ha anat publicant, des de 2010, alguns dels millors vídeos en una llista de reproducció del canal particular Oscar Farrerons, per facilitar la visualització de la feina encarregada i, amb el pas dels cursos, la llista ha anat augmentant i adquirint un número significatiu de visualitzacions. En aquest article s'han analitzat diferents variables, que defineixen el tipus d'espectador de la llista, i les similituds i variacions de les dades dels darrers dos anys.

La conclusió final és que la llista Youtube "Projectes Expressió Gràfica", instal·lada en el canal Oscar Farrerons, continua sent una eina eficaç per l'autoaprenentatge dels estudiants de les assignatures EG i AEGDM de l'EEBE (una eina complementària). A més, per les dades dels espectadors que permet recollir Youtube, podem afirmar que també és una llista amb visualitzacions per part d'un públic més ampli.

Referències

- Farrerons, O. (2025). *Projectes Expressió Gràfica (SolidWorks)*
<https://www.youtube.com/playlist?list=PL9E4ECD53E6C96EB0>
- Farrerons, O. (2022). *Thirty years of teaching graphic engineering projects at the Barcelona School of Engineering*. <http://hdl.handle.net/2117/374383>
- Farrerons, O. (2024). Canal YouTube: Projectes Expressió Gràfica (SolidWorks). *A Research advances in Graphic and Design Engineering at the UPC BarcelonaTech*. OmniaScience, p. 98-110. <https://hdl.handle.net/2117/401433>
- Martínez Martínez, M.R., Olmedo Torre, N., Amante García, B., & Farrerons Vidal, O.. (2014): Analysis of Assessment Tools on Engineering Degrees. *International Journal of Engineering Education*.

Il toolkit dignity – Per una mobilità inclusiva nell'era della digitalizzazione

Boris Lazzarini

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Natàlia Carmona Verdura

Eurecat Centre Tecnològic

Elisabet Roca

Escola Tècnica S. d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Bartosz Wybraniec

Centre Específic de Recerca en Automoció i Mobilitat Avançada (UPC)

Abstract

Questa ricerca descrive l'applicazione di strumenti di progettazione centrata sull'utente (*user-centred design*, UCD) e di co-creazione nel processo di ideazione e sviluppo di un toolkit online volto ad affrontare il divario digitale nel settore della mobilità. Gli approcci di UCD e co-creazione mirano a comprendere in profondità i bisogni degli utenti e a tradurli in soluzioni progettuali adeguate. L'articolo illustra il percorso di co-creazione del toolkit e riflette sui risultati finora ottenuti. Il processo di progettazione si è articolato in una fase iniziale di analisi del contesto e di definizione dei profili degli utenti e dei loro bisogni, seguita da una seconda fase di co-creazione della soluzione e da una fase finale di valutazione e test dell'utilizzo del toolkit e dell'intero processo di co-creazione. L'insieme dei metodi adottati, basati sull'UCD e sul coinvolgimento di diversi gruppi target in qualità di utenti finali, ha prodotto dati qualitativi che contribuiranno a orientare e rafforzare sia il processo di co-creazione sia l'implementazione finale del toolkit. Oltre agli strumenti resi disponibili attraverso il sito web, l'approccio proposto promuove la co-creazione, la collaborazione e la partecipazione come elementi chiave per migliorare l'inclusione e l'accessibilità negli ecosistemi della mobilità.

Abstract

This research describes the application of user-centred design (UCD) and co-creation approaches in the design and development process of an online toolkit aimed at addressing the digital divide in the mobility sector. UCD and co-creation approaches seek to gain an in-depth understanding of users' needs and to translate them into appropriate design solutions. The paper presents the co-creation pathway of the toolkit and reflects on the results achieved so far. The design process was structured around an initial phase focused on contextual analysis and the definition of user profiles and their needs, followed by a second phase dedicated to the co-creation of the solution and a final phase involving the evaluation and testing of both the toolkit's usability and the overall co-creation process. The set of methods adopted, grounded in UCD principles and involving different target groups as end users, generated qualitative data that will help guide and strengthen both the co-creation process and the final implementation of the toolkit. Beyond the tools made available through the website, the proposed approach promotes co-creation, collaboration and participation as key elements for enhancing inclusion and accessibility within mobility ecosystems.

1. Introduzione

Lo sviluppo digitale sta determinando un cambiamento di paradigma nella mobilità, come in altri ambiti della vita quotidiana. Tuttavia, questa tendenza può escludere coloro che non possiedono competenze digitali o accesso alla rete o alle infrastrutture, aumentando le disuguaglianze sociali e limitando lo sviluppo urbano sostenibile in diverse dimensioni. Alcuni gruppi – come persone con basso livello di istruzione o reddito, anziani, abitanti di aree rurali, migranti o persone con disabilità (DIGNITY, 2020) – possono essere vulnerabili all'esclusione a causa dei limiti di accesso e uso della tecnologia.

La letteratura scientifica identifica diverse forme di divario digitale nei complessi sistemi di mobilità digitalizzata, che dimostrano come ampie parti della popolazione non possano accedere o operare adeguatamente nei servizi di trasporto attuali, mancando di mezzi,

conoscenze o competenze (Hoeke et al., 2020). Comprendere e promuovere gli aspetti legati all'inclusività nei servizi di mobilità digitale è uno degli obiettivi di ricerca dell'iniziativa europea H2020 DIGNITY, finanziata nell'ambito del programma Horizon 2020 dell'Unione Europea. I processi di 'co-creazione' aiutano a comprendere e rispondere ai bisogni degli utenti coinvolgendoli durante il processo di progettazione. È un termine il cui uso è cresciuto in molti campi interdisciplinari. La co-creazione indica nuove modalità di coinvolgimento tra persone per creare valore condiviso o liberare il potenziale creativo di gruppi eterogenei (Rill & Hämäläinen, 2018). Questa definizione è coerente con l'obiettivo del progetto DIGNITY, che considera la diversità delle persone per un sistema di mobilità inclusivo.

Sono state analizzate e valutate diverse metodologie per contribuire alla progettazione di un risultato specifico: un toolkit educativo rivolto a vari stakeholder, come responsabili politici, ricercatori e operatori della mobilità, indirizzato a diversi livelli dell'ecosistema della mobilità per rispondere ai bisogni degli utenti potenzialmente vulnerabili all'esclusione. I toolkit offrono consigli pratici e linee guida su temi emergenti o in evoluzione, per cui non esistono ancora processi consolidati. Questo studio descrive il processo di disegno e implementazione di un toolkit digitale applicando un processo di co-creazione. In particolare, durante il processo è stata utilizzata una combinazione di metodi come interviste, benchmarking e prototipazione. Questi strumenti sono stati essenziali per identificare i bisogni dei gruppi target e per co-creare il toolkit con diversi stakeholder rilevanti.

2. Metodologia

Questa ricerca ha seguito metodi misti. Il processo complessivo ha incluso metodi UCD per definire e comprendere i bisogni degli utenti al

fine di progettare un toolkit online. Le fasi seguite nel processo seguono le fasi definite secondo l'approccio DIGNITY, basato su tre fasi iterative (Fig. 1): framing, bridging ed evaluating, mantenute poiché coerenti con gli obiettivi del progetto, adattando tuttavia alcuni strumenti.



Figura 1. Fasi del processo di co-creazione del toolkit

Fase	Metodo	Obiettivo
Framing	Revisione della letteratura	Raccogliere e sintetizzare le ricerche
	Benchmarking dei toolkit	Identificare toolkit rilevanti, buone pratiche e criticità
	Mappa degli Stakeholders	Definire gli attori coinvolti nel processo
	Interviste	Comprendere i bisogni degli utenti target
Bridging	Workshop di co-creazione	Ottenere feedback da diversi stakeholder su aspetti specifici
	Architettura web	Definizione della struttura del sito
	Interviste	Co-creare la proposta e aggiornare gli stakeholder
	Lista dei requisiti	Elenco di domande relative alle specifiche di progettazione
	Prototipo	Prototipo del sito web e dei contenuti
Evaluating	Valutazione dell'accessibilità	Lista di raccomandazioni basate su linee guida e standard
	Workshop di revisione	Workshop per validare la proposta del DIGNITY toolkit

Fase	Metodo	Obiettivo
	Questionario di feedback	Raccogliere il feedback degli utenti target

Tabella 1. Metodologia seguita per il Toolkit DIGNITY

3. Risultati

Inizialmente, è stata realizzata una prima revisione della letteratura per costruire uno stato dell’arte e individuare concetti e spunti rilevanti riguardo ai toolkit, al design inclusivo e ai processi di co-creazione. Garcia-Lopez et al. (2020) hanno presentato il loro processo di progettazione e implementazione di un repository di conoscenze e strumenti di design (noto come *Design Toolkit*) seguendo un approccio centrato sull’utente, risultato efficace nel campo educativo.

Dopo questo primo passo, lo strumento di benchmarking ha permesso di individuare diverse buone pratiche nei toolkit esistenti. È stata effettuata una revisione iniziale di 16 toolkit online (evidenziandone punti di forza e debolezza), di cui 9 selezionati per una comparazione più approfondita delle loro principali caratteristiche (tema, utenti target, formato, navigazione, contenuti e funzioni). I toolkit analizzati sono stati: *Design Toolkit* (Universitat Oberta de Catalunya, n.d.), *Design Kit* (IDEO, 2015), *Service Design Tools* (Tassi et al., n.d.), *UNaLAB Toolkit – Tools for Co-creation* (UNaLAB, n.d.), *Going Digital Toolkit* (OECD, 2022), *Delivering the circular economy: a toolkit for policymakers* (Ellen MacArthur Foundation, 2015), *Inclusive Digital Mobility Toolbox* (INDIMO, 2022), *Inclusive Design Toolkit* (University of Cambridge, 2017) e *Biomimicry Design Toolbox* (Biomimicry Institute, 2015).

Il confronto ha mostrato che i toolkit con un’ampia gamma di metodi e risorse tendono ad avere funzioni e classificazioni più complesse (sistemi di filtri, classificazioni basate sui ruoli degli stakeholder, durata, ecc.). La maggior parte dei toolkit analizzati era rivolta a utenti finali

specifici, come designer o responsabili politici. Ciò evidenzia la necessità di un formato e un vocabolario adattato ai bisogni di ogni gruppo target. Inoltre, tutti i toolkit identificati sono disponibili in formato web, ma alcuni offrono anche versioni scaricabili, utili per raggiungere un numero maggiore di utenti. La revisione ha anche raccolto diverse funzionalità: motore di ricerca interno, pulsante di traduzione, questionari di feedback o pulsanti per la condivisione sui social. La funzione più rilevante era un modulo di accessibilità che permetteva di modificare la dimensione del testo, la modalità colore o reimpostare le opzioni di accessibilità direttamente nella homepage.

Successivamente, una mappa degli stakeholder ha permesso di identificare attori e gruppi target rilevanti e di elencare bisogni e benefici che ciascuno avrebbe tratto dal toolkit DIGNITY. Questa mappatura ha supportato la selezione degli stakeholder da intervistare, considerando che le interviste sono state uno strumento chiave di raccolta di insight.

La prima intervista è stata condotta con un senior designer esperto nella creazione di toolkit. Egli ha spiegato come abbiano co-progettato il loro toolkit, il suo impatto e i limiti incontrati durante il processo. Successivamente è stata condotta una serie di interviste con utenti target potenziali precedentemente identificati: responsabili politici, sia tecnici sia istituzionali. Un'intervista è stata realizzata con una ex policymaker esperta in mobilità e processi partecipativi, che ha contribuito a raccogliere spunti sui contenuti e dati che il toolkit potrebbe offrire secondo le sue esigenze specifiche. Altre interviste sono state rivolte a tecnici delle politiche della mobilità appartenenti a cinque organizzazioni, contribuendo a precisare e definire i loro bisogni e interessi.

Queste interviste hanno confermato la necessità di organizzare i contenuti secondo diversi livelli di approfondimento:

1. Una prima panoramica delle informazioni chiave dello strumento,
2. Un secondo livello con contenuti completi sul processo di implementazione.

Entrambi i profili intervistati hanno anche suggerito di includere casi studio per illustrare esperienze precedenti e facilitare l'adozione di nuove strategie e strumenti.

Un workshop di co-creazione è stato essenziale per raccogliere feedback significativi da vari stakeholder. Il workshop è stato realizzato a Leuven (Belgio) e ha coinvolto partecipanti con profili differenti: operatori della mobilità, provider, responsabili politici, esperti e ricercatori. La metodologia si è ispirata al *World Café* (2022). I partecipanti sono stati suddivisi in gruppi, ciascuno assegnato a un tavolo, con un facilitatore incaricato di guidare la discussione e raccogliere il feedback. I temi discussi erano quattro: utenti target, contenuti, formato e design, e design inclusivo.

I facilitatori hanno condiviso i risultati in plenaria alla fine della sessione. Il primo tema ha aiutato a definire gli utenti target: responsabili politici, provider di mobilità, ricercatori e rappresentanti di gruppi vulnerabili all'esclusione. Sono stati elencati diversi bisogni e requisiti, come il coinvolgimento di vari livelli e dipartimenti politici, o la necessità di considerare rappresentanti dei gruppi vulnerabili, per i quali dati e contenuti possono essere strumenti fondamentali per fare pressione e ridurre il divario digitale. Il secondo tema riguardava i contenuti, tra cui l'importanza di mostrare l'approccio DIGNITY come iterativo, ad esempio attraverso una ruota visuale e interattiva nella homepage. È stata considerata cruciale la condivisione di dati rilevanti per creare urgenza rispetto al problema. Alcune proposte coincidono con quelle delle interviste: linee guida e template per l'implementazione degli strumenti, casi studio, una lista di letteratura e citazioni tratte dal processo di co-creazione. Il terzo tema ha evidenziato la necessità di

un formato semplice e facile da usare, per garantire il coinvolgimento degli utenti e permettere una rapida comprensione degli strumenti disponibili.

Il quarto tema ha affrontato il design inclusivo. Il requisito fondamentale indicato per il toolkit era la facilità di navigazione verso le informazioni rilevanti per ciascun utente, sulla base di una chiara comprensione dei bisogni dei target. Gli stakeholder hanno suggerito funzionalità per migliorare l'accessibilità, come screen reader e strumenti per il contrasto visivo. Come risorse sono state menzionate le linee guida WCAG (Web Accessibility Initiative, 2022) e l'*Inclusive Design Toolkit* (University of Cambridge Engineering Design Centre, n.d.).

Tutti gli insight raccolti hanno guidato la definizione di una prima proposta dell'architettura web, utile per organizzare la struttura dei contenuti. Il processo è iniziato con un inventario dei contenuti tramite una mappa mentale, basata sul feedback degli stakeholder. Successivamente queste informazioni sono state raggruppate ed etichettate secondo i requisiti di design del toolkit. Dopo una prima iterazione, una nuova versione è stata sviluppata in uno strumento collaborativo online per essere co-creata e valutata con diversi stakeholder.

3.1. Sviluppo e prototipazione del toolkit

Il primo prototipo (Figura 2a) si basava su schemi preliminari che rappresentavano un modello iniziale della progettazione. L'uso di piattaforme collaborative online hanno facilitato la co-creazione con gli stakeholder, contribuendo a costruire una proposta visiva del toolkit e dei suoi contenuti, che è poi evoluta in un design web avanzato. Il prototipo finale (Figura 2b) – consultabile alla web <https://dignity-toolkit.eu/> – è una piattaforma online contenente strumenti per valutare il divario digitale, destinata a responsabili politici, provider della

mobilità, ricercatori e rappresentanti di gruppi vulnerabili all'esclusione,



Figura 2. Prototipi del Toolkit DIGNITY: a. primo prototipo; b. ultimo prototipo

senza escludere altri potenziali utenti interessati al tema.

Per iniziare la navigazione e comprendere l'approccio e gli strumenti, nella homepage viene mostrata una ruota iterativa e visivamente intuitiva che dà accesso alle fasi e strumenti per affrontare il divario digitale. La homepage include anche dati rilevanti sul divario digitale per generare consapevolezza e urgenza, così come il 'Decision support tool', un test per identificare gli strumenti più adatti al contesto dell'utente.

3.2. Valutazione del toolkit

Una volta completata l'implementazione del sito web del toolkit DIGNITY (<https://dignity-toolkit.eu/>), il consorzio del progetto ha condotto una prima valutazione del processo di progettazione e implementazione. Il consorzio riunisce una pluralità di attori con competenze complementari, tra cui università, centri di ricerca, fornitori di servizi di mobilità, amministrazioni pubbliche locali, nonché imprese specializzate nello sviluppo di servizi digitali. Tra i partner figura anche il Cambridge Engineering Design Centre (EDC), che ha contribuito al progetto mettendo a disposizione la propria esperienza nella ricerca

fondamentale e applicata finalizzata a generare conoscenze utili al miglioramento dei processi di progettazione.

La valutazione ha seguito le linee guida della W3C Web Accessibility Initiative (2022) per verificare il livello di accessibilità del toolkit, tenendo conto dei bisogni dei diversi stakeholder e dei gruppi di utenti target. I risultati preliminari indicano un buon livello complessivo di accessibilità del sito, unitamente a un'impostazione progettuale chiara e intuitiva, in grado di facilitare l'orientamento e l'utilizzo dei contenuti da parte di utenti con differenti livelli di competenza digitale.

Sono previste ulteriori attività di ricerca che mirano a coinvolgere in modo più sistematico esperti e utenti target, al fine di raccogliere contributi più approfonditi e verificare in maniera iterativa la rispondenza del toolkit ai requisiti e alle necessità individuate. Nel suo complesso, il toolkit DIGNITY si propone come uno strumento di supporto per le istituzioni regionali e per i fornitori di servizi di mobilità, contribuendo alla riduzione del divario digitale e alla progettazione di politiche, prodotti e servizi di mobilità inclusive.

4. Discussione

L'applicazione di metodi e strumenti basati sull'UCD e sulla co-creazione ha dimostrato il valore aggiunto del coinvolgimento degli utenti target durante tutto il processo. La co-creazione si rivela un modello appropriato per garantire l'inclusione della diversità, con particolare attenzione ai gruppi vulnerabili all'esclusione durante la progettazione. Ciò permette di includere voci ed esperienze spesso escluse, pur essendo fondamentali. Inoltre, le sfide sociali contemporanee, come il cambiamento climatico, richiedono l'inserimento di processi di co-creazione e partecipazione nelle agende politiche.

Gli strumenti UCD e di co-creazione contribuiscono anche a migliorare prodotti e servizi sulla base dei bisogni e desideri degli utenti finali, garantendo risultati più mirati. Tuttavia, costi e tempi sono stati identificati come limiti dei processi di co-creazione. Questi richiedono numerose iterazioni nelle fasi di progettazione, sviluppo e valutazione, con conseguente aumento del tempo necessario. La fattibilità dipende dal contesto: ricercatori ed esperti potrebbero avere maggiore flessibilità, mentre le implicazioni tecniche e politiche possono renderne più complessa l'applicazione.

5. Conclusioni

Questo progetto di ricerca ha seguito un processo articolato in tre fasi (framing, bridging ed evaluating), includendo un insieme di strumenti di progettazione centrata sull'utente per analizzare lo stato dell'arte del toolkit e identificare quali caratteristiche e contenuti il toolkit dovesse avere, considerando i bisogni degli stakeholder e i requisiti di design. Nel complesso, da una prospettiva di processo, la co-creazione ha facilitato la progettazione del toolkit, grazie agli insight e alle proposte progettuali validate dagli stakeholder. Pertanto, i processi di co-creazione si sono rivelati utili e hanno favorito l'inclusione non solo degli utenti target, ma anche di diversi attori coinvolti.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata realizzata nell'ambito del progetto DIGNITY, che ha ricevuto finanziamenti dal Programma di Ricerca e Innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea, secondo l'Accordo di Finanziamento n. 875542.

Riferenti

Biomimicry Institute. (2015). *Biomimicry toolbox*. <https://toolbox.biomimicry.org/>

- Boeijen, A. van, Daalhuizen, J., Zijlstra, J., Schoor, R. van der, & Technische Universiteit Delft, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen. (2014). *Delft design guide: Design strategies and methods* (B. B. V. Uitgeverij, Ed.; 2nd ed.).
- DIGNITY project. (2022). DIGNITY – Digital transport in and for society. <https://www.dignity-project.eu/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Delivering the circular economy: A toolkit for policymakers*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-toolkit-for-policymakers>
- Garcia-Lopez, C., Tesconi, S., & Mor, E. (2019). Designing design resources: From contents to tools. In M. Kurosu (Ed.), *Human–computer interaction: Perspectives on design* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11566). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22646-6_7
- Hoeke, L., Noteborn, C., Goncalves, M., & Nesterova, N. (2020). DIGNITY: Literature review – Effects of digitalization in mobility in society (D1.1).
- IDEO. (2015). *Design kit*. <https://www.designkit.org/methods>
- INDIMO project. (2022). *INDIMO inclusive digital mobility toolbox*. <https://www.indimoproject.eu/indimo-digital-mobility-toolbox/OECD>. (2022). *Going digital toolkit*. <https://goingdigital.oecd.org/>
- Rill, B. R., & Hämmäläinen, M. M. (2018). *The art of co-creation: A guidebook for practitioners*.
- Tassi, R., et al. (n.d.). *Service design tools*. <https://servicedesigntools.org/>
- The World Café. (2022). *World café method*. <http://theworldcafe.com/key-concepts-resources/world-cafe-method/UNaLAB> project. (n.d.). *UNaLAB toolkit*. <https://unalab.enoll.org/>
- Universitat Oberta de Catalunya. (n.d.). *Design toolkit*. [http://design-toolkit.recursos.uoc.edu/es/University of Cambridge Engineering Design Centre](http://design-toolkit.recursos.uoc.edu/es/University%20of%20Cambridge%20Engineering%20Design%20Centre). (2017). *Inclusive design toolkit*. <https://www.inclusivedesigntoolkit.com/>
- YALSA – American Library Association. (n.d.). *Toolkit creation guide*. <https://www.ala.org/yalsa/sites/ala.org.yalsa/files/content/ToolkitCreationGuide.pdf>
- Web Accessibility Initiative. (2022). *Evaluating web accessibility overview*. <https://www.w3.org/WAI/test-evaluate/>

La inspiración de la biomímesis como una metodología multidisciplinar y de creatividad en la ingeniería del diseño

Daned Maldonado Wilches

Màster en Disseny Avançat - Barcelona (UPC-UB)

Mireia Puig-Poch

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Resumen

Esta monografía examina la biomímesis como un paradigma que convierte la naturaleza en una fuente sistemática de innovación sostenible y creatividad para enfrentar los desafíos climáticos globales. Se revisa su evolución histórica, desde las prácticas intuitivas hasta la consolidación de su marco conceptual moderno, destacando los principios clave y su aplicación en la ingeniería. El trabajo describe la metodología mediante la espiral biomimética de seis fases (identificación, biologización, búsqueda, abstracción, emulación y evaluación) y la transición del diseño por analogía a las plataformas digitales especializadas. Se analiza el rol del ingeniero como mediador esencial en la transferencia de conocimiento biológico-tecnológico. Un caso de estudio valida la metodología, demostrando su alineación estratégica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 11, 12 y 13. Se concluye que la biomímesis promueve efectivamente la economía circular, la eficiencia energética y las comunidades sostenibles a través del trabajo multidisciplinario y un enfoque de diseño altamente creativo.

Palabras Claves: biomimesis, multidisciplinar, bioinspiración, ODS, rol académico, creatividad.

Abstract

This monograph examines biomimicry as a paradigm that positions nature as a systematic source of sustainable innovation and creativity for addressing global climate challenges. It reviews the historical evolution of biomimicry, from intuitive practices to the consolidations of its contemporary conceptual

framework, highlighting its core principles and applications in engineering. The study describes the methodology articulated through the six-phase biomimetic spiral (identification, biologization, search, abstraction, emulation, and evolution), as well as the transition from analogy-based design to specialized digital platforms. The role of the engineer is analyzed as a key mediator in the transfer of biological-technological knowledge. A case study validates the proposed methodology, demonstrating its strategic alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 11, 12, and 13. The monograph concludes that biomimicry effectively fosters circular economy principles, energy, and sustainable communities through multidisciplinary collaboration and a highly creative design approach.

1. Introducción

Los retos actuales que enfrenta la sociedad son cambiantes y evolutivos, y dependen directamente de los patrones del comportamiento global. Ante esta dinámica, la reducción del impacto ambiental emerge como un objetivo central y prioritario. Esto ha impulsado proyectos que incorporan la sostenibilidad como eje transversal en ámbitos de fuentes de energía renovable, el uso de materiales locales y el desarrollo de alternativas biodegradables (Davidson et al., 2010). Por este motivo, se ha convertido en una meta compartida por múltiples disciplinas, que la abordan mediante herramientas como la creatividad, la experiencia y el conocimiento especializado en cada proyecto.

En este contexto surge el concepto de biomimética, popularizado por Janine Benyus, quien la define (1997) como: “la imitación de diseños y procesos de la vida para abordar desafíos humanos de forma sostenible” (Secc. “Nature as model”). La biomímesis utiliza la naturaleza como metodología multidisciplinar de inspiración, potenciando la creatividad y la eficiencia en los procesos de desarrollo, con ejemplos que van desde estrategias pasivas de termorregulación inspiradas en estructuras biológicas, hasta

aplicaciones actuales en nanotecnología. Esto se demuestra, por ejemplo, en el desarrollo de nanomateriales y nanoestructuras basadas en la seda de araña (Al-Masri et al., 2025; Mundekkad & Mallya, 2025). Este enfoque se sistematiza a través de la espiral biomimética, que es una metodología de diseño cíclica y rigurosa que avanza por etapas, desde la identificación del problema hasta la emulación y la evaluación final de soluciones innovadoras.(Cabrero-Olmos et al., 2021; Yeter et al., 2023).

Este trabajo presenta los fundamentos teóricos de la biomímesis, su aplicación en procesos creativos multidisciplinarios y su efectividad en la resolución de problemas reales en ingeniería, con el propósito de evidenciar cómo esta metodología puede contribuir a transformar el desarrollo hacia modelos más sostenibles y creativos en el ámbito ingenieril. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sistemática de literatura académica reciente y relevante, consultando bases de datos especializadas como Scopus, Web of Science y ScienceDirect, para asegurar la validez y actualidad de los referentes teóricos y ejemplos de aplicación.

1. Fundamentos teóricos

2.1 Evaluación histórica

La naturaleza ha servido como fuente de inspiración desde la Antigüedad, mediante la observación y la curiosidad humanas como base para resolver problemas, imitando formas, estructuras, funciones y procesos presentes en los sistemas vivos (Benyus, 1997). Diversas civilizaciones, como la romana o la maya, incorporaron este tipo de aproximaciones en sus construcciones y en elementos de la vida cotidiana, aunque sin una formulación metodológica explícita (Verbrugghe et al., 2023).

En el siglo XX, el bioingeniero Otto Schmitt introdujo el término “biomimética” para describir la transferencia de principios de la biología hacia la tecnología, marcando uno de los primeros usos contemporáneos de esta terminología (Sharma & Sarkar, 2019). Décadas más tarde, Janine Benyus popularizó el concepto “biomimética” en 1997, enfatizando a la naturaleza como modelo, medida y mentora, y vinculando explícitamente esta práctica con la sostenibilidad y con una metodología de diseño más sistemática (Benyus, 1997).

Luego, a comienzos de la década de 2000 se creó el Biomimicry Institute (<https://biomimicry.org/>) una organización que busca impulsar soluciones innovadoras con un enfoque eficaz, eficiente y sostenible para los desafíos contemporáneos, a través de equipos de trabajo multidisciplinares (About Biomimicry Institute, 2025). Esto muestra cómo la inspiración en la naturaleza ha pasado de ser una práctica dispersa a consolidarse como un campo organizado de estudio e innovación. Por ejemplo, la biomimética ha ofrecido grandes soluciones en la medicina, con las nanopartículas las cuales son capaces de transportar agentes para combatir enfermedades en lugares específicos del cuerpo (Mundekkad & Mallya, 2025).

2.2 Principios fundamentales y aplicaciones

La naturaleza como modelo hace referencia a las innovaciones basadas en las estrategias naturales efectivas y sostenibles empleadas por los organismos y ecosistemas, replicando estructuras, comportamientos y procesos (Verbrugghe et al., 2023). Así mismo, la naturaleza como medida establece que las soluciones humanas deben evaluarse mediante estándares ecológicos respetando; midiendo el impacto ambiental, su eficiencia energética, y su compatibilidad a largo plazo con los ecosistemas. La naturaleza no tolera los excesos, desperdicios ni desequilibrios, por lo que la biomimética promueve la economía circular, el uso mínimo y adecuado de recursos, y la

reducción de residuos y contaminación (Vincent et al., 2006). Por último, la naturaleza como mentora, fomenta la creación de grupos multidisciplinarios donde la observación, el respeto y el aprendizaje continuo está alineado con la oportunidad de desarrollar soluciones innovadoras que estén alineadas con los procesos en la vida, pero promoviendo el desarrollo sostenible y la cohabitación del hombre y la naturaleza (Yeter et al., 2023).

Principio	Inspiración Natural	Aplicación Ingeniería
1. La naturaleza funciona con luz solar	Fotosíntesis usa luz solar	Celdas solares eficientes
2. La naturaleza usa solo la energía que necesita	Termostatos biológicos	Motores variables Shinkansen
3. La naturaleza adapta la forma la función	Cierre autoadherente: semillas bardana	Diseño optimizado productos
4. La naturaleza recicla todo	Ciclos ecosistemas cerrados	Economía circular cero residuos
5. La naturaleza premia la cooperación	Micorrizas/hongos plantas	Robótica enjambre logística
6. La naturaleza apuesta por la diversidad	Ecosistemas múltiples especies	Agricultura perenne resiliente
7. La naturaleza exige conocimiento local	Adaptación climática local	Eastgate: clima Zimbabwe
8. La naturaleza controla el exceso desde dentro	Retroalimentación biológica	Edificios auto-regulados
9. La naturaleza aprovecha el poder de los límites	Nanoestructuras optimizadas	Pinturas hidrofóbicas loto

Tabla 1. Principios fundamentales bioinspiración de la naturaleza (Benyus, 1997; Verbrugge et al., 2023; Vincent et al., 2006; Yeter et al., 2023).

Dado lo anterior, se presentan los 9 principios fundamentales de la biomimesis propuestos por Janine Benyus (Benyus, 1997), que guían una metodología multidisciplinaria de creatividad en ingeniería (Sá & Viana, 2023). Esta se basa en interpretarlos mediante tres preguntas

clave: ¿cuál es la enseñanza de la naturaleza?, ¿en qué nos podemos inspirar? y ¿qué podemos aplicar a problemas ingenieriles?, todo fundamentado en la observación empírica y un desglose en aspectos científicos e ingenieriles (Vincent et al., 2006). En la Tabla 1 se detallan cada principio, su inspiración natural o réplica lograda, y su aplicación específica en ingeniería.

3. Creatividad y proceso

3.1. Espiral de diseño biomimético

El proceso de diseño basado en la biomimética cuenta con elementos que sirven de guía para que los profesionales aborden distintos problemas mediante la réplica o la inspiración en las estrategias de la naturaleza; este esquema se conoce como espiral de diseño biomimético y se compone de seis pasos (Cabrero-Olmos et al., 2021):

Estos pasos obligan a ir más allá de la imitación formal y favorece la colaboración entre disciplinas como biología, ingeniería, diseño y ciencias sociales, por lo que la espiral biomimética se convierte en una herramienta metodológica idónea para proyectos de ingeniería orientados a la innovación sostenible y alineada con los procesos vitales del planeta (Alanbari & Al, 2022).

3.2. Rol académico

Los conocimientos adquiridos por los ingenieros durante su vida académica y laboral, junto con la experiencia de los biólogos en el estudio de los seres vivos y su relación con el entorno, son complementarios y vitales para la resolución de los problemas actuales (Vincent et al., 2006; Yeter et al., 2023). No obstante, es necesario que la ingeniería se involucre más en la comprensión de los sistemas naturales como fuente de principios funcionales transferibles a problemas de la sociedad (Yeter et al., 2023). Por ello, la biomimesis plantea un enfoque de diseño que integra biología, ingeniería, diseño y

sostenibilidad, redefiniendo el rol académico del ingeniero como mediador entre múltiples disciplinas y lenguajes de conocimiento (Vincent et al., 2006; Yeter et al., 2023).

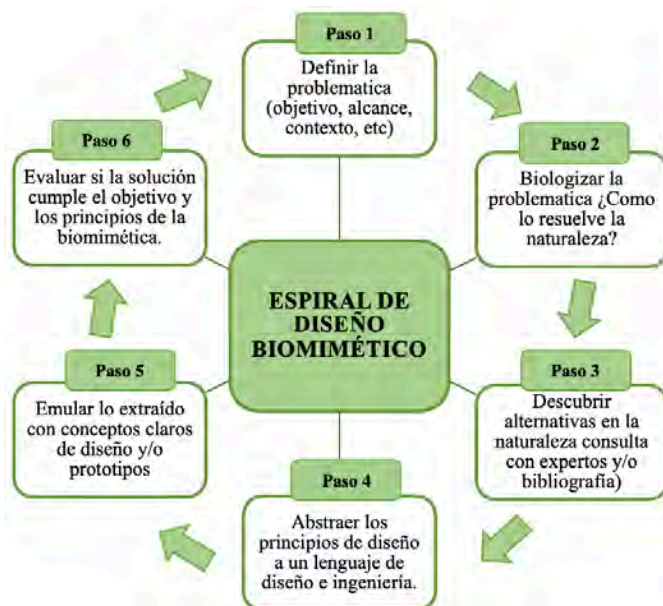


Figura 1. Pasos de la espiral de diseño biomimético.

La academia, al integrar de forma interdisciplinar la biomimesis en el currículo, asume la responsabilidad de preparar ingenieros que dominen herramientas de análisis y simulación, pero que también desarrollen sensibilidad ecológica, pensamiento crítico y capacidad para generar diseños inspirados en la vida que contribuyan a los retos de sostenibilidad actuales (Sharma & Sarkar, 2019).

3.3. Herramientas (Comparativa entre el periodo Pre-1990 y el post-2000)

La biomimética en el pasado fue abordada desde la observación directa a la naturaleza, la literatura, la experiencia y enriquecida con el conocimiento de los expertos para traducir los hallazgos en conceptos de ingeniería. Esto se denominó diseño por analogía, donde se pueden encontrar ejemplos conocidos como lo son: el velcro®, el tren bala y el efecto loto, entre otros. En ese momento, no existían metodologías definidas ni bases de datos para guiar la búsqueda de soluciones (Kennedy, 2017; Vincent et al., 2006).

Con el pasar de los años, esto ha cambiado dado la creciente preocupación de la sociedad por tener alternativas de cómo abordar los problemas en un menor tiempo, con mayor precisión y con recursos efectivos. Por esto, se han desarrollado herramientas computacionales que apoyan todo el proceso de diseño bioinspirado, desde la búsqueda hasta la abstracción y transferencia del principio biológico (Sharma & Sarkar, 2019). Entre ellas destacan:

- Repositorios en línea como AskNature, que organizan soluciones biológicas mediante una taxonomía funcional de “qué hace la naturaleza”, permitiendo búsquedas por función de ingeniería.
- Motores de analogía y bases de datos como IDEA-INSPIRE, DANE o el “engineering-to-biology thesaurus”, que relacionan descripciones funcionales de problemas de diseño con casos biológicos y tecnológicos relevantes
- Herramientas derivadas de TRIZ, como BioTRIZ, que usan matrices de contradicciones y principios inventivos extraídos de la biología para sugerir direcciones de solución de forma semiautomática.

4. Retos sociales

4.1. Retos sociales

Los retos sociales actuales, como la crisis climática, la escasez de agua, la contaminación y el alto consumo de materiales, exigen soluciones de ingeniería que reduzcan drásticamente el uso de recursos y los impactos ambientales (Sharma & Sarkar, 2019). La biomimesis ofrece respuestas al inspirarse en estrategias de eficiencia energética, gestión de recursos y resiliencia desarrolladas por los ecosistemas a lo largo de millones de años, lo que se traduce en tecnologías más eficientes y seguras para las personas

4.2. Mapeo ODS

La biomimesis se conecta de forma directa con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, al promover diseños que usan menos energía y materiales y favorecen ciclos de vida más limpios. En energía asequible y no contaminante (ODS 7) y acción por el clima (ODS 13), las soluciones bioinspiradas contribuyen a mejorar la eficiencia energética y a reducir emisiones; en ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11) y producción y consumo responsables (ODS 12), los edificios y productos inspirados en la naturaleza priorizan el uso local de recursos, la durabilidad y la reutilización. De este modo, la biomímesis ofrece una metodología de diseño que ayuda a alinear los proyectos de ingeniería con las metas globales de sostenibilidad definidas por la ONU (Naciones unidas, 2015).

4.3. Multidisciplinariedad

Aprovechar el potencial de la biomímesis frente a los retos sociales requiere equipos multidisciplinarios que integren biólogos, ingenieros, arquitectos, diseñadores y especialistas en sostenibilidad y ciencias sociales. Los biólogos aportan el conocimiento de los sistemas vivos, los ingenieros traducen los principios funcionales a tecnologías viables y los demás expertos evalúan impactos económicos, ambientales y

sociales, asegurando que las soluciones sean pertinentes para las comunidades. Esta colaboración cruzada no solo incrementa la creatividad y la calidad de las ideas, sino que también reduce el riesgo de desarrollar tecnologías desconectadas de las necesidades reales de la sociedad y del planeta (Vincent et al., 2006; Yeter et al., 2023).

5. Caso aplicable

5.1. Problema social

Un problema social relevante en el ámbito académico es la formación de ingenieros que todavía priorizan soluciones tecnológicas convencionales con alto consumo de recursos y baja integración de criterios de sostenibilidad, lo que dificulta responder a retos como el cambio climático o la pérdida de biodiversidad. En algunas escuelas de ingeniería la biomímesis aún no se incorpora de forma sistemática, por lo que los estudiantes tienen pocas oportunidades de desarrollar competencias para traducir estrategias biológicas en soluciones creativas y sostenibles (Sharma & Sarkar, 2019; Yeter et al., 2023).

5.2. Introducción al Caso: Olin

En el Olin College of Engineering (Estados Unidos), estudiantes de nivel superior aplicaron exitosamente una estructura biomimética ATOTA (Aplicación-Traducción- Observación- Traducción- Aplicación) durante un curso de 15 semanas en 2025. El proyecto se centró en resolver el desafío de las autopistas que fragmentan hábitats forestales en el noreste de EE.UU., donde hasta el 70% de los bosques restantes se encuentran a menos de 1000 km del borde, causando pérdida significativa de biodiversidad. Equipos de 4-5 estudiantes integraron perspectivas de estructura-función (SF) y condiciones conducidas a la vida (CCL), refinando prototipos desde literatura científica primaria hasta aplicaciones urbanas reales (Linder & Huang, 2025).

5.3. Aplicación de la espiral del diseño biomimético (6 pasos)

Los estudiantes siguieron una espiral biomimética adaptada de seis pasos principales, utilizando una tabla de tracking visual para gestionar iteraciones y variaciones(Linder & Huang, 2025):

1. Identificar: El problema- reducir la fragmentación causada por carreteras en bosques, estableciendo funciones como coexistencia pacífica y transporte no destructivo.
2. Biologizar: Preguntas específicas: ¿Cómo la naturaleza mueve grupos sin colisiones? y ¿Cómo proporciona recursos verticalmente en espacios limitados?
3. Buscar: Investigaron organismos relevantes como libélulas (visión 360°), lagartos anolis (partición de nichos verticales), aves en formación V y bancos de peces en escuela.
4. Abstractar: Extrajeron funciones y mecanismos biológicos combinando SF y CCL: línea lateral de peces para sensores de presión, ojos compuestos de libélulas para detección espacial, y partición vertical de recursos de anolis lizards.
5. Emular: diseño transferible "optimizar localmente", "usar forma para determinar funcionalidad" y "marcas universales de depredador" inspiradas en patrones de mariposas.
6. Evaluar: Desarrollaron prototipos iterativos como carreteras elevadas con tráfico en clusters (formación V de aves) y sistemas de sensores (línea lateral), refinando tres iteraciones mediante la tabla de tracking que visualizaba caminos abandonados.

5.4. Resultados

Los equipos de Olin College generaron prototipos biomiméticos viables que redujeron 70% la fragmentación de hábitats por carreteras elevadas (formación V aves) y sistemas sensores anti-colisión (ojos libélula), integrando creatividad multidisciplinaria en ingeniería. Así como, se generaron modelos biológicos a principios transferibles

como optimizar localmente, demostrando la biomímesis como metodología creativa y con un enfoque innovador que transforma desafíos urbanos en soluciones sostenibles escalables.

6. Conclusiones

La biomímesis constituye una metodología multidisciplinaria y catalizadora de creatividad en la ingeniería del diseño, evolucionando desde prácticas intuitivas históricas hacia procesos sistemáticos guiados por la espiral de 6 pasos y herramientas digitales. El caso Olin College valida su efectividad práctica, generando prototipos que reducen 70% la fragmentación de hábitats mediante integración de estructura-función (SF) y condiciones conducivas a la vida (CCL) . Esta aproximación redefine el rol académico del ingeniero como mediador entre biología y tecnología, alineando innovación con ODS 7, 11, 12 y 13 para enfrentar retos climáticos mediante economía circular y pensamiento sistémico. En definitiva, la inspiración biomimética transforma la ingeniería hacia modelos regenerativos sostenibles, posicionándose como herramienta esencial para la innovación del siglo XXI.

Se concluye que esta monografía no solo ofrece un enfoque académico riguroso, sino que también promueve la integración del conocimiento entre los profesionales y la comunidad. Este aspecto es crucial, dado que la interacción y el diálogo entre el profesional y la comunidad son fundamentales, puesto que las comunidades locales poseen un conocimiento intrínseco y profundo sobre su entorno y sus necesidades reales.

Solo a través de esta interacción bidireccional será posible generar soluciones y proyectos con verdaderas bases de sostenibilidad ecológica y social.

Referencias

- About Biomimicry Institute. (2025). *Biomimicry Institute*.
<https://biomimicry.org/about/>
- Alanbari, D. H. A., & Al, H. (2022). Biomimicry Design Spiral: Nature as A model. *Journal of Algebraic Statistics*, 13(2).
- Al-Masri, A., Abdulsalam, M., Hashaykeh, N., & Salama, W. (2025). Bio-mimicry in architecture: An explorative review of innovative solution toward sustainable buildings. *An-Najah University Journal for Research - A (Natural Sciences)*, 39(1), 39-46. <https://doi.org/10.35552/anu.r.a.39.1.2256>
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins Publishers Inc. https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2021/11/janine-m-benyus-biomimicry_innovation-inspired-by-nature-harper-perennial-2002-2.pdf
- Cabrero-Olmos, R., Calle-Sánchez, L., Rodríguez-García, B., & Victoria Sevilla-Lucio. (2021). La espiral biomimética inspiradora de retos actuales de diseño y soluciones sostenibles innovadoras. 1, 10.
<https://doi.org/10.25267/P56-IDJ.2021.i1.6>
- Davidson, C. I., Hendrickson, C. T., Matthews, H. S., Bridges, M. W., Allen, D. T., Murphy, C. F., Allenby, B. R., Crittenden, J. C., & Austin, S. (2010). Preparing future engineers for challenges of the 21st century: Sustainable engineering. *Journal of Cleaner Production*, 18(7), 698-701.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.021>
- Kennedy, E. B. (2017). Biomimicry: Design by Analogy to Biology. *Research-Technology Management*, 60(6), 51-56.
<https://doi.org/10.1080/08956308.2017.1373052>
- Linder, B., & Huang, J. (2025). A Design Process Framework and Tools for Teaching and Practicing Biomimicry. *Biomimetics*, 10(6), 376.
<https://doi.org/10.3390/biomimetics10060376>
- Mundekkad, D., & Mallya, A. R. (2025). Biomimicry at the nanoscale—A review of nanomaterials inspired by nature. *Nano Trends*, 10, 100119.
<https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025.100119>
- Naciones unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas – Desarrollo Sostenible.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

- Sá, A. A. M. D., & Viana, D. M. (2023). Design and Biomimicry: A Review of Interconnections and Creative Potentials. *Biomimetics*, 8(1), 61.
- Sharma, S., & Sarkar, P. (2019). Biomimicry: Exploring Research, Challenges, Gaps, and Tools. En A. Chakrabarti (Ed.), *Research into Design for a Connected World* (Vol. 134, pp. 87-97). Springer Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-5974-3_8
- Verbrugghe, N., Rubinacci, E., & Khan, A. Z. (2023). Biomimicry in Architecture: A Review of Definitions, Case Studies, and Design Methods. *Biomimetics*, 8(1), 107. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010107>
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A.-K. (2006). Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of The Royal Society Interface*, 3(9), 471-482. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>
- Yeter, I. H., Tan, V. S. Q., & Le Ferrand, H. (2023). Conceptualization of Biomimicry in Engineering Context among Undergraduate and High School Students: An International Interdisciplinary Exploration. *Biomimetics*, 8(1), 125. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010125>

Diseño digital e impresión 3D para una odontología más eficiente y accesible

Joaquín D. Sepúlveda Manrique

Màster en Disseny Avançat - Barcelona (UPC-UB)

Mireia Puig-Poch

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Resumen

La digitalización de los procesos clínicos y la incorporación de impresión 3D están redefiniendo los modelos de producción en odontología, especialmente en entornos públicos donde los recursos son limitados y la demanda de tratamientos personalizados es creciente. Esta monografía examina el potencial de la fabricación aditiva como estrategia para reducir costos, mejorar la eficiencia operativa y ampliar el acceso a dispositivos clínicos de precisión. A partir de una revisión comparativa de tecnologías como SLA, DLP, FDM, SLS/SLM y PolyJet, se analizan sus capacidades técnicas, los materiales disponibles y su viabilidad económica. Los resultados indican que la impresión 3D permite disminuir drásticamente los tiempos de fabricación, reducir el desperdicio de material y consolidar laboratorios internos que sustituyen modelos de externalización costosos. Asimismo, se evidencia que la adopción progresiva de equipos de bajo costo facilita un retorno de inversión temprano, mientras que la reducción de tiempos operatorios contribuye a una mayor sostenibilidad financiera del sistema. No obstante, su implementación requiere formación especializada y marcos regulatorios claros para garantizar calidad y seguridad. En conjunto, la impresión 3D emerge como un recurso estratégico para una odontología más accesible, eficiente y económicamente sostenible.

Palabras clave: Impresión 3D; odontología digital; fabricación aditiva; eficiencia económica; guías quirúrgicas, salud pública.

Abstract

The digitalization of clinical workflows and the integration of 3D printing are reshaping production models in dentistry, particularly in public healthcare settings where resources are limited and the demand for personalized

treatments is increasing. This monograph examines the potential of additive manufacturing as a strategy to reduce costs, improve operational efficiency, and expand access to high-precision clinical devices. Through a comparative review of technologies such as SLA, DLP, FDM, SLS/SLM, and Polyjet, the study analyses their technical capabilities, available materials, and economic feasibility. The findings indicate that 3D printing enables a substantial reduction in manufacturing lead times, minimizes material waste, and supports the consolidation of in-house laboratories that replace costly outsourcing models. Furthermore, the progressive adoption of low-cost equipment is shown to facilitate an early return on investment, while reduced operative times contribute to the overall financial sustainability of the system. Nevertheless, successful implementation requires specialized training and clearly defined regulatory frameworks to ensure quality and safety. Overall, 3D printing emerges as a strategic resource for a more accessible, efficient, and economically sustainable model of dentistry.

1. Introducció

En los hospitales públicos, los servicios odontológicos enfrentan limitaciones significativas relacionadas con la fabricación de piezas personalizadas, que suelen requerir procesos industriales lentos, costosos y centralizados (Haugli et al., 2024). Esto restringe el acceso a tratamientos de calidad, especialmente en contextos de bajo presupuesto o en zonas con escasa infraestructura técnica. A su vez, los modelos de producción tradicionales dificultan la adaptabilidad a la diversidad morfológica del paciente y elevan los costos operacionales a largo plazo. Las guías quirúrgicas restrictivas, aunque son dispositivos biomédicos indispensables, presentan un costo muy elevado (Henao et al., 2018). El mecanizado, aunque es el estándar alto en la producción, tiene inconvenientes como la alta pérdida de material (hasta un 90%) y un tiempo de producción prolongado (Reymus et al., 2020). Los modelos de producción tradicionales dificultan la adaptabilidad a la diversidad morfológica del paciente (Henao et al., 2018).

La convergencia entre tecnologías de fabricación digital (como la impresión 3D y el modelado CAD/CAM) y el acceso creciente a nuevos materiales ha abierto una vía para producir soluciones clínicas más rápidas, accesibles y eficientes (Khorsandi et al., 2021, Revilla-León & Özcan, 2019). Esta transformación ocurre en un momento donde se requiere aumentar la equidad en el sistema público de salud específico en odontología y cirugía maxilofacial y optimizar sus recursos (Ballard et al., 2020). Además, la posibilidad de generar piezas de media y baja demanda, con menor consumo energético y mayor adaptación al paciente, plantea un cambio de paradigma en la atención odontológica (Wilk et al., 2020).

La impresión 3D, como tecnología emergente en este campo, permite escalar soluciones de baja a alta complejidad, iniciando con dispositivos de uso provisional o modelos anatómicos, hasta llegar a implantes definitivos y estructuras quirúrgicas personalizadas. A diferencia de otros métodos, esta tecnología posibilita flujos de trabajo más sostenibles, mayor precisión en tiempos reducidos y menor desperdicio de material (Nada El Osta et al., 2025). Su implementación progresiva en clínicas y hospitales, incluso en regiones con restricciones presupuestarias, ha demostrado efectos positivos en la reducción de costos operacionales, tiempos clínicos y en la mejora de la experiencia del paciente (Kamio et al., 2018).

Por lo tanto, esta monografía tiene como propósito comparar los diferentes tipos de tecnologías de impresión 3D aplicadas en odontología quirúrgica, analizando sus capacidades técnicas, materiales empleados, costos asociados y evolución en la adopción institucional. Se busca identificar de qué manera estas herramientas permiten una implementación progresiva desde tecnologías de bajo costo hacia soluciones avanzadas, y cómo esto impacta la equidad, eficiencia y sostenibilidad en la salud bucodental pública.

2. Métodos de impresión 3D en odontología

El desarrollo de tecnologías de impresión 3D ha transformado la práctica odontológica al introducir procesos más rápidos, personalizables y económicamente viables. La fabricación aditiva en odontología permite producir dispositivos clínicos como modelos de estudio, guías quirúrgicas, férulas, prótesis dentales e incluso implantes personalizados. Cada técnica se caracteriza por sus propios métodos de curado o deposición, tipos de materiales, precisiones alcanzables y costos asociados, lo que determina su aplicabilidad clínica (Revilla-León & Özcan, 2019).

En odontología quirúrgica, las tecnologías más empleadas incluyen:

- **Estereolitografía (SLA):** Utiliza un láser UV para polimerizar una resina líquida capa por capa, generando piezas con gran detalle y acabado superficial liso. Es comúnmente usada para fabricar guías quirúrgicas, coronas temporales y modelos anatómicos, aunque requiere post-curado y tiene tiempos de impresión relativamente largos (Wilk et al., 2020).
- **Procesamiento Digital de Luz (DLP):** Similar a SLA, pero utiliza una fuente de luz que cura una capa completa a la vez, aumentando la velocidad. Es altamente utilizado en ortodoncia para alineadores, férulas y modelos dentales, y permite una mayor productividad sin comprometer la precisión (Henao et al., 2018).
- **Modelado por Deposición Fundida (FDM):** Esta técnica extruye filamento termoplástico (como PLA o PEEK) capa por capa. Aunque es menos precisa que SLA o DLP, es ampliamente utilizada para prototipado rápido y producción de férulas y modelos de planificación debido a su bajo costo y accesibilidad (Formlabs, 2025; Khorsandi et al., 2021).
- **Sinterizado y Fusión Selectiva por Láser (SLS/SLM):** Utilizadas para imprimir materiales en polvo (polímeros o metales), estas

técnicas permiten la fabricación de piezas definitivas de alta resistencia, como estructuras de implantes personalizados o marcos de prótesis maxilofaciales. Su principal limitación es el alto costo y la necesidad de equipamiento industrial especializado (Ballard et al., 2020; Formlabs, 2025; Reymus et al., 2020).

- **PolyJet:** Esta tecnología deposita microgotas de resina que se curan con luz UV, permitiendo impresiones multicolor y multimaterial. Aunque su uso se limita principalmente a modelos anatómicos realistas, ofrece una precisión excelente para planificación quirúrgica y entrenamiento (Revilla-León & Özcan, 2019; Wilk et al., 2020).
- **Bioimpresión y otras tecnologías emergentes:** Técnicas como el binder jetting o la bioimpresión láser están en desarrollo, permitiendo nuevas aplicaciones en ingeniería tisular y rehabilitación compleja. Aunque aún no están ampliamente disponibles en clínica, su potencial en regeneración ósea y fabricación de tejidos dentales funcionales es significativo (Khorsandi et al., 2021; Revilla-León & Özcan, 2019; Wilk et al., 2020).

Estas tecnologías no solo se diferencian en términos técnicos, sino también en su impacto clínico y social. Su adopción progresiva en entornos clínicos ha permitido una transición desde sistemas básicos de bajo costo hasta plataformas avanzadas, facilitando el acceso a tratamientos complejos incluso en sistemas de salud con recursos limitados (Ballard et al., 2020; Nada El Osta et al., 2025)). A continuación, En la tabla 1, se presenta una síntesis comparativa de estas tecnologías.

Materiales	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Impresora: SLA			

Resina fotopolimerizable biocompatible	Guías quirúrgicas, coronas, modelos	Muy alta precisión; superficie lisa; adecuada para prótesis y guías	Menor velocidad (láser puntual); costoso; requiere post-curado químico.
Impresora: FDM			
PLA, ABS, TPU PEEK (uso clínico)	Prototipado, férulas, guías provisionales	Bajo costo; fácil de usar; buen enlace entre capas; impresoras compactas.	Baja resolución superficial; anisotropía de capas; solo termoplásticos, alta porosidad para proliferación de bacteriana.
Impresora: SLS/SLM			
Nylon,titanio, CoCr	Implantes personalizados, estructuras metálicas	Puede producir piezas metálicas densas y de alta resistencia; sin soportes necesarios.	Máquinas muy caras y voluminosas; requiere infraestructura de seguridad (partículas); postprocesado complejo.
Impresora: PolyJet			
Resinas multimaterial, flexibles y rígidas	Modelos anatómicos, entrenamiento quirúrgico	Resolución extremadamente alta; multi-material; permite modelos en varios colores.	Equipos costosos; cabezales propensos a obstruirse; las piezas tienen resistencia mecánica limitada.
Impresora: Extrusión por Jeringa			

Hidrogeles, polímeros reabsorbibles,Siliconas	Ingeniería tisular, investigación regenerativa	Permite prótesis maxilofaciales y dispositivos con texturas y colores personalizados.	Piezas frágiles (baja resistencia mecánica); requiere post-curado químico/extensivo; aún en desarrollo.
---	--	---	---

Tabla 1. Comparativa entre tipos de impresión 3D. Fuente: Revilla-León & Özcan (2019), Wilk et al. (2020), Henao et al. (2018), Khorsandi et al. (2021), Ballard et al. (2020), Reymus et al. (2020) y Formlabs (s.f.).

3. Comparación de materiales y evolución

La impresión 3D ha expandido el repertorio de materiales dentales más allá del acrílico, la porcelana convencional y metálicos. Actualmente se emplean diversas categorías: polímeros, metales y cerámicos, cada uno con características particulares que determinan su aplicación clínica, costo, facilidad de impresión y durabilidad.

- **Polímeros tradicionales y avanzados:** Los acrílicos (como PMMA) y las resinas compuestas fotopolimerizables siguen siendo ampliamente usados en impresiones SLA y DLP para la fabricación de dentaduras, coronas provisionales y bases protésicas (Revilla-León & Özcan, 2019). Por ejemplo, el PMMA impreso exhibe resistencias promedio (~65 MPa), suficiente para usos temporales. En paralelo, materiales como PLA y ABS siguen siendo clave en prototipado de modelos mediante FDM, permitiendo simulaciones quirúrgicas accesibles a bajo costo (Wilk et al., 2020). Por otro lado, materiales avanzados como el PEEK (poliéter-éter-cetona), imprimible por FDM, ofrecen resistencia mecánica alta (~97 MPa) y biocompatibilidad, siendo útiles en armazones implantosoportados. No obstante, su elevado costo y requerimiento de impresoras especializadas limita su implementación masiva (Khorsandi et al., 2021).

- **Metales en odontología impresa:** Tecnologías SLS y SLM permiten trabajar con aleaciones como Ti-6Al-4V y CoCr, comunes en implantes y estructuras de alta resistencia. El titanio impreso puede alcanzar resistencias superiores a 1000 MPa, mientras que el CoCr ofrece gran rigidez y durabilidad (Ballard et al., 2020; Reymus et al., 2020). Si bien estos materiales permiten la producción de piezas definitivas, su precio (100–200 USD/kg) y exigencias regulatorias limitan su adopción en sistemas públicos.
- **Cerámicas avanzadas:** El desarrollo de técnicas de impresión cerámica, especialmente mediante tecnologías DLP, ha permitido fabricar estructuras con óxido de circonio (zirconia) estabilizado con itria (3Y-TZP), utilizadas en coronas definitivas y puentes. Este material posee un módulo elástico de ~210 GPa y resistencia a la flexión que supera los 1000 MPa, características comparables a las piezas fresadas (Eugenia et al., 2018). A pesar de sus ventajas mecánicas y estéticas, el proceso aún presenta limitaciones de contracción durante la sinterización, afectando su precisión final.
- **Materiales emergentes, especificaciones adicionales:** La incorporación de nuevos materiales en la impresión 3D dental ha permitido el uso de siliconas médicas, como el polivinilsiloxano, en impresoras de inyección de material para la fabricación de dispositivos elásticos, modelos gingivales y férulas resistentes a la degradación bacteriana (Khorsandi et al., 2021; Revilla-León & Özcan, 2019; Wilk et al., 2020). Paralelamente, en el sector de la bioimpresión, se emplean impresoras de extrusión modificadas con materiales como colágeno y mezclas de hidrogel-alginato para facilitar la regeneración ósea y periodontal (Henao et al., 2018). Estas tecnologías emergentes diversifican las opciones terapéuticas, facilitando su adaptación a las limitaciones presupuestarias y normativas de los servicios de salud (Khorsandi et al., 2021).

Esta diversidad de materiales no solo amplía el abanico de soluciones terapéuticas, sino que también permite adaptar la fabricación digital a diferentes presupuestos, demandas clínicas y capacidades técnicas, desde la planificación quirúrgica hasta la fabricación de dispositivos definitivos.

4. Impacto clínico, económico y social de la impresión 3D

La impresión 3D ha transformado significativamente la odontología quirúrgica y la cirugía maxilofacial al permitir la producción rápida y precisa de dispositivos personalizados como guías quirúrgicas, férulas, modelos anatómicos y prótesis (Khorsandi et al., 2021; Revilla-León & Özcan, 2019). Esta tecnología mejora la eficiencia clínica, reduce los costos operativos y favorece un enfoque centrado en el paciente (Ballard et al., 2020; Khorsandi et al., 2021). En algunos contextos, como hospitales de Suecia, se ha reportado una adopción clínica del 78.57% en Cirugía Oral y Maxilofacial, reflejando su integración como herramienta establecida (Zheng et al., 2024).

Las aplicaciones más frecuentes incluyen la planificación quirúrgica y la colocación guiada de implantes (Henao et al., 2018; Zheng et al., 2023). Tecnologías como SLA y DLP permiten precisiones de hasta 50 µm, lo que garantiza exactitud en procedimientos críticos (Khorsandi et al., 2021; Revilla-León & Özcan, 2019). Incluso métodos de bajo costo como FDM, utilizando datos DICOM, han demostrado errores dimensionales inferiores al 0.5%, con costos de producción menores a \$50 USD por modelo (Ikponmwosa et al., 2022; Khorsandi et al., 2021). Además, el uso de guías y modelos impresos puede ahorrar hasta 62 minutos por procedimiento, reduciendo tiempos operatorios y postoperatorios (Ballard et al., 2020).

Desde el punto de vista económico, la reducción de costos ha sido clave en su expansión (Ballard et al., 2020). Existen impresoras FDM desde \$200 USD y equipos SLA/DLP entre \$200 y \$1,000 USD

(Formlabs, n.d.; Khorsandi et al., 2021). Las resinas fotopolimerizables cuestan entre \$79 y \$250 USD/L (Formlabs, 2025.; Khorsandi et al., 2021). Esto ha hecho posible la creación de laboratorios internos de impresión, que permiten a las instituciones diseñar y fabricar dispositivos de manera autónoma (Kamio et al., 2018; Khorsandi et al., 2021). Estudios indican que el ahorro en el quirófano puede llegar a \$3,844 USD por caso (Ballard et al., 2020), y que se alcanza el punto de equilibrio financiero al fabricar unas 63 guías o modelos por año (Ballard et al., 2020).

El mercado de la impresión 3D en salud proyecta alcanzar los 13.614 millones de USD en 2033, con un crecimiento anual compuesto del 17.83%. Este avance está impulsado por la innovación en materiales y la integración entre biotecnología e ingeniería (GlobalGrowthInsights, 2025). Las principales tendencias incluyen la bioimpresión 3D y la medicina regenerativa, con el 26% de las instituciones enfocadas en imprimir tejidos y modelos celulares para ensayos clínicos (Globalgrowthinsight, 2025). La impresión 4D, que emplea polímeros con memoria de forma, apunta a revolucionar campos como la endodoncia y las prótesis removibles por su capacidad de adaptación dinámica a los tejidos (Khorsandi et al., 2021).

Además, más del 34% de los implantes ortopédicos recientes ya emplean aleaciones fabricadas con láser, mejorando resistencia y precisión (GlobalGrowthInsights, 2025). Se prevé que la automatización de procesos, mediante inteligencia artificial y aprendizaje profundo, optimice la segmentación de imágenes médicas y los flujos de trabajo clínicos (Khorsandi et al., 2021; Badrigilan et al., 2021; Zheng et al., 2024). Sin embargo, la expansión enfrenta barreras importantes: el alto costo de los materiales (38%) , los tiempos prolongados de aprobación regulatoria (29%) y la escasez de personal especializado (42%) siguen siendo desafíos críticos para una implementación masiva (GlobalGrowthInsights, 2025).

5. Discusión

La revisión de tecnologías, materiales y aplicaciones revela que la impresión 3D en odontología no solo constituye una alternativa técnica eficiente, sino también un vector de transformación en los modelos de atención clínica. La literatura muestra consistentemente que los flujos digitales producen mejoras tangibles en precisión, tiempos quirúrgicos y costos. Sin embargo, esta adopción no es homogénea y depende fuertemente de factores estructurales: disponibilidad de equipos, capacitación, validación regulatoria y cultura institucional.

Un aspecto crítico emergente es la brecha entre la capacidad tecnológica y su integración real en los sistemas de salud, especialmente los públicos. Aunque las impresoras FDM o SLA de bajo costo muestran resultados clínicamente aceptables, las instituciones suelen mantener modelos centralizados de producción o externalización, que reproducen las mismas limitaciones económicas que dieron origen al problema. Esto evidencia que la innovación tecnológica, por sí sola, no garantiza la democratización del acceso; debe ir acompañada de cambios organizacionales y de un enfoque formativo que capacite a los equipos clínicos para incorporar estas herramientas en su práctica cotidiana.

Otro punto relevante es la tensión entre precisión versus accesibilidad. Las tecnologías industriales como SLM ofrecen resultados excepcionales para implantes metálicos, pero su costo las hace inviables para hospitales pequeños o centros de atención primaria. Por otra parte, tecnologías emergentes como la bioimpresión permiten imaginar un horizonte donde la regeneración tisular personalizada sea parte del tratamiento estándar, pero actualmente siguen fuera del alcance clínico. Esta distancia entre el potencial futuro y las limitaciones presentes obliga a pensar en un modelo progresivo de

adopció, donde cada institució incorpore tecnologies acordes a su capacidad operativa.

La posibilidad de fabricar dispositivos in situ reduce la dependencia de proveedores externos y abre la puerta a nuevas formas de soberanía tecnológica en salud. Sin embargo, también genera preguntas éticas: ¿quién valida la calidad?, ¿cómo evitar desigualdades entre centros?, ¿qué competencias debe tener el personal?, ¿cómo se gestiona la responsabilidad en caso de falla?

6. Conclusiones

La impresión 3D se ha consolidado como una herramienta clave para la odontología quirúrgica, al mejorar la precisión de los procedimientos, reducir costos y facilitar el acceso a tratamientos personalizados. Su capacidad para producir modelos y dispositivos adaptados a cada paciente amplía de manera significativa las opciones clínicas disponibles. Sin embargo, su impacto real depende de factores como la formación del personal, el apoyo institucional y la existencia de regulaciones adecuadas que permitan su integración segura y eficiente. Un proceso de adopción gradual permite que distintos tipos de instituciones incorporen estas tecnologías según sus recursos, fortaleciendo su autonomía y disminuyendo la dependencia de proveedores externos. En conjunto, la impresión 3D no solo transforma la práctica clínica, sino que redefine la relación entre diseño, tecnología y salud pública, otorgando al diseñador un rol central en la creación de sistemas más equitativos, sostenibles y orientados al usuario.

Referencias

- Ballard, D. H., Mills, P., Duszak, R., Weisman, J. A., Rybicki, F. J., & Woodard, P. K. (2020). Medical 3D Printing Cost-Savings in Orthopedic and Maxillofacial Surgery: Cost Analysis of Operating Room Time Saved with 3D Printed Anatomic Models and Surgical Guides. *Academic Radiology*, 27(8), 1103–1113. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.08.011>
- Eugenia, V., Ruiz, G., Fargas, G., Co-Director, R., Josep, J., & Rovira, R. (n.d.). *Impresión 3D de Materiales cerámicos base circona con diferentes contenidos de ITRIA*.
- Formlabs. (2025). *How Much Does a 3D Printer Cost?* | Formlabs. <https://formlabs.com/blog/how-to-calculate-3d-printer-cost/?srsltid=AfmBOooyxpKrRxspNf8Xj0WsPptlcxsmkaPTTmlgyriuFrDGSeHKdW->
- Globalgrowthinsight. (2025). *Tamaño, tendencias e investigación de la atención médica de impresión 3D 2025-2033*. <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/3d-printing-healthcare-market-114325>
- Haugli, K. H., Alkarra, D., & Samuelsen, J. T. (2024). Digital manufacturing techniques and the in vitro biocompatibility of acrylic-based occlusal device materials. *Clinical Oral Investigations*, 28(6). <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05707-1>
- Henao, J., Ramos, J. S., Valencia, C. H., Adamms, I., Rico, C. A., Escandón, J. M., & Echeverri-Cárdenas, D. (2018). Elaboración de un nuevo tipo de guías quirúrgicas para implantes dentales mediante impresión 3D. *Informador Técnico*, 82(1), 78. <https://doi.org/10.23850/22565035.1005>
- Ikponmwosa, M., Ogunsemoyin, A. O., Moemenan, O. O., Ezeigwe, O., & Darko, Y. B. (2022). 3D Printing in Medicine; Application in Intracranial Tumours in Southern Nigeria. *Journal of Advances in Medicine and Medical Research*, 354–364. <https://doi.org/10.9734/jammr/2022/v34i224823>
- Khorsandi, D., Fahimipour, A., Abasian, P., Saber, S. S., Seyedi, M., Ghanavati, S., Ahmad, A., De Stephanis, A. A. et al. (2021). 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. In *Acta Biomaterialia* (Vol. 122, pp. 26–49). Acta Materialia Inc. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.12.044>
- Nada El Osta, D. Ms. P. H., Marion Bessadet, D. Ms. P., Noémie Drancourt, D. Ms., & Cindy Batisse, D. Ms. P. (2025). Time efficiency and cost of fabricating removable complete dentures using digital, hybrid, and conventional workflows: A systematic review.

- Revilla-León, M., & Özcan, M. (2019). Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. In *Journal of Prosthodontics*, 28(2), 146–158. Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/jopr.12801>
- Reymus, M., Fabritius, R., Keßler, A., Hickel, R., Edelhoff, D., & Stawarczyk, B. (2020). Fracture load of 3D-printed fixed dental prostheses compared with milled and conventionally fabricated ones: the impact of resin material, build direction, post-curing, and artificial aging—an in vitro study. *Clinical Oral Investigations*, 24(2), 701–710. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02952-7>
- Wilk, R., Likus, W., Hudecki, A., Syguła, M., Różycka-Nechoritis, A., & Nechoritis, K. (2020). What would you like to print? Students' opinions on the use of 3D printing technology in medicine. *PLoS ONE*, 15(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230851>
- Zheng, X., Wang, R., Brantnell, A., & Thor, A. (2024). Adoption of additive manufacturing in oral and maxillofacial surgery among university and non-university hospitals in Sweden: findings from a nationwide survey. *Oral and Maxillofacial Surgery*, 28(1), 337–343. <https://doi.org/10.1007/s10006-023-01147-5>

Guies quirúrgiques personalitzades: Estat de l'art i revisió exploratòria

David Manzanares Rebull

Màster en Disseny Avançat - Barcelona (UPC-UB)

Mireia Puig-Poch

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Resum

Aquesta monografia presenta una revisió bibliogràfica sobre les guies quirúrgiques personalitzades (GQP), una tecnologia emergent que està redefinint la precisió en diverses especialitats mèdiques. El treball analitza l'evolució d'aquests instruments, des dels seus orígens conceptuals fins a la seva actual implementació, destacant la convergència de la imatge mèdica tridimensional (TC, RM), el disseny assistit per ordinador (CAD) i la fabricació additiva (impressió 3D) com a pilars fonamentals. S'han explorat les principals aplicacions clíniques de les GQP en àrees com la implantologia dental, la cirurgia maxil·lofacial, les artroplasties de genoll i l'oncologia òssia, evidenciant els seus significatius beneficis. Aquests inclouen una millora substancial en l'alineació i la precisió quirúrgica, una reducció del temps operatiu i de l'estada hospitalària, i una optimització de la corba d'aprenentatge del cirurgià. Tot i reconèixer desafiaments com el risc de desviacions i la inversió tecnològica inicial, la monografia subratlla el prometedor futur de les GQP. La investigació i desenvolupament constants seran crucials per maximitzar el seu impacte.

Abstract

This monograph presents a bibliographic review of patient-specific surgical guides (PSSGs), an emerging technology that is redefining precision across multiple medical specialties. The study analyses the evolution of these instruments from their conceptual origins to their current clinical implementation, highlighting the convergence of three-dimensional medical imaging (CT, MRI), computer-aided design (CAD), and additive manufacturing (3D printing) as their fundamental pillars. The main clinical applications of PSSGs are explored in areas such as dental implantology, maxillofacial surgery, knee arthroplasty, and bone oncology, demonstrating their significant benefits.

These include substantial improvements in surgical alignment and accuracy, reductions in operative time and hospital length of stay, and optimization of the surgeon's learning curve. While acknowledging challenges such as the risk of deviations and the initial technological investment required, the monograph emphasizes the promising future of PSSGs. Ongoing research and development will be crucial to maximize their impact.

1. Introducció

Les guies quirúrgiques són una tecnologia comunament utilitzada per a operacions quirúrgiques específiques. Aquests instruments no queden exempts de l'aplicació de noves tecnologies en l'àmbit mèdic, generant un auge evident en la utilització de guies quirúrgiques personalitzades. Aquest útil, innovador en alguns àmbits mèdics, combina diverses d'aquestes noves eines, entre elles sistemes d'escàner, tractament d'imatge mèdica, disseny assistit per ordinador (CAD), simulacions i anàlisis (FEM) i impressió en tres dimensions.

Aquest manuscrit té com a propòsit oferir una perspectiva profunda de l'aplicabilitat de les guies quirúrgiques personalitzades, arran de la necessitat de sistemes de precisió operatoris específics i una recopilació analítica dels casos d'èxit i resultats obtinguts a través de la seva implementació.

2. Metodologia

Per al desenvolupament d'aquesta monografia s'ha dut a terme una revisió bibliogràfica per a la cerca d'articles acadèmics, fent ús de les bases de dades Scopus i Google Scholar de manera més global, i PubMed de caire més específic a l'àmbit del focus de recerca.

L'estratègia de cerca aplicada inclou "surgical and guides" i "surgical and planning", obtenint un ampli resultat d'articles. A partir d'aquí, s'aplica 3 criteris per escollir els articles estudiats en aquest manuscrit,

en primer lloc, buscant els més rellevants per nombre de citacions, ordenant per data. Paral·lelament, incorporant “evolution OR history” a la cerca. Per altra banda, afegint el terme “accuracy” i restringint l'anàlisi de casos d'èxit a aquells publicats amb una representació quantitativa o comparativa dels resultats obtinguts, per tal d'aportar valor a través de la informació en aquest document, i que la validesa de les conclusions extretes, sigui d'aplicabilitat actual.

3. Procés de fabricació i flux de treball

3.1. Adquisició de dades

La fase inicial i per a la creació de qualsevol guia quirúrgica personalitzada és l'adquisició de dades anatòmiques del pacient. Aquesta informació s'obté principalment mitjançant tècniques d'imatge mèdica avançades que proporcionen una representació detallada i tridimensional de la zona d'interès.

Les modalitats més emprades són la Tomografia Computeritzada (TC) i la Ressonància Magnètica (RM). La TC destaca per una excel·lent resolució espacial en estructures òssies, ideal per planificació en cirurgia ortopèdica, maxil·lofacial i dental, on la precisió en el teixit dur és crítica (Jacobs et al., 1999). Per la seva banda, la RM ofereix una superior resolució de contrast en teixits tous, fent-la valuosa en casos on la relació de la guia amb estructures musculars, nervioses o vasculars és essencial. Aquestes imatges mèdiques es generen en format DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), un estàndard que permet interoperabilitat i processament posterior de les dades.

3.2. Segmentació i reconstrucció 3D

Un cop adquirides les dades en format DICOM, la següent fase consisteix en el seu processament per crear un model 3D de l'anatomia rellevant del pacient (Yilmaz et al., 2019). Aquest procés es

duu a terme mitjançant programari especialitzat de planificació quirúrgica i processament d'imatges mèdiques, Materialise (Mimics, 3-matic, Magics) o 3DSlicer.

La segmentació és l'etapa en la qual les estructures anatòmiques d'interès (com ara ossos, dents, nervis o àrees patològiques) són delimitades de manera precisa a partir de la biblioteca adquirida d'imatges bidimensionals. Això es realitza mitjançant tècniques de processament d'imatge que identifiquen diferències en la intensitat dels píxels o vòxels, permetent aïllar les estructures desitjades. El resultat d'aquesta segmentació és la creació de màscares o regions d'interès que representen l'anatomia en qüestió (Jacobs et al., 1999).

Posteriorment, aquestes regions segmentades es sotmeten a un procés de reconstrucció 3D. El programari genera una representació tridimensional de les estructures anatòmiques, sovint en format de superfície de malla (com ara arxius STL). Aquests models 3D digitals són una rèplica virtual fidedigna de l'anatomia del pacient, sobre la qual el cirurgià i l'enginyer podran planificar la intervenció quirúrgica amb precisió i dissenyar la guia amb un ajust òptim (Jacobs et al., 1999).

3.3. Modelatge i disseny CAD

Seguidament es du a terme el disseny de les guies quirúrgiques en base al model que s'ha obtingut del procés anterior de segmentació i reconstrucció 3D de les dades anatòmiques del pacient. A l'hora d'abordar aquest disseny cal valorar el software CAD a utilitzar, els materials a escollir, així com el procés de fabricació i la pròpia naturalesa de l'objecte i configuració escollida en funció de les característiques de l'operació i del model segmentat.

El software de disseny assistit per ordinador a escollir necessita suportar arxius .stl per treballar amb el 3D generat de la segmentació i reconstrucció. Addicionalment, requereix de mòduls d'anàlisi

d'elements finits i mallatge precís, així com d'exportació per a fabricació additiva. Aquell programari amb el que el dissenyador se senti més còmode i tingui més experiència, d'entre els que compleixen els requeriments generals especificats i els que puguin sorgir de cada cas particular, es modelarà la guia quirúrgica personalitzada (Laurent, 2016). Entre aquests softwares compatibles es troben Catia, SolidWorks, Siemens NX, SolidEdge, Geomagic Freeform, o plataformes de codi obert com Blender (amb complements mèdics) i FreeCAD.

Posteriorment cal tenir en compte les consideracions de disseny. Una guia quirúrgica es basa en la unió de dos components essencials: els cilindres de guia i la superfície de contacte. Aquesta darrera s'ajusta de manera precisa a una estructura anatòmica específica del pacient, ja sigui sobre un element de les genives, les dents, ossos, mucoses o teixits. Els cilindres, inserits dins de la guia, són crítics per transferir el pla quirúrgic amb exactitud, ja que orienten la fresa en la ubicació i direcció precises durant la intervenció (Ramasamy et al., 2013).

3.4. Fabricació

La darrera etapa del procés és la fabricació de la guia dissenyada digitalment, una tasca que ha fet possible la impressió 3D o fabricació additiva (Yilmaz et al., 2019). Aquesta tecnologia permet la creació de la guia capa a capa, directament a partir del model 3D digital (arxiu STL).

Les tecnologies d'impressió 3D més comunes emprades en l'àmbit mèdic inclouen la estereolitografia (SLA), la qual utilitza un làser per solidificar una resina líquida fotosensible, i la Modelatge per Deposició Fusonada (FDM), que extrueix un filament termoplàstic. Altres tècniques com la sinterització selectiva per làser (SLS) també poden ser aplicades. L'elecció de la tecnologia i del material depèn dels requisits de precisió, resistència mecànica, biocompatibilitat i mètodes

d'esterilització necessaris per a cada aplicació específica (Ramasamy et al., 2013).

Una vegada impresa, la guia se sotmet a un post-processament que pot incloure la neteja per eliminar el material de suport, el curat addicional (en el cas de resines), i un rigorós control de qualitat per verificar les seves dimensions i l'absència de defectes. Finalment, la guia es sotmet a un procés d'esterilització adequat al seu material, preparant-la per al seu ús segur en el quiròfan. Aquest enfocament personalitzat i la capacitat de producció eficient de la impressió 3D han estat claus en l'àmplia adopció de les guies quirúrgiques.

4. Aplicacions clíniques

Els articles analitzats, han proporcionat una sèrie de casos d'estudi i aplicació d'aquesta nova tecnologia i metodologia d'ús d'instrumentació operatòria. A continuació, es detallen les principals àrees quirúrgiques on han demostrat un impacte significatiu.

4.1. Cirurgia d'Implantologia Dental i Maxil·lofacial

L'àmbit dental i maxil·lofacial ha estat pioner en la implementació de guies quirúrgiques personalitzades, principalment per la inherent complexitat anatòmica de la regió i la demanda de precisió mil·limètrica en procediments com la col·locació d'implants dentals (Sarment et al., 2003). Estudis primerencs (2003), van establir la fiabilitat de les guies estereolitogràfiques derivades de tomografies computeritzades per a la col·locació d'implants. Aquests treballs inicials ja evidencien una millora en la precisió, reduint les desviacions respecte a la planificació preoperatòria. Investigacions més recents han consolidat aquesta evidència comparant la precisió de la cirurgia guiada amb la tècnica a mà alçada, confirmant la superioritat de les guies digitals en l'exactitud de la col·locació d'implants (Dutta et al., 2025). A més, aquestes guies s'han estès a altres intervencions maxil·lofacials complexes, com ara

osteotomies correctives o la reducció de la malarplastia, on la planificació assistida per ordinador i les guies específiques han demostrat millorar la simetria i els resultats estètics (Kang et al., 2022).

4.2. Artroplasties i Cirurgia Ortopèdica Major

En ortopèdia, les guies personalitzades han trobat una aplicació destacada en les artroplasties, particularment en la substitució total de genoll (TKA) i la unicompartimental (UKA) (Gauci, 2022). Aquestes guies permeten una alineació més precisa dels components protètics i una major exactitud en els talls ossis (Gauci, 2022). Els estudis realitzen assajos controlats randomitzats que comparen les guies de tall personalitzades amb la instrumentació convencional en TKA, mostrant resultats favorables en l'alineació. (2014) també han reportat una millora significativa en l'alineació de l'eix mecànic i una eficiència superior en el temps de quiròfan amb l'ús d'instrumentació específica per al pacient. Tanmateix, cal reconèixer que la literatura no és unànime, i alguns estudis, com el de (2014), han qüestionat si les guies personalitzades sempre resulten en una major exactitud en TKA, subratllant la necessitat d'una anàlisi crítica i exhaustiva dels resultats.

4.3. Cirurgia Oncològica Òssia i Reconstructiva

La precisió és un factor crític en la resecció de tumors ossis, on la conservació de teixit sa i l'obtenció de marges lliures de tumor són primordials. Les guies quirúrgiques personalitzades permeten als cirurgians planificar amb exactitud els límits de la resecció, assegurant que el tumor s'extirpi completament minimitzant el dany a estructures adjacents (Khan et al., 2013). A més, en cirurgia reconstructiva complexa, com les reconstruccions de mandíbula amb penjolls lliures de peroné, l'ús de disseny assistit per ordinador i models prototipats ràpids ha demostrat millorar significativament la precisió volumètrica en comparació amb les plaques de reconstrucció estàndard, optimitzant l'ajust i la funció (Hanasono & Skoracki, 2013).

4.4. Cirurgia Espinal

L'alta complexitat anatòmica de la columna vertebral i el risc de lesions neurològiques fan de la precisió en la col·locació de dispositius, com els cargols pediculars, un aspecte fonamental. Així doncs, les guies de perforació personalitzades han emergit com una eina valuosa, especialment en pacients amb deformitats espinals severes. Estudis han demostrat que l'ús d'aquestes guies, impreses en 3D, pot millorar la precisió de la col·locació dels cargols pediculars en comparació amb les tècniques a mà alçada, reduint la taxa de malposicionament i, per tant, el risc de complicacions (Pan et al., 2018).

5. Beneficis i avantatges

5.1. Millora de l'alineació

Primerament, l'ús de guies quirúrgiques aporta una millora significativa en termes d'alineació respecte a altres tècniques tradicionals (Renson et al., 2014). Diversos estudis han exposat de manera explícita una reducció clara en la desalineació de l'eix mecànic quan s'empren guies específiques per al pacient en comparació amb la cirurgia convencional i la cirurgia assistida per ordinador (Renson et al., 2014). Ara bé, cal matisar que la literatura no és unànime en aquest aspecte, existeixen informes que qüestionen aquesta millora, indicant que l'ús de guies personalitzades no sempre comporta una major exactitud en artroplàstia de genoll per exemple (Victor et al., 2014).

5.2. Reducció del temps operatiu i de l'estada hospitalària

Un altre aspecte que s'ha plantejat com a avantatge potencial és la reducció del temps quirúrgic i de l'estada hospitalària. Diversos estudis han reportat una disminució clara d'aquests paràmetres quan s'utilitza instrumentació específica per al pacient en comparació amb la tècnica convencional i la cirurgia assistida per ordinador (Renson et al., 2014). Podem determinar que el temps operatiu mitjà és significativament inferior, l'estudi de (2013) mostra com milloren els resultats en el grup

de pacients en què el procediment es va realitzar amb l'ajuda de CAD i RPM, en comparació amb el grup control amb defecte coincident ($8,8 \pm 1,0$ hores vs. $10,5 \pm 1,4$ hores) ($P=0,0006$). En el cas d'operació espinal, també s'ha afirmat que l'ús de GQP per al pacient comporta una millora en el temps operatiu en comparació amb la tècnica a mà alçada (Pan et al., 2018).

5.3. Corba d'aprenentatge

Complementàriament, es podria suggerir que les guies quirúrgiques redueixen la corba d'aprenentatge en comparació amb la cirurgia assistida per ordinador i les tècniques tradicionals. En aquest sentit, (2015) es va dur a terme un estudi amb 86 pacients sotmesos a artroplàstia total de genoll, en aquest cas, utilitzant guies personalitzades, concloent que hi havia una diferència significativa en la corba d'aprenentatge a favor d'aquestes, sense diferències rellevants en l'alineació postoperatòria entre grups. Tot i així, altres autors adverteixen que aquestes guies no s'han de considerar una eina que garanteixi resultats òptims per a cirurgians poc experimentats, atès que la literatura mostra resultats mixtos i que el procés exigeix diversos passos de precisió per assolir una exactitud real (Chinnappa et al., 2015).

5.4. Simplicitat de la tècnica

Finalment, s'ha hipotetitzat que l'ús de guies quirúrgiques comporta una major simplicitat operatòria i una reducció significativa de l'inventari necessari a la sala d'operacions. (2014) van evidenciar una disminució notable en el nombre de safates utilitzades (fins a un 55% menys) en comparació amb la tècnica convencional. Aquesta reducció no només té implicacions logístiques, sinó també econòmiques, una disminució dels costos associats a la manipulació, esterilització i manteniment del material quirúrgic.

6. Limitacions, futures perspectives i recerca

Malgrat els innegables avantatges que presenten les GQP, la seva implementació no està exempta de desafiaments i limitacions que cal abordar per optimitzar-ne l'ús i expandir-ne l'aplicabilitat. Un dels aspectes crucials és el risc de desviacions en la precisió, el qual pot sorgir en qualsevol etapa del flux de treball (Victor et al., 2014). La compressibilitat dels teixits tous o un ajust imperfecte de la guia poden introduir errors que comprometin el resultat final.

Addicionalment, encara que les guies poden optimitzar el temps quirúrgic i l'ús d'instrumental, la inversió inicial en la infraestructura necessària (programari avançat, impressores 3D i formació especialitzada) pot ser considerable, limitant-ne l'accés a centres amb recursos més limitats.

El camp de les guies quirúrgiques personalitzades es troba en una fase de ràpida evolució, amb un considerable potencial per a futures millores i innovacions. La recerca se centra en l'optimització contínua de la precisió mitjançant la millora dels algorismes de segmentació, els dissenys de les guies i els materials d'impressió 3D. Es preveu una major integració amb tecnologies emergents com la realitat augmentada (RA) i la realitat virtual (RV), que podrien oferir una visualització i interacció intraoperatòria millorades, així com amb la intel·ligència artificial (IA) per a optimitzar el disseny, predir resultats i automatitzar part del procés de planificació (Pagan et al., 2024).

El desenvolupament de nous materials biocompatibles amb propietats mecàniques i funcionals superiors, o la integració de sensors directament a les guies, en són altres possibilitats. A més, l'expansió de les aplicacions a noves especialitats quirúrgiques menys explorades i la realització de més estudis d'eficàcia i cost-efectivitat a gran escala i a llarg termini seran crucials per consolidar el paper d'aquesta tecnologia com a estàndard assistencial en la medicina moderna.

7. Conclusions

Una vegada explorat en profunditat el panorama de les guies quirúrgiques personalitzades, es pot concloure la seva consolidació com una tecnologia transformadora en l'àmbit mèdic. S'ha constatat com l'evolució des dels conceptes inicials, impulsada per la conjunció de la imatge mèdica 3D, el disseny assistit per ordinador (CAD) i la impressió 3D, ha permès la creació d'instruments de precisió prometedors.

L'anàlisi de les diverses aplicacions clíniques, ha subratllat els seus beneficis substancials. Tal com indiquen els articles analitzats, destaquen particularment la millora en la precisió i l'alineació de les intervencions, la reducció significativa del temps operatiu i de l'estada hospitalària, i una optimització de la corba d'aprenentatge.

Tanmateix, també cal tenir en compte els desafiaments i limitacions inherents a aquesta tecnologia, com ara el risc de desviacions sobre teixit tou, la inversió inicial requerida i la necessitat contínua de validar els resultats a llarg termini. Aquests reptes, lluny de minvar el seu potencial, configuren el camí per a la recerca i el desenvolupament futurs. La integració amb la realitat augmentada, la intel·ligència artificial i l'exploració de nous materials podrien expandir encara més les seves capacitats i el seu abast, consolidant les guies quirúrgiques personalitzades com una eina indispensable per a la medicina de precisió del futur.

Referències

Chinnappa, J., Chen, D. B., Harris, I. A., & MacDessi, S. J. (2015). Total knee arthroplasty using patient-specific guides: Is there a learning curve? *The Knee*, 22(6), 613–617. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2015.03.002>

- Dutta, D., Mohanty, A. K., Raut, A., Pal, D., Mahato, M., Jain, A., & Sarkar, D. F. (2025). Comparison of Accuracy of Dental Implant Placement Between Freehand and Guided Implant Surgery-A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Maxillofacial Surgery*, 24(4), 865–876. <https://doi.org/10.1007/s12663-025-02579-0>
- Gauci, M.-O. (2022). Patient-specific guides in orthopedic surgery. *Orthopaedics & Traumatology, Surgery & Research: OTSR*, 108(1S), 103154. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.103154>
- Hanasono, M. M., & Skoracki, R. J. (2013). Computer-assisted design and rapid prototype modeling in microvascular mandible reconstruction. *The Laryngoscope*, 123(3), 597–604. <https://doi.org/10.1002/lary.23717>
- Jacobs, R., Adriansens, A., Verstreken, K., Suetens, P., & van Steenberghe, D. (1999). Predictability of a three-dimensional planning system for oral implant surgery. *Dento Maxillo Facial Radiology*, 28(2), 105–111. <https://doi.org/10.1038/sj/dmfr/4600419>
- Kang, S.-H., Tak, H.-J., Kim, H.-J., & Lee, S.-H. (2022). Reduction malarplasty using a simulated surgical guide for asymmetric/prominent zygoma. *Head & Face Medicine*, 18(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s13005-022-00314-5>
- Khan, F. A., Lipman, J. D., Pearle, A. D., Boland, P. J., & Healey, J. H. (2013). Surgical technique: Computer-generated custom jigs improve accuracy of wide resection of bone tumors. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 471(6), 2007–2016. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2769-6>
- Laurent, P. (2016). Patient-Specific Instruments in Orthopedics. In L. E. Ritacco, F. E. Milano, & E. Chao (Eds.), *Computer-Assisted Musculoskeletal Surgery: Thinking and Executing in 3D* (pp. 163–179). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12943-3_13
- Pagan, C. A., Karasavvidis, T., Cohen-Rosenblum, A. R., Hannon, C. P., Lombardi, A. V., & Vigdorchik, J. M. (2024). Technology in Total Knee Arthroplasty in 2023. *The Journal of Arthroplasty*, 39(9S2), S54–S59. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2024.07.028>
- Pan, Y., Lü, G. H., Kuang, L., & Wang, B. (2018). Accuracy of thoracic pedicle screw placement in adolescent patients with severe spinal deformities: A retrospective study comparing drill guide template with free-hand technique. *European Spine Journal: Official Publication of the European Spine Society*, 27(2), 319–326. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5410-2>

- Ramasamy, M., Giri, Raja, R., Subramonian, Karthik, & Narendrakumar, R. (2013). Implant surgical guides: From the past to the present. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 5(Suppl 1), S98. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.113306>
- Renson, L., Poilvache, P., & Van den Wyngaert, H. (2014). Improved alignment and operating room efficiency with patient-specific instrumentation for TKA. *The Knee*, 21(6), 1216–1220. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.09.008>
- Sarment, D. P., Sukovic, P., & Clinthorne, N. (2003). Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 18(4), 571–577.
- Victor, J., Dujardin, J., Vandenuecker, H., Arnout, N., & Bellemans, J. (2014). Patient-specific guides do not improve accuracy in total knee arthroplasty: A prospective randomized controlled trial. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 472(1), 263–271. <https://doi.org/10.1007/s11999-013-2997-4>
- Yilmaz, A., Badria, A. F., Huri, P. Y., & Huri, G. (2019). 3D-printed surgical guides. *Annals of Joint*, 4(0). <https://doi.org/10.21037/aoj.2019.02.04>

Influencia de parámetros de cultivo en la formación de esferas de celulosa bacteriana

Geraldine Durango Giraldo, Cristina Valls Vidal, M. Blanca Roncero

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resumen

La celulosa bacteriana (CB) es un biomaterial que está siendo ampliamente estudiado por sus propiedades, que, lo hacen afín para una gran variedad de aplicaciones, entre las cuales se encuentran el tratamiento de aguas residuales, biomédicas, empaquetamiento alimenticio, entre otros. En este trabajo, se evaluaron diferentes parámetros (RPM y nivel de llenado) de crecimiento de celulosa bacteriana para la obtención controlada de diferentes tamaños de esferas de CB. Se encontró que las variables analizadas y su interacción tienen un efecto significativo en la producción de esferas, siendo el nivel de llenado la variable que más influye en los resultados. Adicionalmente, se obtuvo un modelo válido para la predicción del tamaño de las esferas.

Abstract

Bacterial cellulose (BC) is a biomaterial that has been widely studied due to its properties, which make it suitable for a wide range of applications, including wastewater treatment, biomedical uses, and food packaging, among others. In this work, different growth parameters (RPM and filling level) for bacterial cellulose production were evaluated to achieve controlled synthesis of BC spheres with different sizes. The results showed that the analyzed variables and their interaction have a significant effect on sphere production, with the filling level being the variable that most strongly influences the outcomes. Additionally, a valid model for predicting sphere size was obtained.

1. Introducción

La celulosa es el principal componente estructural de la pared celular de las plantas, junto con la hemicelulosa y la lignina. La celulosa bacteriana (CB), en cambio, como su nombre lo indica, es sintetizada por bacterias, principalmente del género *Acetobacter* y a diferencia de la celulosa vegetal, no contiene hemicelulosa ni lignina (Wang et al., 2019). La CB se puede obtener de diferentes morfologías, siendo las más comunes las membranas (crecimiento estático) y las esferas (crecimiento dinámico). El tamaño de estas últimas se ve afectado por diferentes parámetros como son: la velocidad de agitación (RPM), el nivel de llenado del recipiente (%), la temperatura de crecimiento, entre otros (Hu et al., 2013). Adicionalmente, el tamaño de las esferas puede condicionar la aplicación en la que va a ser usado este material, por lo que es fundamental controlar su crecimiento. Hu & Catchmark (2010), sugirieron que la variación en los tamaños de matraz y porcentajes de llenado modifican las dinámicas de aireación y movimiento del fluido, lo que afecta las fuerzas de cizallamiento en el medio y por lo tanto el tamaño de las esferas. Diaz-Ramirez et al. (2021), también reportaron que la microestructura de la CB obtenida bajo agitación puede cambiar con respecto a las membranas de CB obtenidas en condiciones estáticas, modificando su índice de cristalinidad, área superficial, tamaño de cristalito, entre otras. Siendo por esto fundamental el control del tamaño de las esferas que se quieran sintetizar. En este trabajo, estudiamos la influencia de los parámetros de velocidad de agitación (RPM) y nivel de llenado (%) en el tamaño de esferas de CB. Para esto se utilizó la herramienta de Diseño de Experimentos (DOE) del software Minitab, aplicando un diseño factorial 2^2 . Esta herramienta permite variar simultáneamente diferentes factores e investigar sus efectos y la influencia de sus interacciones en un proceso.

2. Materiales

Para el medio de crecimiento de la CB se usó: glucosa, peptona, extracto de levadura, fosfato disódico y ácido cítrico (monohidrato), que fueron adquiridos en Merck Ltd. Para la producción de BC se utilizó una cepa de *Komagataeibacter xylinus*, obtenida de la CECT (Colección Española de Cultivos Tipo).

3. Métodos

3.1. Crecimiento de las esferas de CB

El inóculo y el crecimiento de las esferas de CB se llevaron a cabo en medio Hestrin-Schramm (HS) (Hestrin y Schramm, 1954) en matraces esterilizados. La composición del medio HS incluía los siguientes materiales (g/L): glucosa, 20; extracto de levadura, 5; peptona, 5; ácido cítrico (monohidrato), 1,15 y fosfato disódico (anhidro), 2,7. Se utilizó el método de crecimiento dinámico, empleando un agitador orbital Orb-Pro lbx. Inicialmente, se preparó el inóculo de CB. Utilizando un asa de inoculación, se tomó una muestra de *K. xylinus* y se colocó en un tubo Falcon con medio HS, agitándola vigorosamente hasta que el medio se volvió turbio. Posteriormente, se añadió la cantidad necesaria de medio HS a un matraz Erlenmeyer de 250 ml, así como el inóculo previamente preparado, en una proporción del 8 % v/v con respecto al medio. Finalmente, los matraces Erlenmeyer se cubrieron con algodón para evitar la contaminación del medio y asegurar un flujo constante de oxígeno a las muestras, y se colocaron en el agitador orbital según las velocidades acordadas en el diseño factorial. Los cultivos se mantuvieron en constante movimiento durante 10 días a 23 °C. Cada ensayo se realizó por triplicado.

3.2. Diseño experimental

El crecimiento de las esferas de CB se realizó siguiendo un diseño factorial 22, con tres réplicas y tres puntos medios. El tamaño del

recipiente que se usó para el crecimiento de la CB se fijó en 250 ml, mientras que el porcentaje de inóculo se fijó en 8 % v/v con respecto al medio añadido al recipiente. Las dos variables independientes (factores X_1 y X_2) y sus rangos se muestran en la Tabla 1.

Variables	Factores	Valores normalizados		
		-1	0	1
Velocidad (RPM)	X_1	130	160	190
Nivel de llenado (%)	X_2	30	55	80

Tabla 1. Rangos de las variables del DOE.

El diseño factorial completo con el que se realizaron todos los experimentos se muestra en la Tabla 2. Se estudió el efecto de las variables mencionadas en la respuesta: tamaño de la esfera (y). La caracterización de las esferas de CB se realizó midiendo el tamaño promedio de partícula (mm) con el software gratuito ImageJ.

Experimento	X_1 (codificado)	X_1 - velocidad de agitación (RPM)	X_2 (codificado)	X_2 - nivel de llenado (%)
1	-1	130	-1	30
2	1	190	-1	30
3	-1	130	1	80
4	1	190	1	80
5	-1	130	-1	30
6	1	190	-1	30
7	-1	130	1	80
8	1	190	1	80

Experimento	X ₁ (codificado)	X ₁ - velocidad de agitación (RPM)	X ₂ (codificado)	X ₂ - nivel de llenado (%)
9	-1	130	-1	30
10	1	190	1	30
11	-1	130	-1	80
12	1	190	1	80
13	0	160	0	55
14	0	160	0	55
15	0	160	0	55

Tabla 2. Diseño factorial completo.

4. Resultados

Se obtuvieron diferentes tamaños de esferas con la modificación de las variables previamente mencionadas. En la Figura 1 se muestran tres diferentes tamaños de esferas obtenidas, lo que confirma que, controlando dichos factores, se puede obtener el tamaño de esferas que se requiera. A continuación, se describirá la importancia de cada uno de estos factores y de la interacción entre ambos.

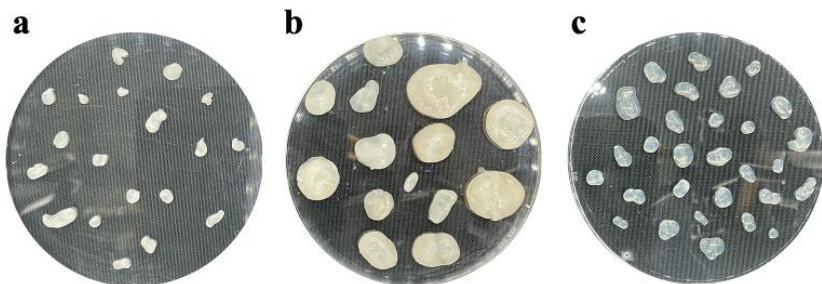


Figura 1. Esferas obtenidas a diferentes condiciones, a) 130 rpm, 30 %, b) 160 rpm, 80 %, c) 180, 80%.

Experimento	X ₁ (codificado)	X ₁ - velocidad de agitación (RPM)	X ₂ (codificado)	X ₂ - nivel de llenado (%)	Y ₁ - Tamaño de partícula (mm)
1	-1	130	-1	30	4,9
2	1	190	-1	30	0
3	-1	130	1	80	21,9
4	1	190	1	80	7,05
5	-1	130	-1	30	6,33
6	1	190	-1	30	0
7	-1	130	1	80	21,63
8	1	190	1	80	7,95
9	-1	130	-1	30	5,76
10	1	190	1	30	0
11	-1	130	-1	80	21,3
12	1	190	1	80	7,84
13	0	160	0	55	9,1
14	0	160	0	55	6,27
15	0	160	0	55	6,18

Tabla 3. Tamaño de las esferas para cada una de los experimentos.

En la Tabla 3 se muestra los resultados obtenidos para cada ejecución del diseño experimental. Se puede observar el tamaño de las esferas y su variación con respecto a las variables estudiadas.

El análisis estadístico del diseño experimental se realizó mediante la prueba de Análisis de Varianza (ANOVA). Esta técnica implica estimar la variación debida a cada uno de estos factores independientes por separado y luego compararlas con la estimación debida al error experimental.

El modelo matemático se obtuvo a partir de los datos obtenidos en Minitab (véase la Tabla 4). La significancia de los factores se determinó mediante una prueba de hipótesis. Si el valor p del factor es mayor que el valor de significancia (0,05), el factor se considera insignificante en el modelo de regresión.

Término	Efecto	Coefficiente	P-valor
X ₁	-9,830	-4,915	0,000
X ₂	11,780	5,890	0,000
X ₁ * X ₂	-4,167	-2,083	0,000
Punto central		-1,538	0,019
S = 0,465746; R-sq. = 99,73%			

Tabla 4. Valores obtenidos para el análisis del modelo.

Con estos valores, también se dedujo el efecto de cada variable evaluada sobre el tamaño de la esfera. Las RPM tuvieron un efecto negativo (-9,830), lo que indica que, a mayor velocidad de agitación, menor tamaño de la esfera, lo que concuerda con lo reportado por (Hu & Catchmark, 2010). Por el contrario, el porcentaje de llenado tuvo un efecto positivo (11,780), lo que significa que, al aumentar el porcentaje, aumenta el tamaño de la esfera. Finalmente, la interacción entre las variables (RPM * %) también tuvo un efecto negativo (-4,167), aunque no tan fuerte como las RPM, por lo que también debe tenerse en cuenta para la formación de esferas.

La Figura 2 muestra el diagrama de Pareto (a) que ilustra el efecto de los parámetros de control sobre la variable de respuesta (tamaño de la esfera) y el gráfico de efectos principales (b), respectivamente. El

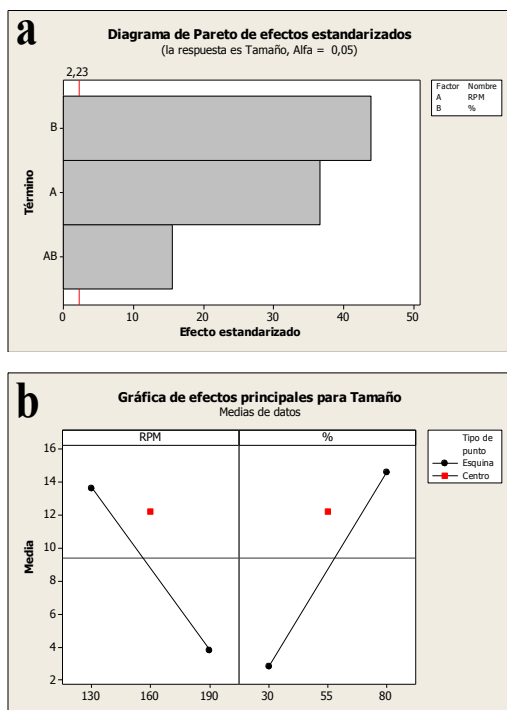


Figura 2. a) diagrama de Pareto, b) gráfica de efectos principales.

análisis de estos gráficos facilita la interpretación de los resultados clave obtenidos del ANOVA.

En el diagrama de Pareto (Figura 2a), podemos observar gráficamente que las variables analizadas y su interacción tienen un efecto significativo en la producción de esferas, ya que los factores que superan la línea roja dibujada en el gráfico lo representan. Por otro lado, en el gráfico de efectos principales, podemos observar el efecto de las variables en el tamaño: a mayor velocidad, menor tamaño, y viceversa. A mayor porcentaje de llenado, mayor tamaño de la esfera.

En este sentido, la ecuación (1) de regresión de la variable de respuesta, para el tamaño de las esferas, se muestra a continuación:

$$(1) \text{ Tamaño (mm)} = -2,47 - 0,011 * \text{RPM} + 0,68 * \% - 0,00278 * (\text{RPM} * \%)$$

Donde:

RPM = revoluciones por minuto

% = nivel de llenado

Para validar el modelo se hicieron varias pruebas a diferentes velocidades y porcentajes de llenado, las cuales se muestran en la Tabla 5.

Variables		Predicción	Tamaño real
RPM	Nivel de llenado (%)		
160	60	9,90 ± 0,47	10,48 ± 1,54
170	70	10,1 ± 0,47	9,27 ± 0,74

Tabla 5. Validación del modelo obtenido.

Estos datos experimentales confirman que, gracias al modelo planteado en este trabajo, se puede determinar las condiciones de crecimiento de la celulosa bacteriana necesarias para la obtención de un tamaño específico de esferas de CB.

4. Conclusiones

Se ha realizado un estudio sobre la influencia de diferentes parámetros en el tamaño de esferas de celulosa bacteriana. Se obtuvo un modelo a partir de un análisis ANOVA y un diseño de experimentos planteado mediante el software Minitab. El modelo obtenido se probó y se validó que es correcto para la predicción del tamaño de las esferas de

celulosa bacteriana. Éste nos permite evaluar el efecto de las variables independientes y su influencia para obtener un tamaño determinado, lo que resulta muy interesante porque permite obtener el tamaño de esfera idóneo según la aplicación planteada.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto PID2020-114070RB-I00 (CELLECOPROD), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Los autores agradecen al grupo de investigación consolidado AGAUR 2021 SGR 00852. Cristina Valls es Profesora Serra Húnter.

Referencias

- Díaz-Ramírez, J., Urbina, L., Eceiza, A., Retegi, A., & Gabilondo, N. (2021). Superabsorbent bacterial cellulose spheres biosynthesized from winery by-products as natural carriers for fertilizers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 1212–1220. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.203>
- Hu, Y., & Catchmark, J. M. (2010). Formation and characterization of spherelike bacterial cellulose particles produced by acetobacter xylinum JCM 9730 strain. *Biomacromolecules*, 11(7), 1727–1734. <https://doi.org/10.1021/bm100060v>
- Hu, Y., Catchmark, J. M., & Vogler, E. A. (2013). Factors impacting the formation of sphere-like bacterial cellulose particles and their biocompatibility for human osteoblast growth. *Biomacromolecules*, 14(10), 3444–3452. <https://doi.org/10.1021/bm400744a>
- Wang, J., Tavakoli, J., & Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. In *Carbohydrate Polymers*, 219, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.008>

Diseño de un sistema de agitación mecánica para un reactor químico tanque agitado

Jordi Torres Palacios

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Oscar Farrerons Vidal

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resumen

En la industria química los reactores representan el eje central de los procesos químicos, donde los reactivos se transforman en productos de una manera controlada y segura. Entre ellos, los reactores químicos tipo tanque agitado continuo (CSTR) destacan por mantener sus condiciones operativas como la distribución uniforme de concentración y temperatura. Es en este contexto, donde el diseño de sistemas de agitación mecánica optimizados desempeña un papel determinante en la transferencia de masa, energía y momento en el interior de los reactores. El presente estudio desarrolla una propuesta integral de diseño y modelado tridimensional de un sistema de agitación CSTR, empleando SolidWorks como herramienta de ingeniería de diseño asistido por ordenador. La metodología integra fundamentos de hidrodinámica, mecánica estructural, selección de materiales y criterios energéticos, considerando la teoría de reactores químicos, la clasificación de impulsores y el tipo de flujo generado, parámetros numéricos adimensionales como Reynolds y Potencia, y el análisis de esfuerzos en el conjunto eje - impulsor.

Palabras clave: Reactor CSTR, agitación mecánica, diseño CAD, impulsores, CFD.

Abstract

In the chemical industry, reactors represent the central axis of chemical processes, where reactants are transformed into products in a controlled and safe manner. Among these, continuous stirred tank reactors (CSTRs) stand out for maintaining their operating conditions, such as uniform concentration and

temperature distribution. It is in this context that the design of optimized mechanical stirring systems plays a crucial role in the transfer of mass, energy, and momentum within the reactors. This study develops a comprehensive proposal for the design and three-dimensional modeling of a CSTR stirring system, using SolidWorks as a computer-aided design engineering tool. The methodology integrates fundamentals of hydrodynamics, structural mechanics, material selection, and energy criteria, considering chemical reactor theory, impeller classification and the type of flow generated, dimensionless numerical parameters such as Reynolds number and power, and stress analysis of the shaft-impeller assembly.

Keywords: Reactor CSTR, mechanical agitation, CAD design, SolidWorks, impellers, CFD.

1. Introducción

Los reactores de tanque agitado continuo (CSTR) son la tecnología de reactor más común para aplicaciones químicas debido a su versatilidad y control en un estado estacionario. Su operación sigue la hipótesis de mezcla perfecta donde la composición y temperatura del fluido son homogéneas en todo el volumen del reactor, por lo que es prácticamente factible aplicar balances de masa y energía como principio.

La agitación mecánica de los procesos líquido-líquido determina la dispersión de fases y la eliminación de gradientes de concentración y temperatura. Debido a que un diseño inadecuado del impulsor o condiciones de operación pueden causar zonas muertas, mezcla incompleta, alto consumo de energía o tensiones mecánicas excesivas, el sistema de agitación necesita ser diseñado de manera coherente teniendo en cuenta criterios hidrodinámicos y mecánicos. Los agitadores se han diseñado sobre la base de correlaciones empíricas o tipologías estandarizadas como los impulsores tipo Rushton o tipo Ancla. Pero la aparición de diseños más inusuales también ha

resultado de la necesidad de mejorar la eficiencia energética y la adaptabilidad a nuevos procesos. Esto es especialmente útil en herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) que permiten la formación de modelos paramétricos y una evaluación de la coherencia geométrica y estructural del sistema en cuanto al diseño del sistema antes de la fabricación.

Se trata de diseñar y modelar un sistema de agitación para un reactor CSTR orientado a un proceso líquido-líquido, mediante el uso de un impulsor diseñado a medida basado en turbinas Rushton RP2 (de dos palas), geometría Chemineer BT-6 e impulsores tipo Ancla. El estudio involucra solo la construcción del ensamblaje en diseño conceptual, geométrico y mecánico, y propone métodos de dinámica de fluidos computacional (CFD) para validar la hidrodinámica.

2. Objetivo del estudio

El objetivo de este trabajo es el diseño y modelado en entorno CAD de un sistema de agitación mecánica para un reactor CSTR destinado a un proceso líquido-líquido, garantizando la coherencia hidrodinámica, estructural y operativa del conjunto. Para ello, se realiza una revisión del estado del arte en agitación mecánica aplicada a CSTR, se definen los parámetros de diseño fundamentales del sistema y se desarrolla el modelado paramétrico de sus componentes principales en SolidWorks, evaluando la viabilidad técnica, energética y la sostenibilidad preliminar del diseño propuesto.

3. Marco teórico de los reactores químicos

Los reactores químicos constituyen el núcleo de los procesos de transformación en la industria química, siendo el reactor CSTR uno de los más utilizados debido a su simplicidad operativa y facilidad de control. En este tipo de reactores se asume, como hipótesis fundamental, la mezcla perfecta, de modo que la composición y la

temperatura del fluido son uniformes en todo el volumen del reactor y coinciden con las condiciones de salida. Esta suposición permite formular balances de materia y energía simplificados, ampliamente empleados en el diseño y análisis de procesos continuos.

Desde el punto de vista del régimen de operación, el CSTR se caracteriza por trabajar en estado estacionario, con alimentación y descarga constantes. Bajo estas condiciones, el balance de materia para una especie reactiva A se expresa como:

$$F_{Ao} - F_A + R_A V = 0$$

dónde F_{Ao} y F_A representan los flujos molares de entrada y salida, r_A la velocidad de reacción V el volumen del reactor. Este balance refleja de forma directa la influencia de la cinética química y del volumen del reactor sobre la conversión alcanzada, siempre que la mezcla sea suficientemente homogénea.

El comportamiento térmico del reactor se describe mediante el balance de energía, que considera el calor transportado por la corriente de entrada, el calor generado o consumido por la reacción y el intercambio térmico con el entorno. En un CSTR ideal en régimen estacionario, dicho balance puede expresarse de forma general como:

$$\rho C_p (T_o - T) + (-\Delta H_r) r_A V + Q = 0$$

donde T_o es la temperatura de alimentación, T la temperatura en el reactor, ΔH_r el calor de reacción y Q el flujo de calor intercambiado con el exterior.

La eficiencia del CSTR depende directamente del desempeño del sistema de agitación, ya que una mezcla inadecuada puede generar zonas muertas, estratificación térmica y variaciones locales de concentración que afectan a la conversión y la selectividad del proceso. Por ello, el diseño del agitador debe garantizar tanto la

homogeneidad macroscópica del fluido como la adecuada renovación en las superficies de intercambio térmico.

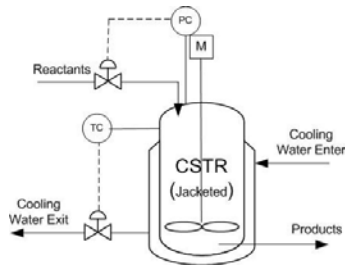


Figura 1. Esquema de un reactor CSTR. Fuente: Deepa, S. (2015).

Aunque los modelos ideales siguen siendo herramientas fundamentales para el dimensionamiento preliminar, su aplicabilidad práctica depende de que el diseño mecánico y geométrico del sistema de agitación permita aproximar el comportamiento real del reactor a las condiciones teóricas asumidas, haciendo imprescindible un enfoque integrado reactor - agitador.

4. Fundamentos de la agitación mecánica

En un reactor CSTR, la agitación mecánica determina el régimen de flujo y la energía transmitida al fluido, condicionando el desempeño del proceso. El régimen de flujo en un tanque agitado se caracteriza mediante el número de Reynolds del impulsor:

$$R_e = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

donde ρ es la densidad del fluido, N la velocidad de rotación, D el diámetro del impulsor y μ la viscosidad dinámica. En aplicaciones industriales se busca operar en régimen turbulento, ya que este

favorece la mezcla y una distribución más uniforme de la energía en el volumen del reactor.

El tipo de impulsor empleado determina el patrón de flujo generado en el tanque. Las turbinas radiales, como las de tipo Rushton, producen elevados niveles de corte local y resultan especialmente eficaces para la dispersión de fases. Por su parte, los impulsores de tipo Anchor promueven una circulación global del fluido y reducen la formación de zonas muertas, especialmente en fluidos de mayor viscosidad. La combinación de características propias de ambos tipos de impulsores permite equilibrar los efectos de corte y circulación, aspecto clave en procesos líquido-líquido.

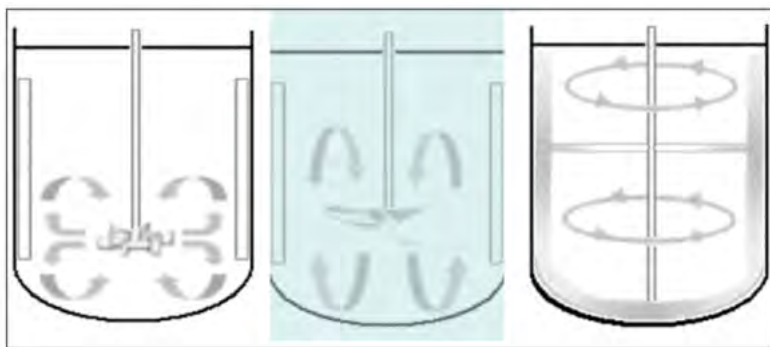


Figura 2. Flujos radial, axial y tangencial. Fuente: Castillo Uribe (2014).

La potencia transmitida al fluido constituye uno de los parámetros fundamentales en el diseño del sistema de agitación y puede expresarse mediante el número de potencia:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

donde P es la potencia absorbida por el impulsor. En régimen turbulento, el número de potencia depende principalmente de la geometría del impulsor y del tanque, lo que permite el dimensionamiento preliminar del sistema a partir de correlaciones empíricas ampliamente consolidadas.

La geometría del tanque y la presencia de deflectores (baffles) influyen de manera significativa en la eficiencia del mezclado. Los baffles reducen el movimiento tangencial del fluido, evitan la formación de vórtices y mejoran la circulación radial y axial inducida por el impulsor. Un diseño inadecuado de estos elementos puede reducir la eficacia de la agitación y aumentar innecesariamente el consumo energético. Una agitación mal dimensionada puede dar lugar a diversos problemas operativos, que se resumen en la siguiente tabla:

Problema asociado a una mala agitación	Consecuencia principal en el proceso
Zonas muertas y mezcla incompleta	Reducción de la conversión y pérdida de uniformidad en el producto
Vórtices y aireación no deseada	Alteración en la cinética y degradación de productos sensibles
Cavitación en el impulsor	Desgaste acelerado del impulsor y posibles daños en los bordes
Sobrecarga mecánica en el eje	Incremento del riesgo de rotura, deformación y desalineación
Vibraciones resonantes y fatiga	Fallos estructurales, paradas no programadas y disminución de la vida útil del equipo
Ineficiencia energética	Mayor consumo eléctrico y aumento de los costes operativos

Tabla 1. Relación entre agitación deficiente y consecuencias operativas en un CSTR.

5. Consideraciones de diseño

A partir de los fundamentos de la agitación mecánica, el diseño del sistema requiere definir la geometría del tanque, la relación entre el diámetro del impulsor y el del reactor, la posición axial del impulsor y la velocidad de operación. La selección del impulsor debe equilibrar corte local y circulación global, especialmente en procesos líquido–líquido. Desde el punto de vista mecánico, el eje agitador y las estructuras de soporte deben resistir cargas combinadas de torsión y flexión, evitando fenómenos de resonancia y garantizando la fiabilidad operativa. Asimismo, la eficiencia energética se considera un criterio clave para la viabilidad del sistema.

Categoría de diseño	Parámetros clave	Importancia en el CSTR
Geometría del impulsor	- Relación D/T típica: 0,3 - 0,5 - Número y ángulo de palas - Tipo: axial, radial o mixto	Define el patrón de flujo, la eficiencia de mezcla y la potencia requerida
Posición del impulsor	- Altura respecto al fondo del tanque: entre 0,5 D y D - Distancia entre múltiples impulsores	Evitar zonas muertas, sedimentación y mejora la circulación volumétrica
Velocidad de rotación	- Determina el régimen (Re) - Influye en turbulencia, mezcla y riesgo de cavitación	Afecta directamente la eficiencia del proceso y el esfuerzo mecánico sobre el eje
Potencia transmitida al fluido	- Calculada mediante el número de potencia (Np) - Depende de la geometría y el tipo de impulsor	Asegura la energía necesaria para lograr el mezclado deseado sin sobredimensionar el motor
Baffles o deflectores	- Número standard = 4 - Ancho aprox. 1/12 diámetro tanque - Grosor mínimo para evitar resonancias	Evitan el vórtice tangencial y mejoran significativamente la macro mezcla

Categoría de diseño	Parámetros clave	Importancia en el CSTR
Diseño estructural del eje	- Cálculo de esfuerzos de torsión y flexión - Frecuencias naturales y análisis de vibraciones - Selección de material y cálculo del diámetro mínimo	Previene resonancias, deformaciones y fallos mecánicos durante la operación
Condiciones del fluido	- Densidad, viscosidad y reología - Presencia de sólidos o múltiples fases	Determinan el tipo de impulsor adecuado y la potencia necesaria
Sostenibilidad y eficiencia energética	- Optimización geométrica - Reducción de pérdidas mecánicas - Minimización del consumo eléctrico	Permite operar con menor costo e impacto ambiental

Tabla 2. Consideraciones de diseño para sistemas de agitación mecánica en CSTR.

6. Diseño y modelado CAD en SolidWorks

El diseño y modelado del sistema de agitación se desarrolló íntegramente en un entorno CAD utilizando SolidWorks, con el objetivo de garantizar la coherencia geométrica, estructural y funcional del conjunto antes de su posible implementación industrial. El enfoque adoptado permitió integrar desde fases tempranas criterios hidrodinámicos y mecánicos, reduciendo iteraciones de diseño y facilitando la evaluación global del sistema.

6.1. Tanque y estructura de soporte

El tanque del reactor se modeló con una geometría cilíndrica vertical, dimensionada de acuerdo con el volumen de operación requerido y con proporciones habituales en reactores CSTR. Se prestó especial atención al diseño de los fondos y a la disposición de las entradas y salidas, con el fin de favorecer la circulación del fluido y evitar la

formación de zonas muertas. La estructura de soporte inferior se diseñó para soportar el peso del tanque lleno y transmitir las cargas de forma segura a la base, garantizando la estabilidad del conjunto durante la operación continua.

6.2. Sistema de agitación: eje e impulsores

El sistema de agitación constituye el elemento central del diseño. El eje agitador se dimensiona considerando solicitaciones combinadas de torsión y flexión, propias de la operación continua en régimen turbulento. El impulsor desarrollado presenta un diseño propio de carácter híbrido, inspirado en turbinas Rushton de dos palas (RP2), en la geometría Chemineer BT-6 y en impulsores de tipo Anchor. Esta configuración busca combinar un elevado nivel de corte local con una circulación global eficiente del fluido, adaptándose a los requerimientos de un proceso líquido-líquido. Así mismo, se incorporan perforaciones en las palas para generar mayor turbulencia favoreciendo la mezcla.

El modelado paramétrico del impulsor permitió ajustar dimensiones clave como el diámetro, el número de palas y su posición axial, facilitando la adaptación del diseño a diferentes escalas o condiciones operativas.

6.3. Estructura de soporte superior

La estructura de soporte superior se diseñó para alojar el sistema de accionamiento y mantener la correcta alineación del eje agitador. El modelado incluyó placas de anclaje y elementos de refuerzo que permiten resistir tanto el peso estático del conjunto motor–reductor como las cargas dinámicas transmitidas durante la operación. Este elemento resulta clave para minimizar vibraciones y garantizar la integridad mecánica del sistema.

6.4. Sistema de accionamiento

El sistema de accionamiento está compuesto por un motor eléctrico acoplado a un reductor de velocidad, seleccionados de acuerdo con la potencia requerida por el impulsor y la velocidad de rotación definida en el diseño. Su integración en el modelo CAD permitió verificar el correcto acoplamiento con el eje, la compatibilidad dimensional con la estructura de soporte y la accesibilidad para tareas de mantenimiento.

7. Discusión de resultados

El diseño desarrollado presenta una adecuada coherencia geométrica y mecánica, alineada con los criterios clásicos de diseño de sistemas de agitación para reactores CSTR. Las proporciones del conjunto tanque - impulsor y la posición axial seleccionada favorecen un patrón de circulación compatible con procesos líquido - líquido.

El impulsor de diseño híbrido permite equilibrar efectos de corte local y circulación global, lo que resulta coherente con los objetivos de dispersión y homogeneidad del proceso. Desde el punto de vista mecánico, la configuración adoptada contribuye a mejorar la fiabilidad operativa del sistema al reducir el riesgo de vibraciones y desalineaciones.

Aunque el diseño cumple los objetivos estructurales y conceptuales planteados, la evaluación hidrodinámica detallada del impulsor no se aborda en este trabajo. La aplicación futura de técnicas CFD permitiría analizar con mayor precisión los patrones de flujo y optimizar el desempeño del sistema.

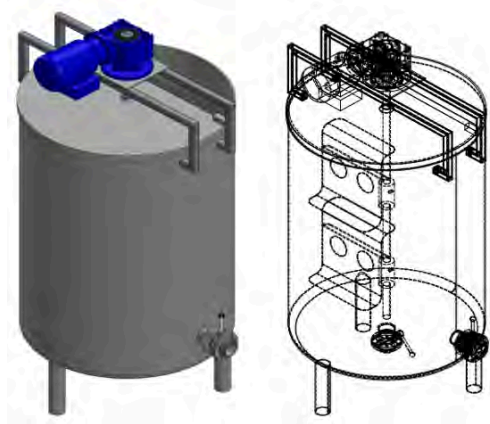


Figura 3. Vista isométrica con acabado realístico e interior del sistema completo.

8. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado el diseño y modelado en entorno CAD de un sistema de agitación mecánica para un reactor CSTR, destinado a un proceso líquido-líquido. El enfoque adoptado ha permitido integrar criterios hidrodinámicos, geométricos y mecánicos, garantizando la coherencia del conjunto y su viabilidad desde un punto de vista técnico.

El diseño del impulsor de carácter híbrido, basado en tipologías consolidadas como las turbinas Rushton de dos palas, la geometría Chemineer BT-6 y los impulsores de tipo Anchor, constituye una aportación relevante del trabajo. Esta configuración busca equilibrar la generación de corte local con una circulación global eficiente del fluido, adaptándose a las exigencias propias de los procesos líquido-líquido en reactores CSTR.

El modelado paramétrico en SolidWorks permitió verificar la correcta integración del tanque, el sistema de agitación, las estructuras de

soporte y el sistema de accionamiento, así como evaluar la alineación del eje y la coherencia geométrica del conjunto. Este enfoque facilita la detección temprana de posibles problemas de diseño y reduce incertidumbres asociadas a etapas posteriores de fabricación o implementación.

Desde el punto de vista operativo, el sistema diseñado presenta un equilibrio adecuado entre eficiencia de mezcla, robustez mecánica y consumo energético, constituyendo una base sólida para su aplicación industrial. Asimismo, el análisis preliminar de sostenibilidad pone de manifiesto la importancia de la optimización geométrica como herramienta para reducir el impacto energético del proceso.

Finalmente, se identifica como línea de trabajo futura la validación hidrodinámica del impulsor desarrollado mediante simulaciones CFD o ensayos experimentales, con el objetivo de cuantificar su desempeño en términos de patrones de flujo, tiempos de mezcla y eficiencia energética. Esta etapa permitirá consolidar el diseño propuesto y ampliar su aplicabilidad a otros procesos y escalas de operación.

Referencias

- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Fenómenos de transporte*. Reverté.
- Chapple, D., Kresta, S. M., Wall, A., & Afacan, A. (2002). The effect of impeller and tank geometry on power number for a pitched blade turbine. *Chemical Engineering Research and Design*, 80(4), 364–372. <https://doi.org/10.1205/026387602317446407>
- Dickey, D. S., & Fenic, J. G. (1976). Dimensional analysis for fluid agitation systems. *Chemical Engineering*, 83(1), 139–145.
- Farrerons-Vidal, O., & Olmedo, N. (2016). *Las TIC y la ingeniería gráfica*. Editorial OmniaScience, Barcelona. <https://doi.org/10.3926/oms.306>
- Fogler, H. S. (2016). *Elements of chemical reaction engineering*. Pearson Education.

- Harnby, N., Edwards, M. F., & Nienow, A. W. (1997). *Mixing in the process industries* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. Wiley-Interscience.
<https://doi.org/10.1002/0471451452>
- Rushton, J. H., Costich, E. W., & Everett, H. J. (1950). Power characteristics of mixing impellers. *Chemical Engineering Progress*, 46(8), 395–404.
- Tatterson, G. B. (1991). *Fluid mixing and gas dispersion in agitated tanks*. McGraw-Hill.
- Uhl, V. W., & Gray, J. B. (1966). *Mixing: Theory and practice* (Vol. 1). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395633-0.50006-5>
- Wehrli, F. (2012). Agitation and mixing. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 1–89). Wiley-VCH.
- Salho, A. K., & Hamzah, D. A. (2024). A review of stirred tank dynamics: Power consumption, mixing time and impeller geometry. *International Journal of Heat and Technology*, 42(1), 1081-1092. <https://doi.org/10.18280/ijht.420335>

From Principles to Practice: Use of Fairness and Ambition Considerations in Nationally Determined Contributions

Oliver Herrera

Doctorat en Sostenibilitat UPC

Olga Alcaraz

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament de Física

Bàrbara Sureda

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

Segons l'Acord de París, l'acció climàtica ha d'estar fonamentada en el principi d'equitat. Els països havien de presentar les seves segones Contribucions Determinades a nivell Nacional (NDC) en 2025, incloent-hi arguments que expliquessin per què consideren que la seva NDC és justa i ambiciosa a la llum de les circumstàncies nacionals. Aquest estudi analitza la informació presentada en la secció de *Justícia i Ambició* de les primeres NDC, amb un focus específic en l'ús de principis i indicadors reconeguts pel dret ambiental internacional. Els països s'han classificat segons les seves emissions històriques per càpita i el PIB per càpita, agrupant-los en Països Desenvolupats, Països en Desenvolupament i Països Menys Avançats/Petits Estats Insulars en Desenvolupament. L'anàlisi mostra que els països amb menor responsabilitat històrica i menor capacitat econòmica són els que més recorren a aquests principis i indicadors. La majoria tendeixen a seleccionar aquells principis que reforcen les seves pròpies posicions, evitant els que podrien exigir compromisos de mitigació més elevats. Destaca que els països desenvolupats, en general, no fonamenten els seus arguments d'equitat en aquests principis reconeguts internacionalment. Per incrementar la solidesa i la comparabilitat dels arguments sobre equitat en les NDC, els autors proposen que els països utilitzin de manera consistent principis alineats amb el dret

ambiental internacional i, sempre que sigui possible, proporcionin indicadors estandarditzats.

Abstract

According to the Paris Agreement, climate action must be based on equity. Countries had to submit their second Nationally Determined Contributions (NDCs) by 2025, including arguments on how the Party considers that its NDC is fair and ambitious in light of its national circumstances. This study analyses the information provided by countries in the Fairness and Ambition section of their first NDCs, focusing on the use of principles and indicators supported by international environmental law. Countries are mapped according to historical emissions per capita and GDP per capita, grouping them as Developed Countries, Developing Countries, or Least Developed Countries/Small Island Developing States. The analysis reveals that countries with the least historical responsibility and economic capacity rely most on those principles and indicators. Most countries tend to select principles favorable to their positions while avoiding those that would justify stronger mitigation efforts. Notably, developed countries generally do not base their fairness arguments on those internationally recognized principles. To enhance the robustness and comparability of arguments in NDCs, authors suggest that countries consistently report using principles aligned with international environmental law and, if possible, provide standardized indicators.

1. Introduction

In December 2023, the first global stocktake (GST) concluded on a somewhat bittersweet note. All Parties delivered their first nationally determined contributions (NDCs), and many countries have updated them in response to successive calls from the UNFCCC (UNFCCC, 2015a). Yet, the gap between the aggregate effect of current mitigation targets and the emission reductions required to meet the 1.5°C goal remains concerning (UNEP, 2023). This underscores that there is still a misalignment between the bottom-up design of the Paris Agreement (PA), allowing Parties to set their own targets, and the global temperature goal, which requires collective ambition. Some authors

argue that without a shared understanding of equitable contributions, countries may be reluctant to increase ambition. In other words, countries will be willing to do more only if other countries do more (Holz et al., 2023; Rajamani et al., 2021). And analyses of NDCs based on equity criteria demonstrate that large emitters often contribute below their “fair share” of global mitigation effort (Holz et al., 2018; Pan et al., 2017; Robiou Du Pont et al., 2017).

Although there quite a few references to equity in the PA, including the Article 2 which states that the agreement “will be implemented to reflect equity” (United Nations, 2015), the bottom-up nature of the PA seems to be an obstacle to its operationalization on a global scale (Pauw et al., 2020). The Lima Call for Climate Action (UNFCCC, 2014) and COP21 decision 27 (UNFCCC, 2015b) requested Parties to justify the fairness and ambition of their contributions. The Paris Rulebook (PRB), particularly Annex I of Decision 4/CMA.1, provides guidelines to submit the Information to Facilitate Clarity, Transparency, and Understanding (ICTU) of the NDCs, which is mandatory from second NDCs, but “strongly encouraged” to be provided from the first NDC. Paragraph 6 requires Parties to explain “how the Party considers that its NDC is fair and ambitious in light of its national circumstances,” explicitly calling for “fairness considerations, including reflecting on equity” (UNFCCC, 2018).

Despite being clearly different concepts, research frequently uses a country's fair share as a benchmark for ambition (Alcaraz et al., 2021; Holz et al., 2018; Rajamani et al., 2021; Ramírez-Padilla et al., 2024; Robiou Du Pont et al., 2017). Yet, no universally agreed way exists within the UNFCCC to operationalize equity, resulting in a wide range of interpretations (UNFCCC, 2023). Sælen et al. (2019) note no clear correlation between countries' stated equity concerns and NDC ambition, highlighting the inconsistency in practice.

Some prior studies examining fairness and ambition arguments in the intended nationally determined contributions (INDCs). While Mbeva et al. (2016) found that they often prioritised national interests over equitable global considerations, Winkler et al. (2018) highlighted the limited use of quantitative indicators. In the case of first-round NDCs, Rajamani et al. (2021) showed that some justifications are inconsistent with International Environmental Law (IEL) principles and tended to favor developed countries.

As countries prepare their second NDCs, including mandatory ICTU information, it is pertinent to assess the quality, consistency, and comparability of fairness and ambition arguments. This chapter analyses the first round NDCs submitted up to 31 December 2023, focusing on references to principles and indicators, to inform and improve the second round of submissions and support a more transparent and equitable global mitigation efforts.

2. Methodology

2.1 Information used in the analysis

The PRB was agreed in December 2018, establishing guidance for NDC submissions. This study considers the latest NDC submitted by each Party between January 2019 and December 2023, whether new or updated, totaling 176 Parties (UNFCCC, 2015a). Each of the 27 EU member states is counted individually, despite them submitting a single NDC.

The study focuses on the Fairness and Ambition section of first NDCs, following the ICTU guidance in Annex I of Decision 4/CMA.1 (UNFCCC, 2018a). Only content explicitly presented in dedicated sections is analyzed; related information in other parts of the NDC (e.g., scope, planning processes) is excluded, except where the ICTU requests discussion of “How the NDC contributes towards achieving the

objective of the Convention as set out in its Article 2” (para. 7), given its relevance to fairness arguments. This approach allows comparability across countries while acknowledging limitations, as submission of ICTU information was only mandatory from the second round of NDCs.

To evaluate fairness arguments, the study uses principles and indicators identified by Rajamani et al. (2021) as recognized in national court decisions assessing a state’s fair share.

2.2 Analysis

The first step is to determine whether a country includes a dedicated section on Fairness and Ambition, indicated by headings, subchapters, or sections. Only NDCs with an explicit section are included in subsequent analyses. Next, four IEL principles commonly cited by national courts in assessing fair contributions are examined: Sustainable Development, Equity, Common but Differentiated Responsibilities (CBDR), and Special Circumstances (Rajamani et al., 2021).

- Explicit references: the principle is named directly (e.g., “Sustainable Development”).
- Implicit references: arguments or indicators relate to a principle without naming it. Following Rajamani et al. (2021) and the International Law Association (2014):
 - *Sustainable Development*: national development plans integrating climate action; priority given to development needs.
 - *Equity*: recognition of equitable access to sustainable development and resources, considering historical responsibility and capacity.
 - *Special Circumstances*: references to vulnerability, LDC/SIDS status, or exceptional adverse national conditions.

- *CBDR*: differentiation of responsibilities based on historical contributions and capacity.

For example, Tonga's NDC highlights high climate vulnerability and its status as a SIDS, implicitly invoking Special Circumstances (Kingdom of Tonga, 2020).

Similar to the principles, four indicators, recognized by courts as consistent with IEL principles, are analyzed (Rajamani et al., 2021):

1. Historical emissions – cumulative GHG/CO₂ emissions.
2. Emissions per capita – current annual emissions per person.
3. Gross Domestic Product (GDP) per capita
4. Share of global emissions – percentage of global total emissions

Only explicit references are counted, but regardless of whether quantitative values are provided, qualitative descriptions are given, or reference years are mentioned or not.

2.3 Analysis of the data obtained

The study quantifies the number of countries referring to each principle or indicator, and conversely, the number of principles or indicators used by each country. To contextualize the findings, countries are grouped as Developed, Developing (not including LDC/SIDS) , and LDC/SIDS based on UNCTADstat (2022). In addition, to explore the relationship between national circumstances and fairness arguments, the study also maps references to cumulative emissions per capita (1990–2019), that can inform about historical responsibility and GDP per capita (2020), related to the capacity to address mitigation and adaptation measures (Mattoo et al., 2012).

3. Results and discussion

Of the 176 Parties reviewed, 151 included a section on Fairness and Ambition **in** their NDC. All 49 Developed Countries did so, compared

with 74% of Developing Countries (46 of 62) and 86% of LDCs and/or SIDS (56 of 65). China and India, two of the top five emitters, did not include this section. Percentages for each group in subsequent analyses are based on countries *that do include* the section.

3.1. Principles used in NDCs

Four principles of IEL were tracked in the Fairness and Ambition section of the NDCs. Among 151 countries, 39 do not reference any principle, while 56 reference all four. 61% of Developed Countries do not refer to any of these principles, while 91% of developing Countries and LDCs and/or SIDS cite one or more.

Figure 1 presents the frequency of each principle, showing that Sustainable Development is the most frequently cited principle, mentioned by all 100 countries, followed by Equity (91 countries), CBDR (80), and Special Circumstances (75). LDCs and/or SIDS rely heavily on principles, with 95% citing Sustainable Development, while 72% of Developing Countries refer to Equity. In contrast, Developed Countries predominantly reference Sustainable Development, with only 31% mentioning other principles. It is noted that among the top five emitters in 2019, the United States, Russia, and Japan refer exclusively to Sustainable Development.

When mapping references to principles by cumulative emissions per capita (1990–2019) and GDP per capita (2020), it is found that countries with lower historical responsibility and economic capacity most frequently invoke the principles. LDCs and SIDS, largely rely on principles, particularly Special Circumstances, reflecting their vulnerability (Rajamani et al., 2021). The bottom-up nature of the PA allows each Party to self-determine which principles to invoke, leading to a wide range of uses. For instance, Qatar, with the highest cumulative emissions per capita and GDP per capita, references all four principles, highlighting vulnerability due to gas-dependency and

asserting rights under Special Circumstances (State of Qatar, 2021). Conversely, Niger, with one of the lowest emissions and GDP per capita, refer to the same principles, emphasizing development needs and minimal contribution to global emissions (Republique du Niger, 2021). These examples illustrate that merely referring to principles does not reliably indicate fairness so quantitative indicators are needed for meaningful comparison.

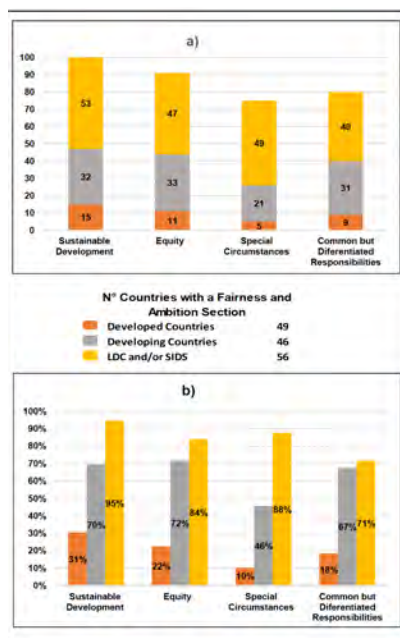


Figure 1 a) Number of countries that referred to the principles of Sustainable Development, Equity, CBDR and Special Circumstances, within the Fairness and Ambition section of their NDC. b) Share of countries that refer to each principle, in relation to the total number of countries in each group that include this section (bottom).

3.2. Indicators used in NDCs

Annex I of the PRB provides categories for reporting ICTU information but does not prescribe specific indicators, allowing Parties to select indicators to support arguments. This study focuses on four indicators recognized in courts as consistent with IEL: Share of global emissions, Emissions per capita, Historical emissions, and GDP per capita.

Of the 151 countries, 106 cite at least one indicator; 45 cite none, while only 33 countries cite more than one. Among Developed Countries, 14% cite more than one; 30% of Developing Countries and 21% of LDCs and/or SIDS do so. Most countries cite a single indicator (73).

Figure 2 shows the frequency of each indicator, underlining that Share of global emissions (63 countries) and Emissions per capita (59) are the most cited, whereas Historical emissions (18) and GDP per capita (12) are less frequently used. Among the five top emitters (2019), US, Russia, and Japan do not cite any indicator.

Mapping the use of indicators against cumulative emissions per capita and GDP per capita reveals some patterns. GDP per capita is referenced mainly by countries at or below the global average for both metrics, with Switzerland as a notable exception by emphasizing its high capacity (Government of Switzerland, 2021). Emissions per capita is used predominantly by Developed Countries, which often highlight current or declining per capita levels while avoiding discussion of historical responsibility; for example, the EU underscores its comparatively low per capita emissions relative to other high-income countries (EU27, 2023). The share of global emissions is cited primarily by Developing Countries and LDCs and/or SIDS to signal their marginal contribution to overall emissions, although some high-emission per capita countries, such as Qatar, also invoke this indicator, without referring to per capita indicators. Historical emissions are referenced mostly by countries with both low GDP per capita and low cumulative

emissions per capita, a group that collectively represents only about 5% of cumulative CO₂ emissions from 1990 to 2019.

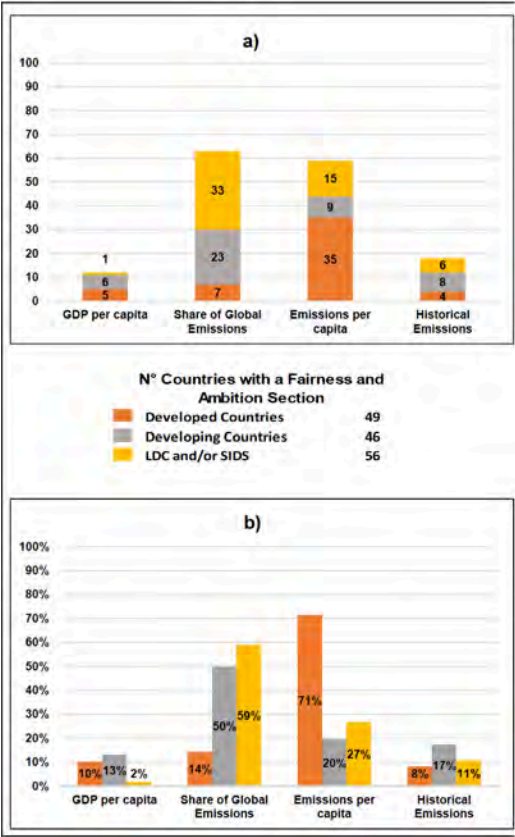


Figure 2 a) Number of countries that referenced GDP per capita, Share of Global Emissions, Emissions Per Capita and Historical Emissions indicators, within the Fairness and Ambition section of their NDCs. b) Share of countries referencing each of the indicators in relation to the total number of countries in each group.

Overall, countries often rely on a single indicator, which shows an incomplete picture of their national circumstances and global responsibility. Many arguments lack numerical values or references, limiting comparability. Despite the appearance of ICTU guidelines, the quality of information has not improved compared to INDCs (Winkler et al., 2018). Clearer guidance and a comprehensive set of standardized indicators, such as cumulative per capita emissions, current per capita emissions, GDP per capita, climate vulnerability indices, and SDG achievement indices, could improve comparability and transparency.

4. Conclusions

The analysis reveals that most countries invoke one or more principles of international environmental law (IEL) to justify their contributions. These principles, however, are predominantly cited by countries with low historical responsibility and limited economic capacity, especially LDCs and SIDS. In contrast, few countries with high cumulative emissions per capita and GDP per capita, such as Developed Countries, reference principles of fairness.

Regarding indicators, 106 of the 151 Parties cite at least one of the four principles consistent with IEL. However, only 33 countries cite more than one indicator, and most rely on a single metric, which can present a partial or misleading picture of national responsibility and capacity. Developed Countries predominantly use Emissions per capita, emphasizing recent reductions, while avoiding references to historical responsibility or capacity. Conversely, Developing Countries and LDCs and/or SIDS often cite Share of global emissions or Historical emissions to highlight limited contributions to global emissions.

This suggests a widespread “cherry-picking” of principles and indicators, where countries select the elements most favorable to justifying the adequacy of their NDCs, avoiding the ones that might imply a need to increase ambition.

To enhance transparency and comparability, Parties should adopt a standardized set of quantifiable indicators, grounded in IEL principles. Otherwise, this information will not be useful in monitoring the concept of equity in the implementation of the Paris Agreement and supporting improved ambition in second-round NDCs.

Acknowledgements

This study was conducted within the framework of the Sustainability Science and Technology Research Group (CITES), supported by the ‘Grants promoting the scientific activity of research groups in Catalonia’, provided by the Generalitat de Catalunya (Autonomous Government of Catalonia). Grant number: 2021 SGR 01063.

Oliver Herrera expresses his gratitude to the National Agency for Research and Development (ANID) through the Chile Scholarship Program (Doctorado Becas Chile / 2024 - 72240113), thanks to which he has been able to carry out this work.

References

- Alcaraz, O., Sureda, B., Turon, A., Ramírez, C., & Gebellí, M. (2021). Equitable mitigation to achieve the 1.5 °C goal in the Mediterranean Basin. *Climatic Change*, 165(62), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-021-03070-8>
- EU27. (2023). *Update of the NDC of the European Union and its Member States*.
- Government of Switzerland. (2021). *Switzerland First NDC 2021-2030 Version 3*. 1–23. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/SwissNDC2021-2030inclICTU_0.pdf
- Holz, C., Cunliffe, G., Mbeva, K., Pauw, P. W., & Winkler, H. (2023). Tempering and enabling ambition: how equity is considered in domestic processes preparing NDCs. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 23(3), 271–292. <https://doi.org/10.1007/s10784-023-09599-6>

- Holz, C., Kartha, S., & Athanasiou, T. (2018). Fairly sharing 1.5: National fair shares of a 1.5 °C-compliant global mitigation effort. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 18(1), 117–134.
<https://doi.org/10.1007/s10784-017-9371-z>
- International Law Association. (2014). Resolution 2/2014, Declaration of Legal Principles Relating to Climate Change Committee on Legal Principles Relating to Climate Change (Issue January 2012). *The 76th Conference of the International Law Association*.
- Kingdom of Tonga. (2020). Tonga's Second NDC. December, 25–28. <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Tonga%27sSecondNDC.pdf>
- Mattoo, A., & Subramanian, A. (2012). Equity in Climate Change: An Analytical Review. *World Development*, 40(6), 1083–1097.
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2011.11.007>
- Pauw, W. P., Castro, P., Pickering, J., & Bhasin, S. (2020). Conditional NDCs in the PA: foothold for equity or Achilles heel? *Climate Policy*, 20(4), 468–484.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1635874>
- Rajamani, L., Jeffery, L., Höhne, N., Hans, F., Glass, A., Ganti, G., & Geiges, A. (2021). National 'fair shares' in reducing GHG emissions within the principled framework of IEL. *Climate Policy*, 21(8), 983–1004.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1970504>
- Republique du Niger. (2021). *Republique du Niger NDC*.
<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/CDNReviséedelaRDC.pdf>
- Robiou Du Pont, Y., Jeffery, M. L., Gütschow, J., Rogelj, J., Christoff, P., & Meinshausen, M. (2017). Equitable mitigation to achieve the PA goals. *Nature Climate Change*, 7(1), 38–43. <https://doi.org/10.1038/nclimate3186>
- Sælen, H., Tørstad, V., Holz, C., & Nielsen, T. D. (2019). Fairness conceptions and self-determined mitigation ambition under the PA: Is there a relationship? *Environmental Science and Policy*, 101(September), 245–254.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.018>
- State of Qatar. (2021). *State of Qatar NDC*.
<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/QatarNDC.pdf>
- UNCTADstat. (2022). *Country Classification - Groups of Economies*.
<https://unctadstat.unctad.org/EN/Classifications.html>
- UNFCCC. (2014). Report of the COP 20. FCCC/CP/2014/10/Add.1. *Decision 1/CP.20*, 1(February), 1–7.
- UNFCCC. (2015a). *NDC Registry*. <https://unfccc.int/NDCREG>

- UNFCCC. (2015b). Report of the COP21. FCCC/CP/2015/10/Add.1. *Decision 1/CP.21 Adoption of the Paris Agreement, January*, 1–36.
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- UNFCCC. (2018a). Report of the CMA1, Addendum 1. FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.1. *Decision 4/CMA.1, March*, 65.
- UNFCCC. (2023). Technical dialogue of the first GST- *Synthesis Report*. FCCC/SB/2023/9. September. <https://unfccc.int/documents/631600>
- United Nations. (2015). Paris Agreement. FCCC/CP/2015/10/Add.1. COP21, 3.
<https://doi.org/FCCC/CP/2015/L.9>
- Winkler, H., Höhne, N., Cunliffe, G., Kuramochi, T., April, A., & de Villafranca Casas, M. J. (2018). Countries start to explain how their climate contributions are fair: More rigour needed. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 18(1), 99–115.
<https://doi.org/10.1007/s10784-017-9381-x>

Bending Behavior of 3D-Printed Sandwich Panels: A Finite Element Comparison of PLA and ABS

Behnam Mobaraki

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Vahid M. Khojastehnezhad

Department of Mechanical Engineering
Cyprus International University, North Cyprus

Abdollah Mobaraki

Department of Architecture
Cyprus International University, North Cyprus

Hamed H. Pourasl

Department of Mechanical Engineering
Cyprus International University, North Cyprus

Frederic Vila Marti

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Abstract

This study investigates the flexural behavior of 3D-printed sandwich panels manufactured from polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) using finite element analysis. Sandwich specimens were designed and fabricated via fused deposition modelling and numerically analyzed using finite element method under three-point bending with mid-span loads of 40 N, 60 N, and 100 N. The simulations reveal a stable and predominantly linear elastic response for both materials across all load levels. Peak von Mises stresses were similar for PLA and ABS and increased almost linearly with load, reaching approximately 7.6 MPa, 11.3 MPa, and 18.9 MPa, respectively, indicating that

stress distribution is mainly governed by geometry and loading conditions. In contrast, the strain response was strongly material-dependent, with PLA exhibiting lower elastic strain due to its higher flexural stiffness, while ABS accommodated larger elastic deformations.

1. State of the art

Additive manufacturing (AM), commonly known as 3D printing, has emerged in the last decade as a disruptive technology in civil and structural engineering. It enables the fabrication of complex geometries, customized elements and lightweight components that are difficult or impossible to achieve with conventional manufacturing. Recent reviews emphasize key advantages such as material efficiency, reduction of waste, geometric freedom and the potential to integrate design, analysis and fabrication in a unified digital workflow [1]. Within this broader context, polymer-based 3D printing particularly fused deposition modelling (FDM) using thermoplastics such as PLA and ABS has gained attention for the production of small-scale structural elements, prototypes and sandwich panels [2]. Several works have investigated 3D-printed architected sandwich structures, showing that lattice or cellular cores can achieve high stiffness-to-weight ratios and favorable energy-absorption characteristics under bending and impact loads. This technology can be used for different aspects of sustainability [3]. Experimental programmes typically include tensile and three-point bending tests to characterize the mechanical response of the printed skins and cores, while numerical studies based on the finite element method (FEM) are used to reproduce the observed behavior and explore the influence of core topology, infill pattern and printing parameters [4]. Application of FEM has already been shown in various fields of engineering by the authors of this study [5,6].

More specifically, recent studies on FDM-printed sandwich panels made from PLA and ABS (sometimes reinforced with carbon fibre) have combined detailed mechanical testing with FEM simulations to evaluate flexural behaviour, failure modes and damping characteristics. These works [7] demonstrate that print orientation, layer thickness and core geometry strongly affect stiffness, strength and damage evolution, and they confirm that calibrated FEM models can reliably predict three-point bending responses of 3D-printed sandwich beams. A strong agreement between experimental and numerical load displacement responses was reported, demonstrating the capability of FEM to predict stiffness, stress distribution, and the influence of core geometry on flexural performance [8]. The bending behavior of 3D-printed polymeric sandwich structures with various core topologies has been experimentally investigated through systematic three-point bending tests. The study focuses on architected sandwich panels manufactured using PLA-based filaments and evaluates flexural stiffness, energy absorption capacity, and failure mechanisms associated with different core designs. Although primarily experimental, the reported results provide essential benchmark data for the validation of numerical and FEM-based models of 3D-printed sandwich structures [9].

The present work contributes to this research gap by experimentally characterizing the bending response of 3D-printed sandwich panels produced in PLA and ABS, extracting their mechanical parameters from small-scale tests, and subsequently using FEM to investigate the micro-scale behaviour and bearing capacity of the corresponding structural models.

2. Materials and methods

2.1. Materials and 3D printing process

The sandwich panels investigated in this study were manufactured using FDM technology. All specimens were printed using an Ultimaker

S5 3D printer. Two commonly used thermoplastic filaments, PLA and ABS, were selected. For the experimental campaign, three sandwich panel specimens were printed for each material (PLA and ABS) using identical geometrical configurations and printing parameters (Figure 1). Although both experimental testing and numerical modelling were carried out within the scope of the study, it should be noted that only the results of the finite element analysis (FEA) are presented and discussed in this paper.

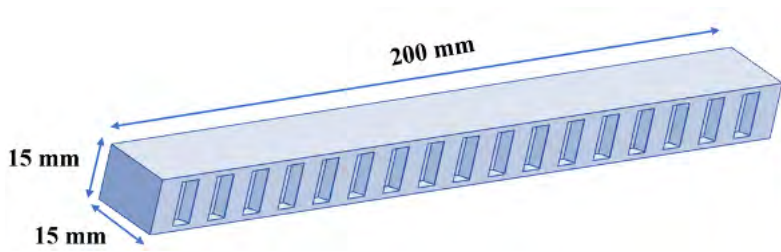


Figure 1. Dimension of the sandwich panels printed by ABS and PLA filaments.

3. Development of finite element model

The finite element model of the 3D-printed sandwich panel was developed using ANSYS Mechanical (Student Version). The student version was employed for all stages of the numerical analysis, including geometry import, material definition, meshing, boundary condition assignment, solution, and post-processing. Mesh sensitivity analysis was applied in regions expected to study the optimal mesh size.

3.1. Material modelling, boundary conditions and analysis type

A static structural analysis was performed assuming linear elastic material behavior for both PLA and ABS. Material properties were assigned based on experimentally informed values and manufacturer data, ensuring consistency with the physical specimens.

To replicate the three-point bending configuration, appropriate boundary conditions were imposed. The two end regions of the sandwich beam were fully constrained, preventing translational degrees of freedom and simulating the support conditions used during laboratory testing. Rotational degrees of freedom were left unconstrained to allow realistic bending deformation. Figure 2 presents the 3 sandwich panels during and after the printing process.

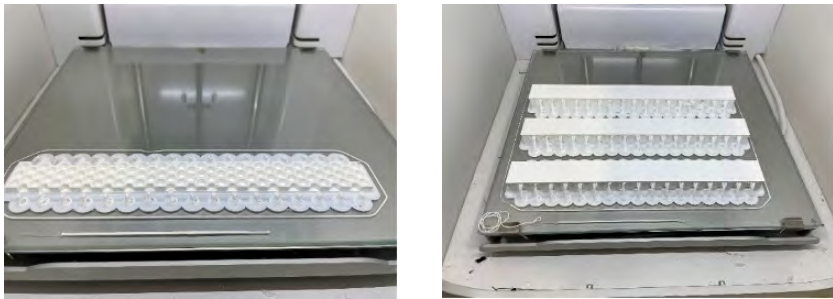


Figure 2. sandwich panels during and after the printing process with PLA filament.

A concentrated vertical load was applied at the mid-span of the beam, corresponding to the loading nose in a three-point bending test. To investigate the structural response under different load levels, three load magnitudes were considered: 40 N, 60 N, and 100 N.

4. Analysis of the results and discussion

In terms of equivalent elastic strain, the ABS sandwich panel (Figure 3-a) shows a higher maximum value ($\epsilon_{ABS-max} = 0.0034091$ mm/mm) compared to PLA (Figure 3-b) ($\epsilon_{PLA-max} = 0.0028643$ mm/mm), corresponding to an increase of approximately 19%. This result indicates that, under identical loading and geometry, the ABS configuration undergoes larger elastic deformation. The lower strain levels observed in PLA are consistent with its higher elastic modulus,

reflecting greater flexural stiffness and reduced curvature under bending. In both materials, minimum strain values are negligible and occur near the constrained end regions, where deformation is suppressed by boundary conditions. The equivalent von Mises stress distributions for the two materials at 40 N are very similar. The maximum stress reaches 7.5753 MPa for PLA (Figure 3-c) and

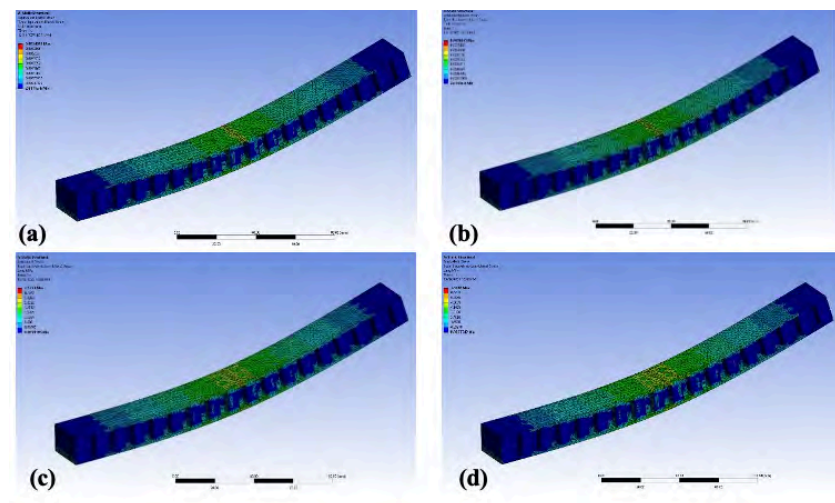


Figure 3. Finite element analysis of the cases, applied force 40 N: (a) ABS strain, (b) PLA strain, (c) PLA stress, and (d) ABS stress.

7.4488 MPa for ABS (Figure 3-d), corresponding to a difference of less than 2%. This close agreement suggests that, at low load levels and within the elastic regime, the peak stress magnitude is primarily governed by the applied bending moment and specimen geometry rather than by material stiffness.

As in the 40 N case, the maximum values are concentrated near the mid-span region, particularly within the outer skins, while the internal

core remains subjected to comparatively lower stress and strain levels. For the equivalent elastic strain, a significant increase is observed in both materials compared to the 40 N case, indicating a proportional response to the applied load. The ABS configuration reaches a maximum equivalent strain of 0.0051136 mm/mm, whereas the PLA panel exhibits a lower maximum strain of 0.0042964 mm/mm. This corresponds to an approximate 19% higher strain in ABS, consistent with the trend identified at lower load levels.

The equivalent von Mises stress distributions at 60 N further reinforce this observation. The maximum stress in PLA reaches 11.363 MPa (Figure 4-a), while ABS exhibits a slightly lower maximum of 11.173 MPa (Figure 4-b), resulting in a difference of less than 2% between the two materials. As in the 40 N case, this close agreement indicates that the peak stress levels are primarily controlled by geometry and applied bending moment, while material stiffness mainly influences strain development rather than stress magnitude. Stress concentrations are again observed in the outer skins near the mid-span region, with minimal stress transmission into the deeper core, highlighting the core's stabilizing and shear-transfer role.

The ABS sandwich panel attains a maximum equivalent strain of 0.0076176 (Figure 5-a), while the PLA panel reaches a slightly lower maximum of 0.0071607 (Figure 5-b). Although the absolute difference between the two materials is smaller than at lower load levels, ABS still exhibits approximately 6.4% higher strain than PLA.

The maximum stress in PLA reaches 18.938 MPa (Figure 4-c), while ABS exhibits a very similar maximum of 18.294 MPa (Figure 4-c), corresponding to a difference of approximately 3.5%. As in the 40 N and 60 N cases, the stress magnitude is largely controlled by the applied bending moment and specimen geometry, resulting in comparable peak stresses for both materials.

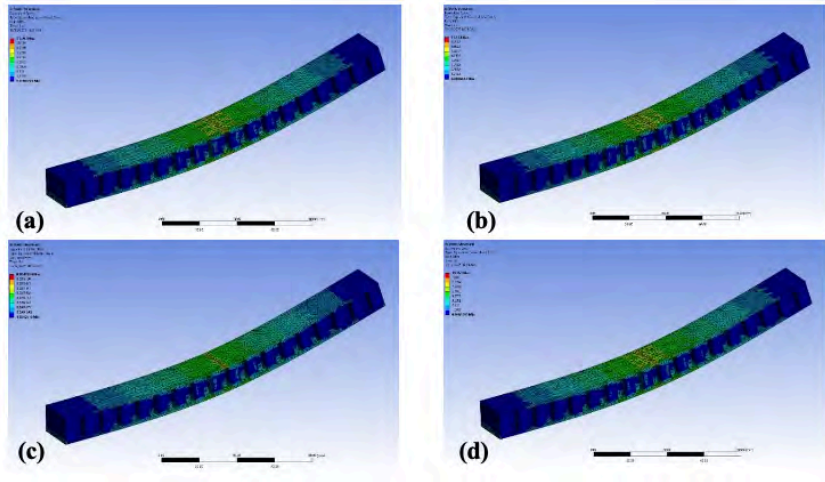


Figure 4. Finite element analysis of the cases, applied force 60 N: (a) PLA stress, (b) ABS stress, (c) PLA strain, and (d) ABS strain.

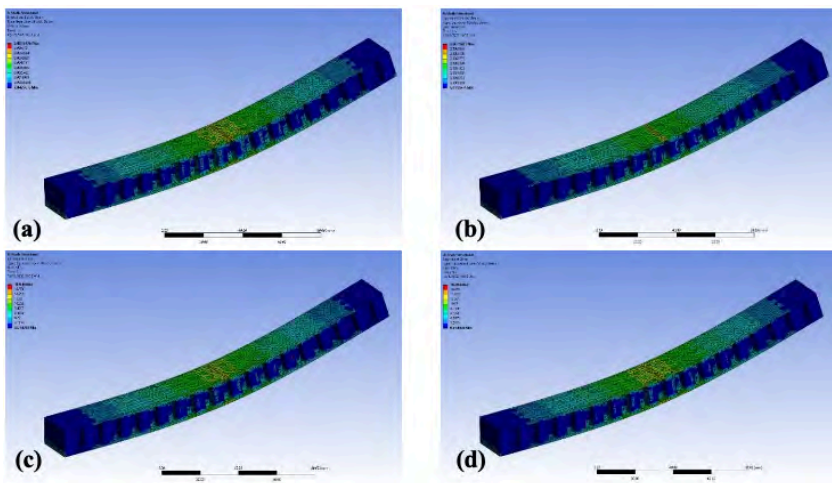


Figure 5. Finite element analysis of the cases, applied force 100 N: (a) ABS strain, (b) PLA strain, (c) PLA stress, and (d) ABS stress.

5. Conclusion

This study investigated the flexural response of 3D-printed sandwich panels manufactured from PLA and ABS using finite element analysis under three-point bending loads. While the peak von Mises stresses were comparable for PLA and ABS and primarily governed by geometry and loading conditions, the strain response consistently highlighted material-dependent differences. PLA exhibited lower elastic strain under identical loads, confirming its higher flexural stiffness, whereas ABS accommodated larger elastic deformations. Quantitatively, the finite element results show that the maximum von Mises stress increased almost linearly with the applied load, reaching approximately 7.6 MPa at 40 N, 11.3 MPa at 60 N, and 18.9 MPa at 100 N for both materials, with differences between PLA and ABS remaining below 4% at each load level.

References

1. Pierre, A.P.D.R.A. Structural Built-up of Cement-Based Materials Used for 3D-Printing Extrusion Techniques. *Mater. Struct.* 2016, 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
2. Tymark, B.; Kreiger, M.; Pearce, M. Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions. *Mater. Des.* 2014, 54, 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
3. Mobaraki, A.; Nikoofam, M.; Mobaraki, B. The Nexus of Morphology and Sustainable Urban Form Parameters as a Common Basis for Evaluating Sustainability in Urban Forms. *Sustain.* 2025, 17. <https://doi.org/10.3390/su17093967>
4. Wang, Z.; Xu, M.; Du, J.; Jin, Y. Experimental and Numerical Investigation of Polymer-Based 3D-Printed Lattice Structures with Largely Tunable Mechanical Properties Based on Triply Periodic Minimal Surface. 2024. <https://doi.org/10.3390/polym16050711>
5. Mobaraki, B.; Vaghefi, M. Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel under Surface Explosion. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 2015, 47, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.01.003>

6. Mobaraki, B.; Vaghefi, M. The Effect of Protective Barriers on the Dynamic Response of Underground Structures. *Buildings* 2024, 14. <https://doi.org/10.3390/buildings14123764>
7. Butt, J.; Ghorabian, M.; Mohaghegh, V.; Shirvani, H. Finite Element Modeling and Mechanical Testing of Metal Composites Made by Composite Metal Foil Manufacturing. 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030081>
8. Tunay, M.; Bodur, M.F. Bending Behavior of 3D Printed Polymeric Sandwich Structures with Various Types of Core Topologies. 2023, 7, 285–294. <https://doi.org/10.30939/ijastech.1360280>
9. Eryildiz, M. Estimation of Three-Point Bending Behavior Using Finite Element Method for 3D-Printed Polymeric Sandwich Structures with Honeycomb and Reentrant Core. 2022, 6, 196–200. <https://doi.org/10.26701/ems.1101832>

Intel·ligència artificial en Disseny i a l'assignatura d'Expressió Gràfica

Isabel Sevilla Plana, Òscar Farrerons Vidal

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

L'article detecta com la intel·ligència artificial (IA) ha transformat l'educació, donant lloc a noves competències digitals, però també com pot afavorir el pensament crític. Ara bé, com qualsevol canvi estructural, això també comporta un canvi en la manera d'ensenyar i d'aprendre. Es destaca com la IA requereix fomentar la consciència sobre les implicacions ètiques i socials de l'eina en qüestió. Tot i que en els darrers anys han aparegut eines d'IA que poden generar models 3D mecànics a partir de text, de manera que la IA ja pot començar a afectar el procés del disseny i la manera de l'aprenentatge del disseny mecànic de forma concreta, els autors també manifesten que, en aquest moment, malgrat que ja ha sortit alguna eina IA dedicada específicament a això (com Aura), encara no són capaces de representar de manera fiable conceptes essencials del dibuix tècnic. Tot i així, caldrà estar expectant per veure l'evolució en el sector.

Paraules clau: Intel·ligència artificial, educació, tecnologia educativa, aprenentatge personalitzat, equitat educativa.

Abstract

The article detects how artificial intelligence (AI) has transformed education, giving rise to new digital skills, but also how it can promote critical thinking. However, like any structural change, this also entails a change in the way of teaching and learning. It highlights how AI requires promoting awareness of the ethical and social implications of the tool in question. Although in recent years AI tools have appeared that can generate 3D mechanical models from text, so that AI can already begin to affect the design process and the way of learning mechanical design in a concrete way, the authors also state that, at this time, although some AI tools specifically dedicated to this have already been released (such as Aura), they are still not capable of reliably representing

essential concepts of technical drawing. Even so, we will have to be expectant to see the evolution in the sector.

Keywords: Artificial intelligence, education, educational technology, personalized learning, educational equity.

1. Transformació educativa en l'era de la intel·ligència artificial

La tecnologia de la intel·ligència artificial (IA) ja està transformant profundament la forma en la qual aprenem i ensenyem. En automatitzar tasques bàsiques d'escriptura, classificació, avaluació i fins i tot processos creatius, aquesta tecnologia ens obliga a replantejar els fonaments del sistema educatiu contemporani (Recla, 2024). Lluny de ser una eina merament complementària, la IA s'està convertint en un agent capaç de redefinir rols, metodologies i competències essencials.

Un dels aspectes més rellevants és la proliferació de plataformes d'IA que ofereixen versions gratuïtes limitades i versions de pagament amb funcionalitats avançades. En aquest context, les llicències educatives emergeixen com una oportunitat clau per democratitzar l'accés a tecnologies que d'altra forma, quedarien restringides a organismes amb més recursos (Shah, 2023). Aquestes llicències poden obrir la porta a eines sofisticades de processament de llenguatge natural, generació de contingut personalitzat o anàlisi de dades, totes elles essencials per impulsar la recerca i la innovació pedagògica.

A més, la implementació d'IA en l'educació pot ajudar a personalitzar l'aprenentatge, adaptant-se a les necessitats individuals de cada estudiant. Això és especialment útil per a identificar i fer costat a aquells estudiants que puguin necessitar ajuda addicional, proporcionant recursos i activitats adaptades al seu ritme i estil d'aprenentatge. És important assegurar que aquestes tecnologies s'utilitzin de manera justa i equitativa, ja que els algoritmes poden contenir biaixos que perjudiquin determinats col·lectius o perfils

d'estudiants, i això fa imprescindible una supervisió humana crítica i constant.

La IA ofereix oportunitats per a reforçar la inclusió, millorar la qualitat de l'aprenentatge, l'avaluació i la gestió educativa, així com per a ampliar l'accés al coneixement. No obstant això, la seva implementació requereix marcs normatius sòlids que garanteixin un enfocament ètic, inclusiu i equitatiu (Mendes, 2025).

En els darrers anys, els xatbots han estat incorporats progressivament en l'àmbit universitari com a eina de suport a l'aprenentatge actiu, especialment en l'ensenyament de llengües. Aquests assistents virtuals permeten desenvolupar processos d'aprenentatge interactius i personalitzats, facilitant la pràctica continuada, la detecció d'errors i l'aprenentatge a partir dels mateixos. A més, la seva capacitat d'adaptació al nivell de coneixement i a les necessitats específiques de l'estudiant possibilita la proposta de continguts, exercicis i interaccions ajustats a cada perfil d'aprenentatge. Aquest plantejament metodològic és transferible a altres àmbits educatius, on els xatbots poden contribuir al reforç de continguts teòrics, al desenvolupament de competències i a la promoció de l'autoaprenentatge.

En els resultats que s'estan observant a l'aula de forma generalitzada, destaquen que la IA potència el rendiment acadèmic mitjançant la personalització de l'aprenentatge, la provisió de retroalimentació immediata i l'optimització d'estratègies d'estudi. A més, promou l'autonomia estudiantil, brindant eines per a un aprenentatge autodirigit amb suport continu. En termes d'accessibilitat, permet adaptar els materials educatius a les necessitats individuals.

Aquesta tecnologia no substitueix el paper dels docents, sinó que el transforma. La tendència apunta cap a ecosistemes educatius híbrids, on la tecnologia i el factor humà col·laboren per crear experiències d'aprenentatge més riques, personalitzades i eficients.

Com a docents, hem de saber aprofitar la potència de les eines d'IA sense perdre l'essència social i emocional de l'educació.

1.1. Noves competències digitals i pensament crític

La integració de la IA en l'educació també exigeix cultivar un nou conjunt de competències digitals. No n'hi ha prou amb aprendre a utilitzar eines tecnològiques; cal desenvolupar pensament crític per interpretar resultats generats per la IA, entendre els seus límits, avaluar-ne la fiabilitat i reflexionar sobre l'ètica de la seva aplicació.

Classe rere classe, emergeix una pregunta clau: com podem formar estudiants que no només facin servir la IA, sinó que la qüestionin i la gestionin de manera responsable?

Aquest repte implica un canvi profund en la manera d'ensenyar i aprendre, ja que els estudiants han de passar de ser simples usuaris de tecnologia a agents crítics i reflexius. Desenvolupar aquestes competències significa ensenyar-los a formular preguntes adequades a la IA, a interpretar correctament les respostes que els models generen, a detectar possibles biaixos o errors, i a decidir quan és necessari contrastar o validar la informació amb fonts fiables. També requereix fomentar la consciència sobre les implicacions ètiques i socials de l'ús de la IA, com la privacitat, la transparència dels algoritmes i l'impacte en la presa de decisions. Així, l'educació ha de combinar formació tècnica, estratègies de pensament crític i reflexió ètica, per tal que els estudiants no només utilitzin la IA de manera eficient, sinó que aprenguin a gestionar-la de forma responsable i crítica, preparant-los per un entorn professional on aquestes habilitats seran essencials en els anys vinents.

2. IA al sector del disseny

El creixent desenvolupament de la IA està impulsant una transformació profunda en els models de negoci de nombrosos sectors, inclòs el del

disseny. A través de l'anàlisi de grans volums de dades, aquesta tecnologia és capaç de detectar patrons i identificar tendències emergents que serveixen de suport i orientació en els processos creatius. La capacitat predictiva de la IA representa un valor afegit rellevant en l'àmbit del disseny, ja que permet anticipar les preferències, necessitats i expectatives dels usuaris.

Aquest fet facilita l'adaptació de les propostes de disseny a les demandes del mercat i contribueix a mantenir-les alineades amb l'evolució de les tendències. A més de millorar l'eficiència i la qualitat dels resultats, aquesta tecnologia obre noves oportunitats tant en l'àmbit creatiu com en el desenvolupament de nous models de negoci. Actualment, la IA s'aplica per generar dissenys cada vegada més personalitzats, optimitzats i rendibles. A continuació, es presenten algunes de les principals aplicacions d'aquesta tecnologia en aquest sector:

- Automatització de tasques repetitives: Permetent centrar-se en aspectes més creatius i estratègics del disseny.
- Generació d'idees i conceptes: Eines d'IA com els generadors d'imatges i text poden inspirar oferint visualitzacions ràpides d'idees o suggerint nous enfocaments i conceptes, la qual cosa pot ser especialment útil en les etapes inicials d'un projecte de disseny.
- Personalització en massa: Ajudar a personalitzar dissenys a gran escala, ajustant productes o experiències d'usuari a les necessitats i preferències individuals sense el cost elevat que tradicionalment implicaria la personalització manual.
- Optimització del disseny: Algoritmes d'IA poden analitzar grans quantitats de dades per a identificar tendències i preferències dels usuaris, la qual cosa permet prendre decisions informades i

optimitzar les seves creacions per a maximitzar l'eficàcia i la satisfacció de l'usuari.

- Accessibilitat en el disseny: L'IA està fent el disseny més accessible, permetent a més persones crear i personalitzar les seves pròpies solucions sense necessitar habilitats tècniques avançades.

2.1. IA per el disseny mecànic a l'enginyeria

Segons el departament d'Enginyeria Mecànica del Massachusetts Institut of Technology (MIT), l'ús de “machine learning” i IA per al disseny i l'enginyeria és cada cop més central, perquè accelera dissenys i simulacions, redueix costos de desenvolupament, i permet un control de qualitat i manteniment predictiu més robust.

la IA no és només útil en la fase de disseny, sinó també en tot el cicle de vida del producte, des del concepte, la simulació fins a la fabricació i manteniment.

Aquestes tendències confirmen que la integració de la IA en el disseny mecànic i l'enginyeria ha entrat en una fase de maduresa, en què la col·laboració humà-IA pot transformar tant la creativitat i l'eficiència com la fiabilitat i la sostenibilitat dels processos.

En els darrers anys han aparegut eines d'IA que poden generar models 3D mecànics a partir de text, un avanç que comença a transformar el disseny i la creació de peces. Aquestes plataformes permeten descriure una peça amb paraules, per exemple, “una brida de 50 mm amb 6 forats distribuïts uniformement” i obtenir un model CAD editable en 3D, llest per a simulacions o fabricació.

Aquestes tecnologies acceleren el procés de disseny, permeten explorar múltiples variants de manera ràpida i faciliten el prototipat sense haver de construir cada model manualment. A més, poden servir com a suport per a estudiants i professionals: ajuden a comprendre

millor consignes de disseny, proposar estratègies de modelatge i generar idees inicials que després es poden perfeccionar manualment.

Tot i això, encara tenen limitacions. Els models generats poden contenir errors i necessiten supervisió humana. La IA no substitueix l'expertesa de l'enginyer o enginyera, però sí que pot ser un aliat poderós per agilitzar processos, fomentar la creativitat i obrir noves possibilitats.

3. SolidWorks i IA

La indústria del disseny i l'enginyeria està vivint una revolució gràcies a la IA. SolidWorks, un dels softwares CAD (Computer-Aided Design) més utilitzats al món, ha fet un pas endavant amb AURA, la seva nova eina impulsada per IA.

SolidWorks i 3DEXperience continuen evolucionant i incorporen IA per a accelerar el treball de milers d'usuaris. AURA és l'assistent digital amb IA creat per Dassault Systèmes. SolidWorks és una marca de Dassault Systèmes SA, líder mundial en solucions 3D que ajuden milions d'enginyers i dissenyadors a tenir èxit a través de la innovació.

AURA és un assistent conversacional especialitzat en disseny CAD, concebut com una eina similar a ChatGPT però orientada específicament a l'àmbit tècnic. Permet resoldre dubtes de manera immediata i ofereix suport directe en processos de disseny, com ara la generació de plànols, renders i operacions 2D i 3D a partir de comandes simples, a més, de que facilita l'automatització de tasques repetitives, contribuint a l'estalvi de temps i recursos. El seu objectiu principal és agilitzar l'accés a la informació, millorar la comunicació tècnica i optimitzar el treball diari. Tot això es duu a terme sense necessitat de sortir de la plataforma **3DEXperience** de SolidWorks i garantint el compliment dels estàndards de seguretat corporativa establerts per la companyia.

Aquesta eina actua com a assistent dins de l'entorn CAD, amb l'objectiu de simplificar i accelerar el procés de disseny mecànic. Aquesta tecnologia permet generar suggeriments automàtics per a geometries, assemblatges i operacions de modelatge, oferint recomanacions basades en el context del projecte i en pràctiques òptimes de disseny. Aquesta eina d'IA pot ajudar a crear esquemes inicials de peces, detectar conflictes o interferències entre components en assemblatges complexos, proposar configuracions eficients per a mecanismes i optimitzar paràmetres de disseny per aconseguir estalvi de materials o millorar el rendiment. A més, integra funcionalitats de suport educatiu, com explicacions pas a pas sobre com executar operacions de modelatge o consells sobre normes de dibuix tècnic, facilitant l'aprenentatge de SolidWorks tant a estudiants com a professionals. Tot això converteix Aura en un aliat intel·ligent que combina assistència automatitzada, eficiència en el disseny i reforç de coneixements tècnics dins del flux de treball CAD.

4. IA a l'assignatura d'Expressió Gràfica

Expressió Gràfica és una assignatura de primer curs impartida als graus d'Enginyeria Biomèdica, Enginyeria de Materials, Enginyeria Elèctrica, Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica, Enginyeria Mecànica i Enginyeria Química, i constitueix un pilar fonamental en la formació inicial dels futurs enginyers i enginyeres. La matèria combina una part teòrica, centrada en l'estudi de la normalització i de la geometria de l'espai aplicada al dibuix tècnic, amb una part pràctica en què l'estudiantat utilitza el programari de disseny mecànic SolidWorks. Aquest entorn CAD avançat, basat en plataforma Windows, permet la generació intuïtiva i eficient de models tridimensionals, assemblatges i plànols tècnics.

D'acord amb la guia docent, la competència transversal principal que es treballa a l'assignatura és l'autoaprenentatge. En aquest marc, des

del Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny l'any passat es va estudiar la idea d'incorporar un xatbot conversacional com a eina de suport per facilitar la preparació de la part teòrica de l'assignatura. Aquesta iniciativa s'inscriu dins d'una visió de futur orientada a la incorporació progressiva d'eines digitals que contribueixin a millorar l'experiència d'aprenentatge i a preparar l'estudiantat per a un entorn professional en què la col·laboració entre enginyers i sistemes intel·ligents serà cada vegada més habitual.

Malgrat l'evolució constant de les tecnologies digitals, la integració de la intel·ligència artificial en aquesta assignatura és actualment més limitada que en altres àmbits menys condicionats per la producció de plànols normatius. Aquesta limitació es deu al fet que els models d'IA disponibles encara no són capaços de representar de manera fiable conceptes essencials del dibuix tècnic, com ara les vistes normalitzades d'una peça, la definició correcta de toleràncies, seccions o acotacions conformes a la normativa vigent, ni de generar plànols que compleixin els estàndards industrials establerts.

Tanmateix, s'ha observat un ús creixent i efectiu dels models de llenguatge per part de l'estudiantat com a recurs de suport a l'aprenentatge. Aquests sistemes s'empren per resoldre dubtes relacionats amb l'enfocament del disseny de les peces proposades, per obtenir estratègies de modelatge en geometries complexes, per aclarir la interpretació de les consignes pràctiques o per aprofundir en conceptes teòrics que reforcen la comprensió del dibuix tècnic. Aquest ús complementari de la intel·ligència artificial no substitueix el desenvolupament de la competència gràfica pròpia de l'assignatura, però contribueix a reforçar el procés d'aprenentatge i a potenciar l'autonomia de l'estudiantat.

Referències

- Recla. Xarxa d'Educació Contínua de Llatinoamèrica i Europa. *Integració de la Intel·ligència Artificial en l'educació: Avanços i desafiaments*.
<https://recla.org/blog/ia-en-educacion/>
- Shah. P. (2023 September 6). *AI and the future of Education: Teaching in the Age of Artificial Intelligence*. Wiley John + Sons.
- EDUTEC. (2025 Marzo 27). *Revista Electrónica de Tecnología Educativa*.
<https://edutec.es/revista/index.php/edutec-e/issue/view/133>
- UNESCO. (2025 January 23) https://www.unesco.org/en/articles/unesco-highlights-role-artificial-intelligence-education-congreso-futuro-2025?utm_source=chatgpt.com
- Wilson. A. MIT Meche. (2025 September 6). *Department of Mechanical Engineering*. <https://meche.mit.edu/news-media/ai-and-machine-learning-engineering-design>
<https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2025/10/whats-new-in-solidworks-2026-collaboration-and-data-management.html>
- Beltran, M., Olmedo, N., Farrerons, Ó., El Madafri, I., Peña, M. (2024). Explorant el potencial de la IA generativa en l'educació: un xatbot per a l'aprenentatge d'expressió gràfica. *VI Jornada de Recerca Enginyeria Gràfica i de Disseny UPC*.

Microplastic Drinking Water Pollution Impacts and Detection Methods: A Literature Review

Ariana Arvelo Marchán

Màster en Disseny Avançat - Barcelona (UPC-UB)

Mireia Puig-Poch, Joan A. López

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Karen T. Bayona, Jasmina Casals-Terré

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Abstract

Microplastics, defined as plastic particles smaller than 5 mm, have become a growing source of public concern due to their environmental persistence and potential health impacts, including associations with endocrine disruption and other adverse health effects such as cancer. This literature review investigates the prevalence of microplastics in residential tap water and evaluates current and emerging detection methods. This study synthesized the recent literature to assess the global prevalence and impact of microplastics in residential drinking water, and to evaluate standard detection methods such as Raman spectroscopy and FTIR. Novel techniques such as agglomeration and fluorescent dye tagging were also assessed on their potential to address the limitations of current methods, which are often resource-intensive and require specialized equipment. The study found a lack of standardized testing protocols which complicates cross-study comparisons, highlighted the need for affordable, scalable, and accessible testing technologies, and concluded that advancing detection technologies is crucial for democratizing information access. Future research should focus on enhancing the efficiency, affordability, and portability of microplastic detection methods to both enable public health intervention and address the increasing demand for actionable data on microplastic contamination in residential tap water across the globe.

Keywords: Drinking water; Tap water; Microplastics; Nanoplastics; Plastic pollution; Microplastics testing; Public health.

1. Introduction

The ubiquity of microplastics in the global environment has been widely studied due to its environmental impact (Hale et al., 2020), but it has recently become a growing public health concern amidst emerging reports of its link to negative health outcomes (Leslie et al., 2022; Winiarska et al., 2024). These health impacts disproportionately affect vulnerable populations due to their increased exposure to pollution, making the matter one of socioeconomic justice as well (Nohara et al., 2024). Microplastics find their way into the oceans, lakes, and water systems because of the weathering and breakdown of consumer products such as cosmetics, toys, bags, bottles, clothing, and other sources which are widely made from plastic.

The term “microplastics” (MPs) refers to plastic particles that are 5mm in size or smaller (Andrady, 2011; Picó & Barceló, 2019). There is no standard for their lower size limit, and different studies measure different size ranges, however the range is considered to extend to particles as small as 1 µm to 0.1 µm (Picó & Barceló, 2019; Pivokonsky et al., 2018). The most common microplastic materials include polyethylene terephthalate (PET), polystyrene (PS), polyester (PES), polyethylene (PE), polyvinyl chloride (PVC), and polypropylene (PP) (Nohara et al., 2024). MP exposure in humans has been linked to abnormal body processes such as early puberty, infertility, obesity, heart disease, cancer, respiratory disorders, and irritable bowel disease (Winiarska et al., 2024).

There is an emerging body of scientific literature that indicates the existence of microplastic pollution in the majority of residential tap (TW) and bottled water (BW) worldwide (Gambino et al., 2022; Oßmann et al., 2018; Picó & Barceló, 2019), increasing the likelihood of MP exposure and consumption. At the same time, researchers have conclusively found MP's within human bodies (Leslie et al., 2022;

Özsoy et al., 2024), increasing the range of data to support growing public health concerns. However, a major issue arises when trying to find information about a locality's TW microplastic contents, as most localities and water plants do not test for or report MP contents— in 2022, California became the first legislature to require testing and reporting of MP content in source water in the world (Becker, 2022).

Given the widespread presence of MPs, fast and accurate detection of them is paramount. However, traditional detection methods such as visual identification using microscopy, Raman spectroscopy (RM), or Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) (Motalebizadeh et al., 2024) require filtering, sample preparation, comparisons of results to standard references, and expensive and specialized lab equipment as well as the training to use it. To test for MP presence in a residence's TW, a prohibitively expensive testing kit must be ordered to collect samples that are then shipped out to a testing facility (Heffernan, 2024; Sosnowski, 2024). This indicates a need for further research into novel testing methods that have the potential for miniaturization and use at home with the goal of information accessibility for consumers and vulnerable populations.

1.1. Objectives

Based on this background, the research objectives of the study were established. The study aimed to discuss the need for information about microplastic pollution in residential tap water by investigating the prevalence of microplastic contamination in said water sources. In addition, it sought to identify both current and novel methods to determine microplastic presence in tap water. And, lastly, the study aimed to identify any gaps and underdeveloped areas in the literature that are subject to further research.

1.2. Theoretical foundation

The study was conducted with the framework of information accessibility and democratization as a large part of the analysis criteria. Other factors being considered are cost-effectiveness, accuracy, speed, and material availability.

1.3. Research questions

In order to achieve the objectives of the study, as delineated in section 1.1. *Objectives*, the following research questions were identified:

RQ1 How prevalent are microplastics in residential tap water?

RQ2 What is the impact of the presence of microplastics in residential tap water?

RQ3 What are the current methods for identifying microplastic pollution in water?

RQ4 Are there novel technologies or methods with the potential to identify microplastic pollution in water?

RQ5 What are the limitations of the current research?

2. Methodology

A systematic literature review was conducted to explore the prevalence of microplastics in tap water, their associated health effects, and the methods used to detect them. To ensure a comprehensive assessment of current research, five scientific databases and digital libraries were searched in the process of the review: Science Direct, Web of Science, Google Scholar, Scopus, and PubMed, where the reference lists of the identified papers were reviewed and manually searched for additional publications. The review defined keywords to establish search criteria that allowed for the identification of the relevant literature. These keywords were applied to obtain search results that contained: 'microplastics' and 'nanoplastics' in addition to

other phrases such as 'pollution', 'tap water,' 'drinking water,' 'identification,' 'health effects,' 'impact,' 'novel testing methods,' or 'testing methods.'

The articles were then chosen for review based on the following criteria: publication date later than January 2010, explicit mention of microplastics pollution in water, explicit mention microplastics health impacts, usage of one or more of the conventional testing methods such as FTIR, RM, and SEM-EDS, and relevancy to the study's research questions. Once the sources were culled by a systematic review of each article's merit, the remaining entries were read and analyzed thoroughly, guided by the research questions and objectives.

3. Findings

3.1. Prevalence and impact of microplastics

The near-ubiquitous presence of microplastics in drinking water has been widely reported upon. Picó and Barceló found that 81% of 159 samples of globally sourced tap water tested positive for the presence of MPs. Pivokonsky et al found that MPs were present in every drinking water sample collected from urban areas of the Czech Republic. Gambino et al reported on the presence of MPs in drinking water in Germany, USA, Mexico City, France, China, Japan, Thailand, Italy, India, and Saudi Arabia.

However, some studies dispute this and claim that the prevalence of MPs in TW is overexaggerated (Kirstein et al., 2021). These discrepancies are commonly attributed to a lack of standardized procedure for sample preparation as well as the range of microplastics tested for, as they vary in size, shape, and material. Studies have reported that over 90% of their detected MP particles were <5µm (Oßmann et al., 2018), a size below which these studies did not test for.

Due to their large surface area and hydrophobicity, microplastics are known to absorb and carry pollutants such as PFAS, BPA, BHA, flame retardants, plasticizers, heavy metals, and phthalates (Gambino et al., 2022). These chemicals are considered Endocrine Disrupting Chemicals (EDCs), which are known to trigger abnormal body processes and are linked to early puberty, obesity, heart disease, cancer, infertility, respiratory disorders, and irritable bowel disease and thus link MP exposure to these health outcomes (Winiarska et al., 2024). MPs have been found in human blood, brains, reproductive organs, stomachs, and amniotic fluid (Leslie et al., 2022; Özsoy et al., 2024; Winiarska et al., 2024). The health effects of MPs are a novel research field, and information about the long-term effects of MP exposure is still emerging.

3.2. The state of the art

No standardized method for the sampling and extraction of microplastics has been established, but there are well-understood general steps (Herbort & Schuhen, 2017). Tap water samples must first be treated to separate the MP particles for analysis. There are several separation approaches, the most common of which is filtration, and include magnetic separation, electrostatic separation, size-exclusion chromatography, field-flow fractionation, and density separation (Adhikari et al., 2022). The filtered MPs are then typically analyzed using one or several of the following methods: 1) Light microscopy, which involves visually detecting MPs based on shape, color, and, size, 2) Scanning electron microscopy (SEM), which uses an electron beam to analyze MP surfaces and has high labor, equipment, and preparation costs, 3) RM, which measures particle structure using photon scattering and is the preferred method for detecting MPs <20µm, 4) Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry (Pyr-GC-MS), which thermally decomposes MPs to identify their structural composition, 5) FTIR, a common non-destructive analytical technique that uses molecular

vibration spectra to characterize MPs, and 6) Flow cytometry, which suspends MPs in an aqueous solution and uses lasers to produce fluorescence in the particles, although this method does not detect every MP material (Adhikari et al., 2022; Elsayed et al., 2021; Gambino et al., 2022). Destructive analytical techniques identify the composition of the MP sample without measuring the number, shape, or size of the MPs while non-destructive techniques allow researchers to quantify, chemically identify, and analyze the shape and size of MPs. These methods also vary in accuracy, information provided, and effectiveness due to the variable and diverse nature of MP particles. Additionally, these methods are laboratory-based, time-consuming, and resource intensive (Motalebizadeh et al., 2024). A key challenge in detecting MPs through conventional methods is their wide range of sizes and shapes, which can lead to biased detection as well as a somewhat arbitrary reporting— MPs detected vary in size by a large margin as well as material and shape (Adhikari et al., 2022). These laboratory-based methods are also ill-equipped for processing large samples (Maes et al., 2017). Lastly, the lack of a true standard analytical technique adds further complexity to the interpretation of results across varying studies.

3.3. Review of experimental detection methods

The detection of smaller MPs, sometimes referred to as nanoplastics (NPs), has become a challenge due to the large possible range of MP sizes and sample separation methods, meaning that studies can unknowingly omit NP detection (Adhikari et al., 2022). A potential solution is a novel process called agglomeration, which seeks to cluster MP particles into larger units that allows for easier detection and removal.

The enlarged MP agglomerates can then be detected and even separated from water sources more easily as they become more visible, and in some cases, buoyant (Herbort et al., 2018). Novel studies

show agglomeration can be achieved through a pathway seen in Figure 1– a organosilane-based process in which the added reactants have high affinity for inert MPs while being highly reactive in water (Schuhen et al., 2018). This forms a stable three-dimensional network of hybrid MP-silica gel that is around 666 times the volume of the initial MP particles (Herbort et al., 2018). Researchers have shown that it is possible to agglomerate and remove inert MPs from wastewater, which is much more polluted than the TW focused on in this study and is thus a promising technique for low-resolution MP detection in TW.

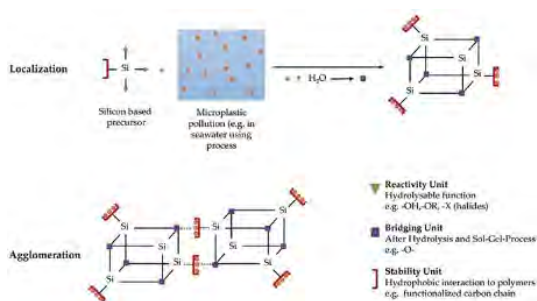


Figure 1. A mechanism for agglomeration of MP particles. Source: Schuhen et al., 2018.

Another novel low-resolution MP detection method, known as fluorescent tagging, has garnered interest from researchers as a simple, cost-effective protocol for efficiently quantifying MPs in samples. The process uses a lipophilic fluorescent dye, most commonly Nile Red, to stain MPs in water samples which are then filtered to isolate the MPs for analysis. The dye composition is selected based on affinity for MP adsorption and the intensity of its fluorescence. This enables the visualization of MPs under blue light, and allows for slight differentiation between MPs as different polymers fluoresce in different colors (Maes et al., 2017). This method could effectively make MPs >100µm visible to the naked eye, and NPs

potentially visible under a microscope. Another staining method utilizes fluorescent-tagged peptides to detect polystyrene to successful results (Motalebizadeh et al., 2024). However, while this technique can be used to rapidly estimate the quantity of MPs in a sample, it does not allow for the identification of MP composition. The method also requires several phases of sample preparation, and the Nile Red dye must be incubated between 30 minutes to an hour (Elsayed et al., 2021).

4. Conclusions

The widespread presence and potential impact of microplastics has been established by a growing body of research. There is an urgent need for cheaper, faster, and more easily applied methods that could be used for at-home testing— a need that is beyond the capabilities of the current technology given that the state of the art is prohibitively labor, resource, and space-intensive. Current technology is unable to meet the demand for information democratization that is needed by consumers and novel research methods have shown promise in meeting this. Future research on this topic should focus on possible combinations of novel methods to ensure consistent accurate results that can be rendered legible to the average user, and investigate the potential optimization as well as the portability, and material accessibility of these methods.

References

- Adhikari, S., Kelkar, V., Kumar, R., & Halden, R. U. (2022). Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: A mini-review. *Polymer International*, 71(5), 543–551. <https://doi.org/10.1002/pi.6348>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>

- Becker, R. (2022, September 7). California approves microplastics testing of drinking water sources. *CalMatters*. <http://calmatters.org/environment/2022/09/california-microplastics-testing-drinking-water-sources/>
- Elsayed, A. A., Erfan, M., Sabry, Y. M., Dris, R., Gaspéri, J., Barbier, J.-S., Marty, F., Bouanis, F., Luo, S., Nguyen, B. T. T., Liu, A.-Q., Tassin, B., & Bourouina, T. (2021). A microfluidic chip enables fast analysis of water microplastics by optical spectroscopy. *Scientific Reports*, 11(1), 10533. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89960-4>
- Gambino, I., Bagordo, F., Grassi, T., Panico, A., & De Donno, A. (2022). Occurrence of Microplastics in Tap and Bottled Water: Current Knowledge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095283>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Heffernan, T. (2024, April 19). The Best Water Quality Test Kit for Your Home. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/wirecutter/reviews/best-water-quality-test-kit-for-your-home/>
- Herbort, A. F., & Schuhen, K. (2017). A concept for the removal of microplastics from the marine environment with innovative host-guest relationships. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11061–11065. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7216-x>
- Herbort, A. F., Sturm, M. T., Fiedler, S., Abkai, G., & Schuhen, K. (2018). Alkoxy-silyl Induced Agglomeration: A New Approach for the Sustainable Removal of Microplastic from Aquatic Systems. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(11), 4258–4270. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1287-3>
- Kirstein, I. V., Hensel, F., Gomiero, A., Iordachescu, L., Vianello, A., Wittgren, H. B., & Vollertsen, J. (2021). Drinking plastics? – Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and Py-GCMS. *Water Research*, 188, 116519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116519>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>

- Maes, T., Jessop, R., Wellner, N., Haupt, K., & Mayes, A. G. (2017). A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*, 7(1), 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>
- Motalebizadeh, A., Fardindoost, S., & Hoorfar, M. (2024). Selective on-site detection and quantification of polystyrene microplastics in water using fluorescence-tagged peptides and electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136004>
- Nohara, N. M. L., Ariza-Tarazona, M. C., Triboni, E. R., Nohara, E. L., Villarreal-Chiu, J. F., & Cedillo-González, E. I. (2024). Are you drowned in microplastic pollution? A brief insight on the current knowledge for early career researchers developing novel remediation strategies. *Science of The Total Environment*, 918, 170382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170382>
- Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., & Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*, 141, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
- Özsoy, S., Gündoğdu, S., Sezigen, S., Tasalp, E., Ikiz, D. A., & Kideys, A. E. (2024). Presence of microplastics in human stomachs. *Forensic Science International*, 364, 112246. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.112246>
- Picó, Y., & Barceló, D. (2019). Analysis and Prevention of Microplastics Pollution in Water: Current Perspectives and Future Directions. *ACS Omega*, 4(4), 6709–6719. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00222>
- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., & Janda, V. (2018). Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of The Total Environment*, 643, 1644–1651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>
- Schuhen, K., Sturm, M. T., Herbort, A. F., Schuhen, K., Sturm, M. T., & Herbort, A. F. (2018). Technological Approaches for the Reduction of Microplastic Pollution in Seawater Desalination Plants and for Sea Salt Extraction. In *Plastics in the Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81180>
- Sosnowski, S. (2024, March 8). *Are Microplastics in My Drinking Water?—The Ultimate Guide*. SimpleLab Tap Score. <https://mytapscore.com/en-es/blogs/tips-for-taps/are-microplastics-in-my-drinking-water>

Winiarska, E., Jutel, M., & Zemelka-Wiacek, M. (2024). The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research*, 251, 118535.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

De Residu a Filament: Anàlisi de la degradació del PLA i les barreres del reciclatge distribuït de residus d'impressió 3D

Clara Iriondo Peguerols

Màster en Disseny Avançat - Barcelona (UPC-UB)

Mireia Puig-Poch

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

La fabricació additiva mitjançant la tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) ha portat a un augment en el consum de termoplàstics com el PLA, provocant una preocupació creixent pels residus plàstics que genera. Aquest treball avalua la viabilitat tècnica i econòmica del reciclatge distribuït de peces de PLA per crear filaments nous. Els resultats mostren que tot i que el PLA és tolerant a l'extrusió repetida (amb pèrdues registrades fins a cinc cicles), el repte sorgeix en el cicle tancat de FDM, ja que l'estrès tèrmic i mecànic del procés provoca una caiguda significativa de la viscositat impeding la imprimibilitat del filament. A més, el sistema es veu obstaculitzat per la manca d'estàndards de qualitat, les complexitats logístiques de recollida i la manca d'investigació sobre els efectes del reciclatge en els materials. Les solucions clau detectades passen per la barreja del PLA reciclat amb PLA verge i la implementació de plataformes de reciclatge de codi obert amb protocols de reciclatge inclosos per reduir l'impacte ambiental.

Abstract

Additive manufacturing through Fused Deposition Modeling (FDM) technology has caused an increase in the consumption of thermoplastics such as PLA, generating a growing concern regarding the plastic waste it generates. This work evaluates the technical and economic viability of distributed recycling of PLA parts to create new filaments. The results show that even though PLA is tolerant to repeated extrusion (with losses recorded up to five cycles), the challenge arises in the FDM closed loop, since the thermal and mechanical

stress of the process causes a significant drop in viscosity, preventing the filament's printability. Furthermore, the system is hampered by the lack of quality standards, the logistical complexities of collection, and the lack of research on the effects of recycling on materials. The key solutions detected involve blending the recycled PLA with virgin PLA and the implementation of open-source recycling platforms with recycling protocols included to reduce the environmental impact.

1. Introducció

La fabricació additiva és una tecnologia que permet la producció d'objectes complexos de forma descentralitzada i que ha revolucionat la indústria en els últims anys. Es preveu que el consum mundial de sistemes d'impressió 3D, programari de materials i temes relacionats creixi un 22,3% anualment en els pròxims anys (Khosravani & Reinicke, 2020). Aquest sistema de producció inclou diferents tecnologies, sent la FDM (Fused Deposition Modeling) amb polímers la predominant arreu del món (Hussein & Sadiq, 2025, Prasad et al., 2024). Tot i considerar-se un sistema de producció més sostenible a causa de la seva tecnologia additiva en lloc de sostractiva i a la descentralització que implica, el seu impacte ambiental no està ben documentat. Tot i això, se sap que els residus generats i l'excés de material de les peces son el segon factor d'impacte ambiental més important per la tecnologia FDM (Pakkanen et al., 2017, Khosravani & Reinicke, 2020).

L'objectiu d'aquesta monografia és analitzar les solucions circulars i de reciclatge implementades actualment pels objectes de PLA fabricats mitjançant tecnologia FDM, amb la finalitat d'identificar les limitacions per a la seva implementació i trobar estratègies viables per la reutilització i el reciclatge domèstic o local d'aquests polímers. Al llarg d'aquesta monografia s'explorà la relació entre el PLA i les limitacions de reciclatge i com es pot donar solució a aquest problema.

2. Metodologia

Per desenvolupar aquesta investigació, s'ha dut a terme una recerca de la literatura científica sobre el tema a través de la base de dades *Scopus*, utilitzant diferents paraules clau relacionades amb el que es volia trobar com per exemple: *Additive manufacturing*, *environmental impact*, *waste management*, *circular-loop*, entre altres.

En primer lloc, es van seleccionar 38 articles relacionats amb el tema principal, que posteriorment es van classificar en 6 temes principals per tal d'organitzar la informació i detectar quins articles cobrien més d'un tema i en quins temes mancava informació. Aquests 6 temes van ser: Filaments sostenibles, processos d'impressió 3D, impacte ambiental, mètodes de reciclatge, limitacions i solucions. Un cop classificats, es va procedir llegint els resums de cada article per identificar els que podien ser més rellevants per la investigació, i d'aquesta forma es van descartar els que repetien informació, els que no es tenia accés, i els que es desviaven del tema. Finalment, es van revisar 8 articles publicats entre el 2017 i el 2025, garantint així l'actualitat dels estudis seleccionats.

3. Context

L'augment de l'ús de la fabricació additiva durant els darrers anys s'ha vist reflectit en diverses indústries i a escala domèstica, i es preveu que el seu valor augmenti significativament (Hussein & Sadiq, 2025). En aquest context, l'ús dels termoplàstics està incrementant exponencialment, la qual cosa està provocant un augment de generació de residus plàstics (Cruz Sanchez et al., 2017) gestionats inadequadament (Hussein i Sadiq 2025). Per altra banda, els esforços de recerca s'han centrat principalment a aconseguir la imprimibilitat de filaments d'impressió 3D biodegradables o compostables, així com la transformació de residus plàstics en filaments per la impressió 3D, mentre que falten estudis que mesurin l'impacte ambiental de la

tecnologia. Aquest varia segons el procés i el material utilitzat (Khosravani & Reinicke, 2020) i pot considerar diferents factors com el consum d'energia, el cicle de vida del producte, els residus, la petjada hídrica, el potencial d'escalfament global i la contaminació atmosfèrica (Khosravani & Reinicke, 2020). Actualment, l'actitud del consumidor davant la gestió dels residus no es posa en dubte (Pakkanen et al., 2017), però davant d'aquesta problemàtica es requereixen noves solucions, de manera que la producció sostenible i la investigació en mètodes innovadors de reciclatge i gestió de polímers s'han convertit en elements crucials pel futur d'aquesta tecnologia.

4. La tecnologia i el material

La tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) – també coneguda com a Fused Filament Fabrication (FFF) – és una tècnica d'impressió 3D que consisteix a escalfar i extrudir la matèria primera a través d'un broquet d'alta temperatura, aplicant-li pressió per crear capes individuals, començant per la base i construint cap a la part superior. (Khosravani & Reinicke, 2020). Aquesta tècnica està dissenyada per utilitzar materials termoplàstics, que són polímers capaços de fondre's o estovar-se quan s'exposen a la calor (a temperatures fàcilment assolibles mitjançant l'aplicació d'energia tèrmica) i de tornar-se sòlids en refredar-se. El procés comença aplicant calor al material al cap d'extrusió, provocant una transformació de fusió en el polímer. Posteriorment, la substància és forçada a sortir i es diposita sobre la superfície a una velocitat i una mida específiques (Hussein & Sadiq, 2025).

Els filaments d'impressió tridimensional més utilitzats són l'ABS (Acrilonitril Butadiè Estirè) i el PLA (Àcid Polilàctic). Mentre que l'ABS és reconegut per la seva duresa i lleugeresa, el PLA és reconegut per les seves excel·lents propietats de resistència a l'impacte (Hussein & Sadiq, 2025). A més, el PLA està fet a partir de la polimerització de

sucres i midons, la qual cosa el fa biodegradable i reciclable (Pakkanen et al., 2017), tot i que la seva degradació requereix temperatures elevades (50–60 °C) que s'aconsegueixen fàcilment en instal·lacions de compostatge industrials però que poques vegades es produeixen en entorns naturals (Liu et al., 2025). Les aplicacions més comunes del PLA inclouen el prototipat, les peces de consum i els embalatges (Pongwisuthiruchte & Potiyaraj, 2025). En aquest sentit, la tecnologia ha emergit com una eina indispensable en diverses indústries, especialment en el prototipat ràpid. La capacitat de transformar ràpidament dissenys digitals en prototips físics permet un procés de disseny iteratiu, accelerant el cicle de desenvolupament de productes i reduint significativament els temps de lliurament (Prasad et al., 2024).

5. Mètodes de reciclatge i viabilitats a petita escala

Hi ha diferents mètodes per gestionar l'increment de residus plàstics. Aquests inclouen: Reciclatge primari (re-extrusió), reciclatge mecànic, reutilització química i producció d'energia a través de processos tèrmics com la combustió, la piròlisi o la gasificació (Hussein & Sadiq, 2025). Els processos de reutilització química i producció d'energia es descarten en aquest estudi com a solució vàlida, ja que exigeixen un nivell més alt de consum d'energia que el reciclatge mecànic (Prasad et al., 2024) i són solucions més complexes difícils d'implementar a petita escala.

El reciclatge primari permet la recuperació de restes de polímer no contaminades que conserven les propietats equivalents a les del material original, i s'aplica a restes no utilitzades durant el procés de fabricació. És un reciclatge molt usat en moltes plantes de producció (Hussein & Sadiq, 2025). Tot i això, està pensat per anar reciclant a mesura que es produeix el producte i per materials no contaminats, per la qual cosa no s'aplica a productes finals ja impresos.

Per altra banda, el reciclatge mecànic està pensat per residus que poden incloure impureses o estar contaminats i és l'estratègia més adequada per a la gestió de residus plàstics relativament nets i homogenis (en comparació a alternatives d'abocament o incineració) (Hussein & Sadiq, 2025), (Cruz Sanchez et al., 2017). El procés de reciclatge mecànic implementat en centres de reciclatge segueix 5 etapes diferents: Separació per tipus de polímers, descontaminació, trituració, fosa, i extrusió de nous productes plàstics. En l'àmbit domèstic, s'ha demostrat que només amb una trituradora i una extrusora és possible convertir els residus plàstics en noves matèries primes (Pakkanen et al., 2017), de manera que tot el procés es pot reduir en dos etapes: (a) triturar els residus per reduir la mida; (b) fondre i extrudir-los amb una extrusora de filament (Khosravani & Reinicke, 2020). A més, un estudi realitzat per (Kreiger et al. 2014) demostra que el reciclatge distribuït utilitza menys energia que l'escenari ideal per un reciclatge centralitzat. En aquest estudi s'observa que els estalvis pel reciclatge distribuït superaven el 80%, i conclou que el potencial de l'adopció generalitzada del reciclatge domèstic representa una nova via cap a un futur de fabricació distribuïda amb un impacte ambiental menor que el sistema actual.

Tot i així, el procés de reciclatge no és uniforme i varia significativament depenent del tipus de polímer (Prasad et al., 2024), la qual cosa implica limitacions a escala de versatilitat i adaptabilitat, fent que sigui difícil trobar un únic procés de reciclatge per residus de diferents materials. A més, els materials polimèrics estan exposats a degradacions termo-mecàniques i termo-oxidatives que provoquen canvis en les característiques estructurals i morfològiques dels polímers, com ara les propietats mecàniques, reològiques i tèrmiques, el grau de cristal·linitat, la viscositat i la composició molecular (Cruz Sanchez et al., 2017). Davant d'això, s'ha trobat que pot ser que no sigui possible utilitzar filament completament reciclat, però amb una

barreja de material verge i reciclat és pot arribar a una solució acceptable ja que pot ajudar a recuperar les característiques perdudes (Pakkanen et al., 2017), (Cruz Sanchez et al., 2017). De fet, polímers d'alta rigidesa com el polipropilè (PP) el PLA i l'ABS s'han reciclat amb èxit en filaments mitjançant tècniques de reciclatge (Khosravani & Reinicke, 2020).

5.1. Limitacions tècniques del reciclatge de PLA

Tot i que el reciclatge s'ha identificat com l'enfocament més beneficiós per millorar el valor dels plàstics postconsum (Hussein & Sadiq, 2025), també presenta certes limitacions en l'àmbit de degradació del material, d'aplicació a petita escala i de logística.

Com s'explica anteriorment, el PLA és un material biodegradable, la qual cosa dificulta el seu ús un cop reciclat. Això es deu al fet que les propietats mecàniques dels plàstics biodegradables o compostos impresos en 3D no són tan bones com les dels materials de matriu pura, i per això se'ls sol afegir reforços. Aquests reforços, tot i que milloren les propietats mecàniques, redueixen els costos i ajusten la densitat i el pes del material, també augmenten la viscositat de la massa fosa, disminueixen l'adhesió entre capes, i a mesura que augmenta el contingut dels reforços, disminueixen l'extrudibilitat i les propietats mecàniques (Pakkanen et al., 2017).

Quan parlem de reciclatge parlem de transformació del material, i la transformació implica degradació (Pakkanen et al., 2017). Per entendre la degradació que pateix el PLA després de diferents cicles de reciclatge s'han analitzat dos articles que ho estudien. En primer lloc (Cruz Sanchez et al., 2017) estudia la degradació del PLA causada pel reprocessament tèrmic i mecànic de 5 cicles de reciclatge, sense tenir en compte la imprimibilitat del material. D'aquest estudi s'extreu que després de 5 cicles de reciclatge, el rendiment mecànic es redueix lleugerament, la cristal·linitat augmenta a causa de la reducció en un

47% del pes molecular, la resistència a tracció disminueix i el límit elàstic es manté igual. També s'observa que la viscositat es redueix en un 80%. Com a conclusió, l'estudi afirma que el PLA és tolerant al processament tèrmic i mecànic general d'un procés de reciclatge i que, per tant, és reciclable.

Per altra banda, (Zhao et al., 2024) simula el cicle de vida complet d'un producte imprès en 3D, reciclat, i tornat a ser imprès, i és aquí on sorgeix el repte principal. (Zhao et al., 2024) conclou que el PLA només es pot imprimir després d'un cicle de reciclatge, és a dir, és imprimible dos cops. S'observa que quan el material s'intenta extrudir per tercer cop (després de dos cicles de reciclatge), la disminució en la viscositat fa impossible la seva impressió. A més, també confirma una reducció del pes molecular a causa de la ruptura de la cadena polimèrica i una disminució de l'estabilitat tèrmica. Tot i això, aquestes dues propietats no impedeixen la impressió del material, sinó que és la caiguda significativa de la viscositat després de dos cicles de reciclatge el que fa impossible la re-extrusió del material.

A causa de la disminució de propietats mecàniques i als cicles de vida limitats dels productes reciclats, els usuaris han de buscar aplicacions amb cicles de vida curts, com podrien ser prototips, impressions visuals, embalatges, o altres productes sense exigències estructurals o requisits de durabilitat (Pakkanen et al., 2017).

A part dels obstacles causats per la degradació del material, implementar un sistema de reciclatge distribuït a petita escala s'enfronta a diferents problemes relacionats amb la logística, l'economia i la investigació (Cruz Sanchez et al., 2017). En primer lloc, el reciclatge de residus d'impressió 3D avança lentament, ja que ens trobem davant d'una manca d'estàndards de material i control de qualitat (Pongwisuthiruchte & Potiyaraj, 2025). És molt difícil assegurar que el filament reciclat funcioni bé quan falten mètriques de qualitat.

Aquestes característiques de qualitat han de considerar les propietats macro i microscòpiques per garantir el rendiment dels productes reciclats (Cruz Sanchez et al., 2017). A més, el reciclatge mecànic encara dificultat derivades dels complexos procediments de gestió i recol·lecció (Prasad et al., 2024). En segon lloc, econòmicament és necessari que tot el procés de reciclatge surti a compte i el preu del material reciclat sigui inferior que el preu del material verge. Per últim, també ens trobem davant d'una manca d'informació per entendre com el nombre de cicles de reciclatge afecta les característiques de diferents materials (Prasad et al., 2024).

6. Solucions i línies de futur viables per al reciclatge distribuït

Després d'analitzar les limitacions que presenta el reciclatge distribuït de productes de PLA impresos en 3D, també s'han analitzat les solucions proposades en diversos estudis i les línies de futur d'investigació sobre el tema.

En primer lloc, sobre la degradació del polímer durant el reprocessament, es destaca la necessitat d'aplicar tractaments tèrmics específics, modificacions químiques o d'afegir una quantitat de material verge al material reciclat (Pongwisuthiruchte & Potiyaraj, 2025). (Zhao et al., 2018) va aconseguir recuperar la viscositat del PLA reciclat afegint PLA verge en diferents quantitats, demostrant d'aquesta forma la viabilitat a petita escala del reciclatge de PLA si es barreja amb PLA verge. De fet, aquesta solució com a millora del rendiment s'ha assenyalat com una de les futures línies d'investigació pel reciclatge mecànic de PLA (Zhao et al., 2018), ja que és una de les solucions més senzilles d'aplicar. També s'han demostrat taxes de recuperació del 73% per la matriu de PLA quan es reciclen peces de PLA reforçades amb fibra de carboni continua (Pongwisuthiruchte & Potiyaraj, 2025).

En segon lloc, a nivell de procés i infraestructura s'ha explorat l'adaptació d'impressores 3D de codi obert amb extrusores de residus plàstics domèstiques per tal de preparar filaments. Aquesta filosofia ha donat lloc a nombrosos projectes d'extrusores domèstiques com són la *Lyman Filament Extruder*, the *Filabot*, *Recyclebot*, *RepRap Recycle Add-on*, *Precious plàstic* o *Plastic Bank*, totes pensades per transformar residus plàstics en matèria primera per les impressores. Amb aquest enfocament es permet reduir costos i emissions de gasos d'efecte hivernacle provocades per la recol·lecció i el transport de residus, així com la reducció de l'impacte ambiental dels residus (Cruz Sanchez et al., 2017).

Per últim, diversos estudis també coincideixen en la necessitat d'incorporar codis d'identificació del material de la peça gravats a la mateixa peça impresa. Aquest codi facilitaria la classificació de les peces segons el material (Pakkanen et al., 2017; Khosravani & Reinicke, 2020).

Pel que fa a les línies de futur, l'estudi de la reciclabilitat d'altres polímers industrials és essencial per establir la viabilitat d'ús en una cadena d'impressió 3D. A més, la viabilitat d'un sector industrial enfocat als residus polimèrics de la tecnologia d'impressió 3D també podria ser subjecte d'estudi (Cruz Sanchez et al., 2017). Per altra banda, donat que cada material necessita uns paràmetres diferents en el procés de reciclatge, sorgeix la necessitat de desenvolupar protocols de reciclatge específics per a cada material (Pongwisuthiruchte & Potiyaraj, 2025).

7. Conclusions

L'objectiu d'aquesta monografia era avaluar la viabilitat del reciclatge mecànic de cicle tancat de PLA a petita escala per a la reimpressió en FDM. Com a conclusió principal s'extreu que el PLA és un polímer termoplàstic tolerant a la re-extrusió general però no a la re-extrusió

pel broquet de les impressores FDM després de dos cicles de reciclatge.

El filament només es pot reutilitzar per a la impressió dos cops (un cicle complet de reciclatge), ja que la pèrdua significativa de viscositat fa que el material sigui inadequat per a la impressió FDM. La solució més immediata i demostrada per recuperar la capacitat d'impressió del material és la barreja amb material verge per restaurar el pes molecular i la viscositat perduts. Respecte a la pèrdua d'altres propietats, es conclou que l'aplicació de filament reciclat ha de ser per a productes amb baixes exigències estructurals com prototips o embalatges.

Per altra banda, la viabilitat del reciclatge mecànic està supeditada al preu del PLA verge. Perquè el procés sigui sostenible, el cost total del filament reciclat ha de ser inferior al del material verge. A més, per garantir que el filament reciclat compleixi amb les expectatives de rendiment dels consumidors, cal establir estàndards de qualitat i mètriques que mesurin les propietats del filament obtingut.

Per consolidar el model de Fabricació Additiva distribuïda i sostenible, la recerca futura ha d'abordar la necessitat de desenvolupar protocols de reciclatge específics per a cada material i optimitzar els paràmetres de re-extrusió, i la continuació de l'estudi de la viabilitat d'un sector industrial dedicat al reciclatge de residus polimèrics de la impressió 3D.

Referències

- Cruz Sanchez, F.A. et al., 2017. Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. A: *Additive Manufacturing*, 17, 87-105. Elsevier B.V. ISSN 2214-8604.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.013>

- Hussein, B.D. & Sadiq, G.Sh. (2025). Utilizing Sustainable Recycled thermoplastic polymers in 3D Printing Filament. A: *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 28(3), 442-450. Al-Nahrain University College of Engineering. ISSN 2521-9154.
<https://doi.org/10.29194/NJES.28030442>
- Khosravani, M.R., & Reinicke, T. (2020). On the environmental impacts of 3D printing technology. A: *Applied Materials Today*, 20. Elsevier Ltd. ISSN 2352-9407. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689>
- Kreiger, M.A. et al. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. A: *Journal of Cleaner Production*, 70, 90-96. ISSN 0959-6526.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>
- Liu, J. et al. (2025). Evaluating the environmental impact of polylactic acid plastics in agriculture: Microbial degradation and plant interaction insights. A: *Journal of Environmental Management*, 387, 125853. ISSN 0301-4797.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125853>
- Pakkanen, J. et al. (2017). About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: State of the art and research opportunities. *Smart Innov. Syst. Technol.*, 776-785. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. ISBN 978-3-319-57077-8.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-57078-5_73
- Pongwisuthiruchte, A., & Potiyaraj, P. (2025). Challenges and innovations in sustainable 3D printing. A: *Materials Today Sustainability*, 31. Elsevier Ltd. ISSN 2589-2347. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101134>
- Prasad, G. et al. (2024). Advancing Sustainable Practices in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review on Material Waste Recyclability. A: *Sustainability (Switzerland)*, 16(23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)., ISSN 2071-1050.
<https://doi.org/10.3390/su162310246>
- Zhao, J. et al. (2024). Driving additive manufacturing towards circular economy: State-of-the-art and future research directions. A: *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 621-637. Elsevier Ltd. ISSN 1526-6125.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.018>
- Zhao, P. et al. (2018). Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. A: *Journal of Cleaner Production*, 197, 1046-1055. ISSN 0959-6526.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.275>

Reaprofitament de llana d'ovella com a aïllant tèrmic i acústic en l'edificació

Joana Majó Ylla-Català

Màster en Disseny Avançat - Barcelona (UPC-UB)

Mireia Puig-Poch

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

La llana d'ovella, tradicionalment destinada al sector tèxtil, ha perdut valor comercial i sovint es considera un residu, fet que obre oportunitats per al seu reaprofitament en la construcció com a material sostenible. Aquest treball presenta una revisió bibliogràfica sobre l'ús de la llana com a aïllant tèrmic i acústic, analitzant propietats físiques, avantatges i limitacions. Els resultats mostren que la llana ofereix una conductivitat tèrmica baixa (0,032–0,04 W/mK), comparable o superior a la llana mineral, i millora amb densitats òptimes. En l'àmbit acústic, presenta coeficients d'absorció elevats (fins a 0,977) i temps de reverberació més curts que els materials sintètics, especialment en freqüències mitjanes. La seva elevada higroscopicitat (fins a 35%) contribueix a regular la humitat i millorar la qualitat de l'aire interior, mentre que la resistència natural al foc i la biodegradabilitat reforcen el seu potencial com a material segur i ecològic. Tot i això, la vulnerabilitat a plagues i la necessitat de tractaments ignífugs són reptes per a la seva implantació. En conclusió, la llana d'ovella és una alternativa prometedora per a la construcció sostenible, amb beneficis en confort tèrmic, acústic i ambiental, i amb un impacte energètic inferior al dels aïllants convencionals.

Abstract

Sheep wool, traditionally used in the textile sector, has lost commercial value and is often treated as waste, creating opportunities for its reuse in construction as a sustainable material. This paper presents a literature review on the use of wool as a thermal and acoustic insulation material, analyzing its physical properties, advantages, and limitations. The results show that wool has low thermal conductivity (0.032-0.04 W/m-K), comparable to or better than

mineral wool, and that performance improves at optimal densities. Acoustically, it exhibits high sound absorption coefficients (up to 0.977) and shorter reverberation times than synthetic materials, particularly at mid-range frequencies. Its high hygroscopicity (up to 35%) helps regulate humidity and improve indoor air quality, while its inherent fire resistance and biodegradability strengthen its potential as a safe, environmentally friendly material. However, vulnerability to pests and the need for fire-retardant treatments remain challenges for broader implantation. In conclusion, sheep wool is a promising alternative for sustainable construction, offering thermal, acoustic, and environmental comfort benefits, with a lower energy impact than conventional insulation materials.

1. Introducció

La llana d'ovella, que en el passat tenia un gran valor en la indústria tèxtil, ha vist reduït notablement el seu interès comercial i sovint acaba considerada una resta sense sortida de la indústria ramadera. Aquesta realitat, però, genera una ocasió per donar-li un nou ús com a material sostenible en el sector de la construcció, especialment en aplicacions d'aïllament tèrmic i acústic.

1.1. Emergència ramadera en la producció de llana

La producció de llana arreu del món viu una emergència ramadera per la seva falta de valor comercial. Històricament, la llana era un producte estratègic, però avui en dia el seu preu és pràcticament nul i, en molts casos, els ramaders es veuen obligats a pagar per eliminar-la, amb costos que poden superar els 25 € per quilo. L'esquilada és obligatòria pel benestar animal, però ara és una despesa sense retorn. La producció de llana s'ha vist afectada per aquest motiu i ha caigut un 25% a escala mundial en comparació a l'any 1995 (International Wool Textile Organisation, 2021). Posant l'exemple de Catalunya, la producció ha caigut dràsticament: de 1.042 tones el 2002 a només 433 tones el 2024 (Generalitat de Catalunya, 2024).

Aquestes xifres responen a la caiguda de la demanda internacional, provocada per la competència de les fibres sintètiques en el sector tèxtil, principal destí de la llana (Tuzcu, 2007). Les fibres sintètiques tenen un cost de producció molt baix, una fabricació industrial eficient i no depenen de factors biològics com el clima o la salut animal. A més, ofereixen propietats tècniques adaptables de resistència, elasticitat i varietat de colors que la llana natural no pot garantir sense processos costosos (Ouda et al., 2025).

Aquest context genera un impacte econòmic i social en el sector ramader (pèrdua d'ingressos i acumulació de sacs sense sortida) i obre les portes a la necessitat de trobar noves sortides d'aquest material per evitar-li l'etiqueta de "residu". Sent la llana un producte natural, biodegradable i de cost baix, es converteix en un potencial substitut sostenible per processos industrials que contribueixen al canvi climàtic, com esdevenir un aïllant tèrmic en la construcció d'edificis.

1.2. Sostenibilitat en la indústria de la construcció

El món de la construcció i edificació és un dels principals sectors emissors de gasos d'efecte hivernacle, sent el responsable del 40% de les emissions mundials de CO₂ i petroli (Tiza et al., 2021) a més a més de considerar-se la indústria amb un consum d'aigua i energia més elevat del món (Rosas Rivera, 2016).

Per tal de mitigar aquests impactes, l'enfocament darrerament s'ha desplaçat cap a la sostenibilitat en el sector i la recerca de noves oportunitats més ecològiques, no només en el transcurs de la construcció dels edificis, sinó també en el seu manteniment i despesa energètica durant l'ús de les instal·lacions construïdes.

La necessitat de buscar nous materials amb un impacte ambiental menor ve impulsada per La Directiva 2010/31/UE del Parlament Europeu sobre l'eficiència energètica dels edificis, on s'exigeix que el certificat d'eficiència energètica ha d'incloure també informació

detallada sobre l'impacte real que tenen els sistemes de calefacció i refrigeració en relació amb el consum d'energia primària i les emissions de diòxid de carboni (Zach et al., 2012).

És per aquest motiu que s'ha avançat en la recerca de nous materials sostenibles com a aïllants tèrmics i acústics en l'edificació, com poden ser bambú (Tiza et al., 2021), palla, escumes de miceli i, per descomptat, la llana d'ovella.

1.3. Principis de termodinàmica i acústica

Per considerar si un material és apte o no per ser un bon aïllant tèrmic i acústic, cal analitzar les seves propietats i establir uns criteris per fer l'estudi comparatiu. A continuació s'expliquen els principals conceptes de termodinàmica i acústica per poder entendre el caràcter de qualsevol material.

Propietats tèrmiques

Pel que fa a les propietats tèrmiques dels materials, la capacitat d'un material per transferir calor d'una banda a l'altra s'anomena conductivitat tèrmica (λ) i està influenciada per factors macroscòpics com el contingut d'humitat, la temperatura mitjana, l'envelliment i la densitat. S'expressa en W/mK, i com més baix és el seu valor, millor aïllant. Per exemple, els materials amb una conductivitat inferior a 0.065 W/mK es consideren materials d'aïllament tèrmic segons els estàndards internacionals (Erkmen et al., 2024).

Propietats acústiques

L'anàlisi de les propietats acústiques es basa en com un material atenua l'energia de les ones sonores. La funció d'un aïllant acústic és millorar l'absorció sonora mentre es minimitza la propagació del so.

El Coeficient d'Absorció Acústica (α o SAC) descriu la capacitat que té un material per absorbir i dissipar les ones del so. El seu valor oscil·la entre 0 (reflexió completa del so) i 1 (absorció total) (Ouda et al., 2025).

L'eficàcia del SAC depèn de factors com la densitat, el gruix, la porositat, el diàmetre de la fibra i la resistivitat al flux d'aire (Borlea (Mureşan) et al., 2020).

Altres propietats

A més de les propietats tèrmica i acústica, és fonamental considerar altres característiques per determinar si un material és adequat com a aïllant. Entre aquestes destaquen la capacitat d'absorbir humitat, la resistència al foc i la durabilitat al llarg del temps.

Pel que fa a la higroscopicitat, aquesta fa referència a la capacitat d'un material d'absorbir i alliberar humitat (vapor d'aigua) en funció de les condicions ambientals (Tuzcu, 2007). Aquesta propietat és essencial per al rendiment dels aïllants, ja que pot modificar les seves prestacions tèrmiques: un increment del contingut d'humitat tendeix a augmentar la conductivitat tèrmica i, en conseqüència, a reduir la capacitat aïllant del material.

D'altra banda, la resistència al foc és una característica crítica en l'àmbit de la construcció. Els materials d'aïllament han de ser capaços de resistir la ignició, retardar la combustió i limitar la propagació del foc per garantir la seguretat (Ouda et al., 2025).

Finalment, la durabilitat es refereix a la capacitat dels materials per mantenir les seves propietats i rendiment a llarg termini, fins i tot davant la degradació causada per factors ambientals.

1.4. Estat de l'art

Actualment, diverses empreses europees i nord-americanes comercialitzen productes d'aïllament basats en llana d'ovella, consolidant-la com una alternativa sostenible als materials sintètics. Marques com ISOLENA (Àustria, <https://www.isolena.com/en/>), Havelock Wool (EUA, <https://havelockwool.com/>), Eco Sheep Wool (Alemanya, <https://ecofriendsheep.eu/>) o LanaTerm (França, <https://>

lanaterm.com/en/) ofereixen aïllament tèxtil 100% llana verge amb certificació ecològica, sense additius químics i lliures de biocides. Aquestes iniciatives demostren que la llana és un material competitiu, amb prestacions tèrmica i acústica adequades, i que ja disposa d'un mercat orientat a la construcció sostenible.

En aquest context, la llana d'ovella emergeix com una alternativa sostenible amb potencial per reduir l'impacte ambiental de la construcció i donar sortida a un subproducte ramader en desús. A continuació s'exposen els resultats trobats durant la recerca bibliogràfica.

2. Metodologia

S'ha dut a terme una revisió bibliogràfica utilitzant la base de dades ScienceDirect. La cerca es va realitzar amb paraules clau com “*sheep wool*” i “*isolation*”, limitant els resultats a publicacions entre 2021 i 2025. Els criteris d'inclusió van ser: articles revisats per parells, tesis i documents tècnics que aportessin dades sobre propietats tèrmiques, acústiques, hidrotèrmiques i sobre la sostenibilitat de la llana d'ovella com a aïllant tèrmic i acústic en edificació.

La cerca inicial va retornar 71 articles. A partir d'aquests, es van seleccionar els 10 més rellevants segons el títol. Posteriorment, es van excloure aquells que:

- No analitzaven aïllants elaborats exclusivament amb llana d'ovella (sinó barreges amb altres fibres).
- Tractaven propietats diferents de les establertes.
- No consideraven la llana com a aïllant en edificació.

Després d'aquest procés de cribratge i revisant les referències dels articles més relacionats, es van retenir 6 articles principals. Addicionalment, s'ha incorporat un treball de màster de la Universitat Politècnica de Catalunya (obtingut de la base de dades *UPCommons*) i

tres documents institucionals que contextualitzen les dades de la introducció.

3. Resultats

3.1. Propietats tèrmiques

Diversos estudis han donat resultats respecte a les capacitats tèrmiques de la llana d'ovella. Un estudi dut a terme per la Universitat Tecnològica de Tallinn, comparava la capacitat de llana com a aïllant respecte a la d'un aïllant sintètic comercial creant dues cabanes amb exactament les mateixes condicions de temperatura, humitat i so. Els resultats d'aquest estudi mostren que la capacitat d'aïllament de la llana és molt similar a la capacitat de l'aïllant sintètic comercial, a més a més de demostrar unes capacitats acústiques i higroscòpiques superiors (Kabun i Reinhold, 2025).

Altres estudis informen que, per la llana d'ovella, els valors estàndard de conductivitat tèrmica es troben en el rang de 0,035 a 0,04 W/mK, comparable al valor de 0,044 W/mK de la llana mineral estàndard (Tiza et al., 2021). Un estudi més precís va mesurar un valor tan baix com 0,0322 W/mK per a llana d'ovella pura (Ouda et al., 2025).

A més a més, les fibres arrissades de la llana d'ovella formen milions de petites bosses d'aire que atrapen l'aire i ajuden a crear una barrera tèrmica (Tiza et al., 2021). Tot i això, s'ha observat també que l'augment de la densitat a granel i la compactació del material, millora les propietats aïllants del material (dins del rang observat entre 20 i 40 kg/m³), produint una disminució de la conductivitat tèrmica del material. Això es deu al fet que l'augment de la densitat redueix el volum dels porus d'aire dins del material i, per tant, la intensitat del flux d'aire a l'estructura porosa. (Zach et al., 2012).

3.2. Propietats acústiques

Un estudi de la Universitat Tècnica de Cluj-Napoca ha demostrat que la llana d'ovella té un rendiment acústic comparable al de la llana mineral i l'escuma de poliuretà reciclada (Borlea (Mureșan) et al., 2020). Kabun i Reinhold, 2025, també afirma aquests resultats. Les mesures d'aquest estudi mostren que els panells de llana d'ovella ofereixen un rendiment d'aïllament sonor igual o superior als materials sintètics, especialment en freqüències mitjanes (500–3000 Hz). Fins i tot, el temps de reverberació a la cabina de llana ha estat inferior que la cabina sintètica i ha donat millors resultats d'aïllament acústic (Kabun i Reinhold, 2025).

Pel que fa al coeficient d'absorció acústica (α o SAC), un estudi dut a terme per la Universitat de Tecnologia de Viena juntament amb la Universitat de Tecnologia de Berno va obtenir uns valors de SAC d'entre 0.082 i 0.977, treballant amb gruixos d'aïllant de 20, 30, 40 i 60 mm, aconseguint més bons resultats a mesura que augmenta el gruix de l'aïllant (Zach et al., 2012).

3.3. Altres propietats

La llana d'ovella és altament higroscòpica, la qual cosa li permet absorbir i alliberar altes quantitats de vapor d'aigua de l'aire circumdant. Un estudi realitzat per Ouda et al. l'any 2025 afirma el següent: “La llana d'ovella va demostrar una alta absorció d'humitat (fins a un 30%) sense una pèrdua significativa de les propietats aïllants. Fins a un contingut d'humitat del 20%, la conductivitat tèrmica es va mantenir pràcticament inalterada, la qual cosa confirma l'estabilitat del material en diferents nivells d'humitat.”. Addicionalment, altres estudis conclouen que la seva capacitat per absorbir humitat pot rondar els valors d'entre 33 i 35% (Tuzcu, 2007), aquesta capacitat ajuda a regular la humitat interior i a millorar la qualitat de l'aire (IAQ) (Kabun i Reinhold, 2025).

Pel que fa a les propietats ignífugues del material, la llana d'ovella és considerada raonablement resistent al foc en la majoria de les condicions. Aquesta resistència es deu al seu alt contingut de nitrogen (16%) i un contingut d'humitat relativament alt. A més a més d'una temperatura d'ignició que oscil·la entre 570 °C i 600 °C (Tuzcu, 2007). Addicionalment, presenta un Índex d'Oxigen Límit relativament alt (25–28%). Això vol dir que per a una combustió completa es requereix un mínim de 25% d'oxigen, mentre que l'aire ambiental només conté un 21%, donant-li capacitat d'autoextinció (Zach et al., 2012). Tot i la seva resistència natural, els productes de llana d'ovella sovint es classifiquen a la Classe E segons l'estàndard europeu BS EN 13501–1 (Ouda et al., 2025). Per millorar la classificació, se sol fer un tractament amb agents ignífugs (Tuzcu, 2007).

Finalment, la llana presenta una durabilitat que pot ser un punt crític a causa de la seva naturalesa orgànica, el principal inconvenient de la llana és la seva vulnerabilitat a l'atac de fongs i insectes (com arnes i escarabats) a causa de la seva composició de queratina i l'alt contingut de sulfur. Per mantenir la seva durabilitat al llarg dels anys, la llana necessita passar per un tractament, normalment químic, que posa en dubte la sostenibilitat del material (Tiza et al., 2021).

4. Discussió i conclusió

Els resultats confirmen que la llana d'ovella és un material amb excel·lents prestacions tèrmica i acústica, comparable o superior als aïllants sintètics. La seva conductivitat tèrmica (0,032–0,04 W/mK) és similar o millor que la llana mineral, i pot millorar-se amb una densitat òptima. En l'àmbit acústic, la llana ofereix un rendiment destacat, amb coeficients d'absorció elevats i temps de reverberació més curts que els materials sintètics, especialment en freqüències mitjanes. L'augment del gruix incrementa significativament la capacitat d'absorció, fet que la fa ideal per millorar el confort sonor en edificis.

Un altre avantatge clau és la seva higroscopicitat, que permet absorbir fins a un 35% d'humitat sense perdre capacitat aïllant. Aquesta propietat ajuda a estabilitzar la humitat interior i millorar la qualitat de l'aire, contribuint a un ambient més saludable. A més, la llana presenta una resistència natural al foc, amb temperatura d'ignició elevada i capacitat d'autoextinció.

Tot i aquests beneficis, cal abordar limitacions com la vulnerabilitat a plagues i la necessitat de tractaments ignífugs per complir normatives, que poden afectar la sostenibilitat. Malgrat això, els avantatges en confort tèrmic, acústic i qualitat ambiental fan de la llana una alternativa molt prometedora per a la construcció sostenible. I, tot i no analitzar el terme de sostenibilitat respecte a la viabilitat de producció de la llana com a aïllant, consumeix menys d'un 15% de l'energia utilitzada per produir la llana de vidre i, per tant, la fa una clara solució més sostenible als aïllants actuals (Tiza et al., 2021).

Referències

- Borlea (Mureşan), S. I., Tiuc, A.-E., Nemeş, O., Vermeşan, H., & Vasile, O. (2020). Innovative use of sheep wool for obtaining materials with improved sound-absorbing properties. *Materials*, 13(3), 694.
<https://doi.org/10.3390/ma13030694>
- Erkmen, J., Yakut, R., Hamamcı, B., & Özer, R. A. (2024). Production of insulation material using styrene acrylic resin from animal and agricultural waste part 1: Thermal insulation and water absorption. *Energy & Buildings*, 303, 113817.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113817>
- Generalitat de Catalunya. Secretaria General – Gabinet Tècnic – Servei d'Estudis i Estadística. (2024). *Evolució de la producció de llana a Catalunya (2002–2024)* [Informe estadístic]. Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural.
- International Wool Textile Organisation (IWTO). (2021). *IWTO market information: Sample edition 17*. IWTO. Recuperat de <https://www.iwto.org>

- Kabun, K., & Reinhold, K. (2025). Improving indoor air quality and mitigating health risks with sheep wool as a sustainable material. *Indoor Environments*, 2, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2025.100111>
- Ouda, M., Abu Sanad, A. A., Abdelaal, A., Krishna, A., Kandah, M., & Kurdi, J. (2025). A comprehensive review of sustainable thermal and acoustic insulation materials from various waste sources. *Buildings*, 15(8), 2876. <https://doi.org/10.3390/buildings15162876>
- Rosas Rivera, A. A. (2016). La lana de ovino como material aislante: Natural, renovable y sostenible [Treball final de màster, Universitat Politècnica de Catalunya].
- Tiza, T. M., Singh, S. K., Kumar, L., Shettar, M. P., & Singh, S. P. (2021). Assessing the potentials of bamboo and sheep wool fiber as sustainable construction materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4484–4489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.322>
- Tuzcu, T. M. (2007). *Hygro-thermal properties of sheep wool insulation* [Master's thesis, Delft University of Technology].
- Zach, J., Korjenic, A., Petránek, V., Hroudová, J., & Bednar, T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*, 49, 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014>

La integració de la intel·ligència artificial a l'educació superior: una anàlisi preliminar de les percepcions del professorat

Rosó Baltà-Salvador, Enric Brasó-Vives

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Marta Peña

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Departament de Matemàtiques, IOC

Ana-Inés Renta-Davids

Departament de Pedagogia
Universitat Rovira i Virgili

Resum

La irrupció recent de la intel·ligència artificial generativa ha intensificat el debat sobre la seva incorporació a l'educació superior. Aquest estudi analitza, des d'una perspectiva comparativa entre les Ciències Socials i l'Enginyeria, les percepcions del professorat universitari sobre l'ús de la intel·ligència artificial (IA) en la docència. Els resultats preliminars mostren que el professorat es posiciona majoritàriament en un nivell intermedi de competència en IA. Tot i que l'impacte de la IA en les tasques docents és valorat de manera positiva, s'observen diferències en la freqüència d'ús i en la percepció del seu impacte segons l'àmbit disciplinari. A més, emergeix una percepció generalitzada de manca de preparació de l'estudiantat i una explicació encara limitada de conceptes relacionats amb la IA durant les classes. Aquests resultats posen de manifest la necessitat de reforçar la formació docent, l'alfabetització en IA de l'estudiantat i el desenvolupament d'estratègies institucionals per a la seva correcta integració.

Paraules clau: Alfabetització en IA; Competència en IA; Docència universitària; Educació superior; Intel·ligència artificial; Percepcions del professorat

Abstract

The recent emergence of generative artificial intelligence has intensified the debate on its incorporation into higher education. This study analyses, from a comparative perspective between Social Sciences and Engineering, university teachers' perceptions of the use of artificial intelligence (AI) in teaching. The preliminary results show that faculty members predominantly position themselves at an intermediate level of competence in AI. Although the impact of AI on teaching tasks is valued positively, differences are observed in both frequency of use and perceptions of its impact across disciplinary areas. In addition, a widespread perception of students' lack of preparation and a still limited explanation of AI-related concepts during classes emerge. Overall, these findings highlight the need to strengthen faculty training, student AI literacy, and the development of institutional strategies for the effective integration of AI.

Keywords: AI literacy; Artificial intelligence; Higher education; Teaching competence in AI; University teaching; University teachers' perceptions

1. Revisió de la literatura

La investigació sobre la intel·ligència artificial (IA) en l'Educació Superior ha experimentat un creixement molt notable en els darrers anys, especialment des de l'aparició d'eines basades en models de llenguatge ampli com ChatGPT. Un dels treballs més exhaustius recents, basat en l'anàlisi de més de 2 000 articles, mostra que la recerca en IA aplicada a l'educació abasta des d'aplicacions tècniques (per exemple, sistemes adaptatius i tutories intel·ligents) fins a estudis sobre adopció i impacte en processos d'ensenyament i aprenentatge (Wang et al., 2024).

Diversos treballs recents apunten que la IA, especialment la IA generativa, pot aportar beneficis pràctics en Educació Superior, com ara ajudar a generar materials, donar suport a la planificació docent i oferir formes de retroalimentació més ràpides a l'estudiantat. En aquest sentit, estudis empírics i revisions sistemàtiques descriuen oportunitats relacionades amb el suport a l'aprenentatge i amb l'eficiència en

tasques docents, però també remarquen que l'impacte depèn molt de com s'integra en l'assignatura i de si hi ha criteris clars d'ús (Baig & Yadegaridehkordi, 2024; Lee et al., 2024).

Un fil recurrent en la literatura és la necessitat d'alfabetització en IA entre docents i estudiants. Els estudis indiquen que, per poder integrar de manera efectiva aquestes tecnologies a l'ensenyament, el professorat requereix no només coneixements tècnics sobre les eines, sinó també una comprensió pedagògica de com i quan utilitzar-les (Mah & Groß, 2024). Això inclou, per exemple, la capacitat de dissenyar activitats d'aprenentatge que incorporin IA de manera significativa i no només com a recurs per simplificar tasques.

Al mateix temps, la literatura assenyalava una sèrie de reptes i preocupacions associades a la integració de la IA. Entre ells apareixen les qüestions sobre integritat acadèmica, així com possibles impactes negatius sobre el pensament crític i l'autonomia de l'estudiantat si s'utilitzen les eines de manera inadequada o sense guies educatives clares (Baltà-Salvador et al., 2025; Ghimire et al., 2024). És important remarcar que una revisió de literatura més àmplia ha posat de manifest que molts estudis encara se centren en la descripció d'aplicacions tecnològiques o en la implementació de prototips, deixant espai per a investigacions més específiques sobre les percepcions del professorat, els patrons d'ús reals i l'adaptació curricular (Wang et al., 2024).

En resum, tot i l'augment de publicacions sobre IA i IA generativa a l'Educació Superior, encara calen més evidències empíriques sobre com el professorat integra aquestes eines en la docència i com en valora l'impacte en la seva feina i en l'aprenentatge de l'estudiantat (Lee et al., 2024; Zawacki-Richter et al., 2019). En aquest context, el present treball aporta resultats preliminars d'una recerca més àmplia i explora, mitjançant la comparació entre els àmbits de Ciències Socials i Enginyeria, sis dimensions clau: (1) el nivell d'autopercepció de

competència en IA, (2) la freqüència d'ús docent, (3) la percepció de l'impacte de la IA en les tasques docents, (4) l'explicació de la IA a l'aula, (5) l'impacte percebut en l'aprenentatge de l'estudiantat i (6) la percepció sobre la preparació de l'estudiantat. Aquest enfocament permet descriure patrons inicials i explorar diferències entre àmbits de coneixement que orientin les següents fases del projecte.

2. Metodologia

S'ha dut a terme un estudi exploratori de caràcter descriptiu i comparatiu, amb l'objectiu d'analitzar el coneixement, l'ús i les percepcions del professorat universitari sobre la IA en el context docent. Aquest treball s'emmarca en una recerca més àmplia en curs, orientada a ampliar el coneixement sobre els usos, les percepcions i les pràctiques docents vinculades a la IA en l'educació superior.

La mostra analitzada en aquest estudi està formada per 50 docents de dues universitats públiques de Catalunya: la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech (UPC), en l'àmbit de l'Enginyeria, i la Universitat Rovira i Virgili (URV), en l'àmbit de les Ciències Socials. Per a la recollida de dades s'ha dissenyat un qüestionari específic per a aquest estudi, concebut com a instrument preliminar dins del projecte de recerca. El qüestionari incloïa preguntes sobre dades sociodemogràfiques i context docent, així com diferents blocs temàtics relacionats amb el nivell de coneixement i ús de la IA i amb la percepció del professorat sobre l'ús de la IA per part de l'estudiantat. Abans de la seva difusió, el qüestionari ha estat revisat per garantir la claredat i la rellevància dels ítems. El qüestionari s'ha elaborat mitjançant la plataforma SurveyMonkey i s'ha distribuït per correu electrònic durant el curs acadèmic 2024–2025 pels autors de l'estudi, acompanyat d'una breu explicació sobre els objectius generals de la recerca. La participació ha estat voluntària, no incentivada i anònima, i

les dades recollides s'han utilitzat exclusivament amb finalitats de recerca.

S'han dut a terme anàlisis descriptives per caracteritzar la mostra i les variables d'estudi, així com proves de khi quadrat per examinar possibles diferències entre àrees de coneixement. A més de la significació estadística, s'ha calculat la mida de l'efecte per interpretar la rellevància pràctica de les diferències observades.

3. Resultats

Els resultats que es presenten a continuació corresponen a una anàlisi preliminar i exploratòria de les percepcions i pràctiques del professorat universitari en relació amb les eines d'IA, i ofereixen una primera aproximació quantitativa al seu nivell de competència, ús docent i valoració de l'impacte d'aquestes tecnologies.

Pel que fa l'autopercepció del professorat en relació amb el seu nivell de coneixement en IA, el 60% dels participants se situen en un nivell intermedi, mentre que el 30% declaren tenir un nivell bàsic i només el 10% un nivell avançat. L'anàlisi estadística no mostra diferències significatives entre les àrees de coneixement ($\chi^2 = 0,549$; $p = 0,459$), fet que indica una distribució similar del nivell de competència en IA entre el professorat de Ciències Socials i d'Enginyeria.

En quant a la freqüència d'ús de la IA en la docència, el 16% del professorat afirma no utilitzar-la mai, el 42% indica que la fa servir algunes vegades al mes, el 20% algunes vegades a la setmana i el 22% gairebé diàriament. L'anàlisi per àrees mostra diferències significatives ($\chi^2 = 5,055$; $p = 0,025$), amb una associació baixa-moderada (V de Cramer = 0,318), fet que indica patrons d'ús diferenciats entre Ciències Socials i Enginyeria. En aquest sentit, el professorat de Ciències Socials presenta un ús més freqüent (setmanal

o diari), mentre que a Enginyeria predomina un ús esporàdic o inexistent.

La majoria del professorat percep l'impacte de la IA en les tasques docents com a positiu o molt positiu (64%). Un 18% considera que no ha tingut cap impacte i un altre 18% el valora com a lleugerament negatiu, sense que cap participant indiqui un impacte molt negatiu. En aquest cas, sí que s'observen diferències estadísticament significatives entre àrees ($\chi^2 = 16,224$; $p < 0,001$), amb una associació de magnitud moderada (V de Cramer = 0,570). El professorat de Ciències Socials mostra una percepció clarament més positiva, mentre que a Enginyeria es concentren més respostes que indiquen cap impacte o un impacte negatiu.

Els resultats mostren una situació força equilibrada pel que fa a l'explicació de conceptes relacionats amb la IA a l'aula. El 52% del professorat indica que no ha explicat cap contingut relacionat amb la IA durant les seves classes, mentre que el 48% afirma que sí que ho ha fet. No s'han detectat diferències estadísticament significatives entre àrees ($\chi^2 = 1,974$; $p = 0,160$), fet que indica una presència similar de la IA en els continguts docents independentment de l'àmbit disciplinari.

Respecte a l'impacte de la IA en l'aprenentatge de l'estudiantat, un 42% del professorat el percep com a negatiu, mentre que un 30% el considera positiu, i la resta de respostes se situen en una valoració neutra. No s'han observat diferències significatives entre àrees ($\chi^2 = 3,068$; $p = 0,216$), la qual cosa suggereix una percepció compartida entre el professorat de les dues àrees analitzades.

Finalment, pel que fa a la preparació de l'estudiantat en IA, cap docent considera que l'estudiantat estigui molt preparat. Un 52% opina que tenen un coneixement limitat, un 16% que és inexistent, un 22% que és suficient i un 10% manifesta no tenir una opinió clara al respecte. La prova de khi quadrat no mostra diferències estadísticament

significatives entre les àrees de coneixement ($\chi^2 = 7,358$; $p = 0,061$), per la qual cosa els resultats apunten a una percepció generalitzada de manca de preparació sòlida de l'estudiantat per fer un bon ús de la IA.

4. Discussió

La creixent presència de la IA en l'educació superior ha generat un interès notable en la recerca recent, especialment pel que fa a les seves implicacions pedagògiques i al paper del professorat en la seva adopció. Tot i l'augment d'estudis sobre aplicacions i potencialitats de la IA, diversos autors assenyalen la necessitat d'anàlisis empíriques que permetin comprendre com aquestes tecnologies són percebudes i utilitzades en la pràctica docent universitària (Zawacki-Richter et al., 2019). Els resultats preliminars d'aquest estudi ofereixen una base per analitzar diferents dimensions de l'ús de la IA en la docència universitària.

En primer lloc, destaca que la majoria del professorat se situa en un nivell intermedi d'autopercepció de competència en IA, mentre que només una minoria es considera amb un nivell avançat. L'absència de diferències significatives entre les àrees de Ciències Socials i Enginyeria suggereix que el grau de competència percebuda no depèn del camp disciplinari. Aquest resultat és coherent amb estudis previs que assenyalen una familiaritat encara limitada del professorat amb la IA generativa i una demanda generalitzada de més suport institucional, situant el context organitzatiu com un element clau en els processos d'adopció a l'educació superior (Roe et al., 2024; Zawacki-Richter et al., 2019).

Pel que fa a la percepció de l'impacte de la IA en les tasques docents, la majoria del professorat la valora de manera positiva o molt positiva, fet que reflecteix una actitud generalment favorable cap a l'ús d'aquestes eines com a suport a l'activitat docent. Tanmateix, l'anàlisi per àrees mostra diferències significatives: el professorat de Ciències

Socials presenta una percepció més positiva, mentre que en l'àmbit de l'Enginyeria es concentren més respostes que indiquen absència d'impacte o una valoració negativa. Aquesta diferència s'acompanya també de patrons d'ús diferenciats, amb una presència més habitual de la IA en la docència a Ciències Socials i un ús més esporàdic o inexistent a Enginyeria. En conjunt, aquests resultats suggereixen que la valoració positiva de la IA està estretament vinculada a les possibilitats reals d'aplicació en les tasques docents quotidianes, especialment en activitats relacionades amb la generació de materials, la planificació o el suport a l'aprenentatge, més freqüents en disciplines de caràcter discursiu. En canvi, en àrees tècniques, la integració de la IA pot percebre's com menys rellevant o requerir adaptacions metodològiques específiques, fet que coincideix amb el que descriu la literatura recent sobre una adopció heterogènia de la IA a la universitat (Jin et al., 2025; Lee et al., 2024; Zawacki-Richter et al., 2019).

Malgrat aquest ús creixent, gairebé la meitat del professorat no aborda de manera explícita la IA com a contingut a l'aula. Aquesta dada, que es manté estable entre àrees, posa de manifest una possible bretxa entre l'ús instrumental de la IA i la seva integració pedagògica conscient. Diversos autors han advertit que aquesta manca d'explicitació pot limitar el desenvolupament d'una competència crítica i responsable per part de l'estudiantat, i han subratllat la necessitat de marcs institucionals clars, polítiques educatives i orientacions pedagògiques per a una integració efectiva de la IA a l'educació universitària (Chan, 2023; Jin et al., 2025).

Pel que fa a l'impacte de la IA en l'aprenentatge de l'estudiantat, una proporció elevada del professorat en fa una valoració negativa, mentre que la resta adopta una posició neutra. Aquests resultats reflecteixen tensions àmpliament documentades en la literatura, especialment pel que fa a les implicacions de la IA en termes d'integritat acadèmica i a la

percepció docent sobre els seus possibles efectes en els processos d'aprenentatge. En particular, Denkin (2024) mostra que, si bé el professorat no percep el frau acadèmic com un fenomen generalitzat, sí que existeix una preocupació creixent pel paper de la IA generativa en l'augment potencial de pràctiques deshonestes, així com una consciència elevada del seu ús extensiu per part de l'estudiantat. Aquestes preocupacions es combinen amb advertiments, presents en altres estudis, sobre el risc de dependència tecnològica i l'afebliment de processos cognitius clau si la integració de la IA no s'acompanya d'estratègies pedagògiques adequades (Baltà-Salvador et al., 2025; Baltà-Salvador et al., 2026; Kim et al., 2025; Lee et al., 2024).

Finalment, la percepció generalitzada d'una preparació insuficient de l'estudiantat en IA emergeix com un dels resultats més consistents d'aquesta anàlisi preliminar. Cap docent considera que l'estudiantat estigui molt preparat, i la majoria assenyala un coneixement limitat o inexistent per fer-ne un bon ús. Aquest resultat és especialment rellevant si es té en compte que diversos estudis han constatat un ús creixent d'assistents basats en IA per part de l'estudiantat universitari, sovint sense una formació adequada que n'orienti l'ús crític i responsable (Stöhr et al., 2024). En aquest sentit, autors com Chan (2023) defensen la necessitat d'incorporar la formació en IA com a competència transversal als plans d'estudi, així com de reforçar la formació docent i les estratègies institucionals.

En conjunt, aquests resultats preliminars ofereixen una visió inicial de les percepcions i pràctiques del professorat universitari davant la IA i estableixen una base empírica per al desenvolupament de futures anàlisis amb mostres més àmplies i instruments complementaris. Lluny de pretendre conclusions definitives, aquest estudi contribueix a delimitar línies d'anàlisi i hipòtesis que orientaran les següents fases de la investigació, amb l'objectiu d'aprofundir en una integració

pedagògicament fonamentada, crítica i sostenible de la IA a l'educació superior.

5. Limitacions de l'estudi i línies de recerca futures

Aquest estudi presenta algunes limitacions que cal considerar. En primer lloc, els resultats corresponen a una anàlisi preliminar basada en una mostra reduïda i limitada a dues àrees de coneixement i a dues universitats, fet que en restringeix la generalització. A més, les dades es basen en l'autopercepció del professorat, la qual cosa pot introduir biaixos en la valoració del nivell de competència, l'ús real de la IA o el seu impacte percebut.

Aquest treball s'emmarca en una recerca més àmplia en curs, que preveu ampliar l'estudi a altres àmbits acadèmics i a una mostra més diversa de professorat. Així mateix, futures fases de la investigació aprofundiran en l'anàlisi detallada dels usos concrets de la IA en la docència i de les principals preocupacions associades al seu ús, com ara la integritat acadèmica, l'impacte en l'aprenentatge o les implicacions pedagògiques i ètiques.

Referències

- Baig, M. I., & Yadegaridehkordi, E. (2024). ChatGPT in the higher education: A systematic literature review and research challenges. *International Journal of Educational Research*, 127, 102411. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2024.102411>
- Baltà-Salvador, R., El-Madafri, I., Brasó-Vives, E., & Peña, M. (2025). Empowering Engineering Students Through Artificial Intelligence (AI): Blended Human–AI Creative Ideation Processes With ChatGPT. *Computer Applications in Engineering Education*, 33(1), e22817. <https://doi.org/10.1002/cae.22817>
- Baltà-Salvador, R., Brasó-Vives, E., & Peña, M. (2026). Evaluating AI-assisted creative ideation: A crossover study in higher education. *Thinking Skills and Creativity*, 59, 101958. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2025.101958>
- Chan, C. K. Y. (2023). A comprehensive AI policy education framework for university teaching and learning. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00408-3>

- Denkin, R. (2024). On Perception of Prevalence of Cheating and Usage of Generative AI (No. arXiv:2405.18889). *arXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.18889>
- Ghimire, A., Prather, J., & Edwards, J. (2024). Generative AI in Education: A Study of Educators' Awareness, Sentiments, and Influencing Factors (No. arXiv:2403.15586). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.15586>
- Jin, Y., Yan, L., Echeverria, V., Gašević, D., & Martinez-Maldonado, R. (2025). Generative AI in higher education: A global perspective of institutional adoption policies and guidelines. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, 100348. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100348>
- Kim, J., Klopfer, M., Grohs, J. R., Eldardiry, H., Weichert, J., Cox, L. A., & Pike, D. (2025). Examining Faculty and Student Perceptions of Generative AI in University Courses. *Innovative Higher Education*, 50(4), 1281–1313.
<https://doi.org/10.1007/s10755-024-09774-w>
- Lee, D., Arnold, M., Srivastava, A., Plastow, K., Strelan, P., Ploeckl, F., Lekkas, D., & Palmer, E. (2024). The impact of generative AI on higher education learning and teaching: A study of educators' perspectives. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 6, 100221. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100221>
- Mah, D.-K., & Groß, N. (2024). Artificial intelligence in higher education: Exploring faculty use, self-efficacy, distinct profiles, and professional development needs. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 21(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s41239-024-00490-1>
- Roe, J., Perkins, M., & Ruelle, D. (2024). Understanding Student and Academic Staff Perceptions of AI Use in Assessment and Feedback. *Arxiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.15808>
- Stöhr, C., Ou, A. W., & Malmström, H. (2024). Perceptions and usage of AI chatbots among students in higher education across genders, academic levels and fields of study. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100259. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100259>
- Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, 252, 124167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>

Formació de recobriments mitjançant nanocel·lulosa aero-transportada

Oriol Cusola, Cristina Valls, M. Blanca Roncero

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Grup CELBIOTECH

Resum

Aquest estudi presenta un nou mètode de deposició assistida per aire de nanocristalls de cel·lulosa (NCC) per obtenir recobriments estructurats sobre substrats cel·lulòsics. S'analitza la hidratació i dispersió dels NCC a la interfície aire-aigua, així com les propietats estructurals i de barrera dels materials resultants en funció del gramatge de la capa. Els resultats mostren una ràpida individualització dels NCC i la formació de recobriments uniformes, assolint gramatges de fins a 90 g/m². Quan el gramatge és suficient, els recobriments presenten propietats de barrera excel·lents a gasos, vapor d'aigua i aire, fet que demostra el potencial del mètode per a diferents aplicacions.

Abstract

This study presents a novel air-assisted deposition method of cellulose nanocrystals (CNCs) to obtain structured coatings on cellulosic substrates. The hydration and dispersion of CNCs at the air–water interface are analyzed, together with the structural and barrier properties of the resulting materials as a function of coating grammage. The results show rapid individualization of the CNCs and the formation of uniform coatings, achieving grammages of up to 90 g/m². When the grammage is sufficiently high, the coatings exhibit excellent barrier properties against gases, water vapor, and air, demonstrating the potential of this method for a wide range of applications.

1. Introducció

Els plàstics d'origen fòssil han estat essencials en el desenvolupament de materials d'alta barrera que s'utilitzen àmpliament avui dia. Els envasos de plàstic, que constitueixen una

part important del consum total de plàstic, s'utilitzen àmpliament en diversos sectors.

Malgrat el seu ús generalitzat, els plàstics continuen seguint una cadena de valor lineal d'extreure-fabricar-descartar. Actualment, només es recicla el 9% dels residus plàstics mundials [1]. La resta s'incinera (19%), s'aboca (50%) o s'allibera al medi ambient (22%), amb grans quantitats acumulades als oceans, cosa que comporta costos econòmics i ambientals substancials [2]. A més, l'excepcional durabilitat dels plàstics els permet persistir al medi ambient durant segles, agreujant encara més el problema de l'acumulació a llarg termini. Aquesta problemàtica requereix una transició cap a un model d'economia circular per als plàstics, minimitzar el seu alliberament als ecosistemes naturals al mateix temps que es busquen estratègies per mitigar el seu impacte. Una solució prometedora és l'ús de biopolímers naturals bio-benignes com a alternatives [3]. En aquest context, la cel·lulosa, que és un material renovable, reciclable, biocompatible i no tòxic, destaca com un substitut particularment viable i respectuós amb el medi ambient.

Les nanocel·luloses són subestructures de cel·lulosa, que tenen almenys una dimensió en el rang nanomètric. Hi ha dos tipus principals de nanocel·luloses derivades de plantes: (i) La cel·lulosa nanofibril·lar (CNF) i (ii) els nanocristalls de cel·lulosa (NCC). La CNF es produeix mitjançant el des-assemblatge de l'estructura jeràrquica de les fibres de cel·lulosa mitjançant intenses forces de cisallament, donant lloc a fibril·les flexibles amb diàmetres d'uns pocs nanòmetres i longituds de diverses micres. Quan s'utilitzen mètodes químics per tractar fibres de

cel·lulosa o CNF, aïllant-ne només la porció cristal·lina, es produeixen els NCC. Aquests consisteixen en estructures rígides, en forma de vareta, amb diàmetres d'uns pocs nanòmetres i longituds de diversos centenars de nanòmetres [4].

El desenvolupament de materials amb propietats barrera per a aplicacions d'envasat requereix disposar les nanocel·luloses en forma de films autoportants (normalment $<100\text{ }\mu\text{m}$ de gruix) o recobriments (capes aplicades a un substrat). Es poden utilitzar diversos mètodes per aconseguir-ho, com ara el "càsting" amb dissolvents, la filtració al buit, l'electro-filatura o "electro-spinning" i l'estucat de substrats o "coating" [5]. Tots aquests enfocaments impliquen la dispersió de nanocel·luloses en aigua, donant lloc a suspensions diluïdes, amb la posterior eliminació d'aigua mitjançant filtració o evaporació, processos que impliquen un temps i/o un consum d'energia significatius.

Aquest estudi introdueix un nou mètode de "deposició seca" per a la fabricació de substrats a base de paper recoberts amb NCC. La innovació principal rau en que tan sols utilitza l'aigua necessària per saturar o humitejar l'estructura del paper per a la dispersió dels NCC. Això redueix significativament el consum d'aigua en comparació amb el procés de "coating" convencional, reduint el temps i l'energia necessaris per a l'assecat. El mètode permet un control precís sobre la morfologia del recobriment de NCC, produint biomaterials amb propietats de barrera controlades, que poden substituir els seus homòlegs fòssils, i alhora ser totalment biodegradables i 100% cel·lulosa.

2. Materials i mètodes

2.1. Materials

Els NCC van ser subministrats per CelluForce Inc. (Montréal, QC, Canadà). Els NCC es van obtenir en forma de pols amb una densitat

aparent de $0,7 \text{ g/cm}^3$, un contingut d'humitat del 4% al 6%, una mida de partícula d'1-50 μm i una superfície específica de $400 \text{ m}^2/\text{g}$. Els cristalls (partícules NCC individuals) tenien una mida nominal de 2,3-4,5 nm d'amplada i 44-108 nm de longitud, amb una densitat d'1,5 g/cm^3 . Com a substrat per als recobriments es va utilitzar paper de filtre quantitatiu Whatman™ de grau 43 amb un gramatge de 95 g/m^2 , un gruix de 220 μm i un diàmetre de 90 mm.

2.2. Deposició en sec i formació de la capa de NCC

La deposició seca de NCC es va dur a terme en un prototip de laboratori dissenyat específicament per a aquest propòsit. L'equip genera una suspensió de partícules de NCC en l'aire i la transporta a una cambra de deposició, on les condicions de flux faciliten la sedimentació de partícules sobre mostres de paper prèviament humitejades.

Abans de la deposició dels NCC, es va introduir la mostra de paper saturada d'aigua a la cambra de deposició i es va iniciar el procés de deposició. Després d'un temps de deposició preestablert, dissenyat per aconseguir un gramatge específic de capa de NCC, es va aturar el sistema i es va retirar la mostra del dispositiu. El paper Whatman™ 43 amb la capa de NCC humida es va transferir a una placa de Petri de plàstic amb una tapa perforada. Les vores de la mostra es van fixar amb la tapa per facilitar l'assecat restringit.

2.3. Mesures d'angle de contacte i absorció d'aigua

L'angle de contacte amb l'aigua (WCA) es va mesurar amb un goniofotòmetre d'angle de contacte OCA15 (Dataphysics). Per a films de NCC purs, les mostres es van muntar sobre una superfície plana (portamostres) utilitzant cinta adhesiva de doble cara. Per al paper recobert de NCC, les mostres es van tallar en tires de $40 \times 5 \text{ mm}$ i es van muntar en un portamostres; aquesta configuració va facilitar la

mesura del WCA inicial i la seva evolució al llarg del temps (absorció d'aigua).

2.4. Mesura de l'inflament per absorció d'aigua dels NCC

Es va estudiar l'inflament unidimensional monitoritzant el canvi de gruix dels films de NCC en contacte amb l'aigua. Primer, es van preparar films de NCC amb un gruix de $170 \pm 12 \mu\text{m}$. Els films es van tallar en cercles amb un diàmetre d'1,3 cm, es van introduir en un tub d'assaig de vidre ple d'aigua destil·lada i es va iniciar una càmera digital controlada per programari de captura d'imatges. La càmera es va configurar per prendre imatges de la secció transversal de la mostra a intervals de temps preestablerts, permetent controlar el procés d'inflament. Es van analitzar totes les imatges amb el programari ImageJ.

2.5. Determinació de les propietats estructurals

Les propietats estructurals del gramatge i el gruix es van determinar segons la norma ISO 534:2011. La rugositat de les mostres es va mesurar mitjançant el mètode Bekk, seguint la norma ISO 5627. Es van provar un mínim de 10 mostres per anàlisi. La porositat teòrica dels films es va calcular com la relació entre el volum de porus (volum buit) i el volum total, utilitzant els valors de densitat de les partícules de NCC individuals. La porositat resultant dels films va ser del $19 \pm 3\%$. Es va utilitzar microscòpia electrònica de rastreig (SEM) per analitzar les característiques superficials dels fulls de paper recoberts amb NCC. Les micrografies es van capturar mitjançant un microscopi JEOL JSM-6400. La brillantor de les mostres es va determinar mitjançant un mesurador de brillantor triangle HG268 d'acord amb la norma ISO 2813.

2.6. Determinació de les propietats barrera

La permeància a l'aire es va mesurar segons el mètode de Bekk. La taxa de transmissió d'oxigen (OTR) es va mesurar utilitzant el MOCON

OX-TRAN Model 1/50 amb una concentració d'oxigen atmosfèric del 100% a una temperatura de 23 °C i 0% d'humitat relativa. La taxa de transmissió de vapor d'aigua (WVTR) de les mostres es va mesurar utilitzant un mètode basat en la norma ISO 2528 (2017). L'absorció d'aigua es va avaluar mitjançant un goniofotòmetre. El canvi en el WCA durant l'absorció d'aigua es va registrar durant un període de temps específic fins que el WCA va assolir un valor de 0°, indicant la fi del procés d'absorció. Per avaluar la interacció amb la tinta, es va dipositar una gota de 2 µL de tinta base aigua sobre la superfície mitjançant una pipeta de precisió, obtenint imatges de les taques de les que se'n va mesurar el diàmetre amb ImageJ.

3. Resultats i discussió

3.1. Aspectes fonamentals de la re-hidratació i re-suspensió dels NCC

En aquest estudi, utilitzem el terme "aglomerats" per referir-nos a les partícules comercials i "partícules NCC individuals" o "cristalls" per referir-nos a les partícules de NCC individuals. El procés complet per a la formació de capes de NCC a través de partícules aerotransportades inclou els passos següents: i. individualització dels aglomerats i transport per flux d'aire, ii. deposició de les partícules sobre el paper saturat d'aigua, iii. hidratació i desagregació dels aglomerats en NCC individuals, i iv. assecat. En els paràgrafs següents, ens centrem en la discussió dels fenòmens d'hidratació, descomposició i difusió per obtenir partícules de NCC individuals (pas iii.).

Un cop un aglomerat de NCC arriba a la superfície del paper saturat d'aigua, poden sorgir dues possibilitats: i. la partícula fa contacte i penetra només a la interfície aire-aigua, o ii. penetra a la interfície aire-aigua i arriba a la interfície fibra-aigua.

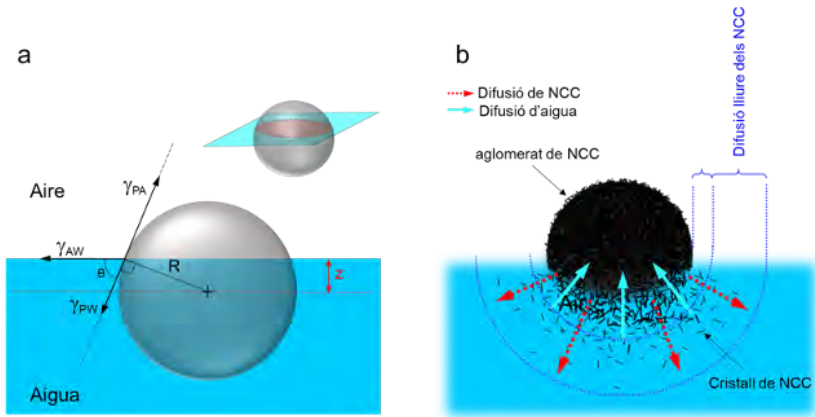


Figura 1. Partícula aglomerat de NCC atrapada o adsorbida a la interfície aire-aigua i les tensions interfacials implicades (a); procés de desintegració d'una partícula d'aglomerat NCC atrapada a la interfície aire/aigua (b).

L'adsorció (Figura 1a) es pot descriure en termes d'energia interfacial total, i l'energia lliure mínima del sistema determina la posició d'equilibri de la partícula. L'energia total, G , que depèn de les respectives àrees de contacte, A , i les tensions interfacials, γ , es pot expressar de la següent manera:

$$G = \gamma_{PA}A_{PA} + \gamma_{PW}A_{PW} - \gamma_{AW}A_{AW} \quad [1]$$

A_{PA} i A_{PW} són les àrees de les interfícies partícula-aire i partícula-aigua, A_{WA} és l'àrea de la interfície aigua-aire que falta o "desapareguda" a causa de la presència de la partícula. γ_{PA} , γ_{PW} i γ_{AW} són les tensions interfacials per a les interfícies partícula-aire, partícula-aigua i aire-aigua, respectivament. En el cas de partícules d'esfèriques amb un radi R , aquesta equació porta a [6]:

$$G = \pi R^2 \gamma_{AW} \left(\tilde{Z}^2 + 2\tilde{Z} \frac{\gamma_{PA} - \gamma_{PW}}{\gamma_{AW}} \right) + 2 \frac{(\gamma_{PA} + \gamma_{PW})}{\gamma_{AW}} - 1 \quad [2]$$

On $\tilde{Z} = z/R$ és la posició vertical del centre de la partícula respecte a la interfície aire-aigua (Figura 1a).

La representació de l'energia total en funció de $\tilde{Z}$ que va des de -1 (partícula completament immersa en aigua) fins a 1 (partícula completament a l'aire) produeix una corba en la qual es pot identificar un pou d'energia superficial (on la partícula està atrapada). Això s'ha calculat per primera vegada per a aglomerats de NCC, en un rang de mides de partícula de 10 a 50 μm . La posició exacta del pou d'energia superficial es pot determinar mitjançant la diferenciació $\frac{dG}{d\tilde{Z}} = 0$, i es pot calcular l'energia associada amb aquest punt, $G(\tilde{Z}_{min})$. Aleshores, es pot determinar l'energia necessària per moure la partícula des de la seva posició d'equilibri cap a la fase fluida ΔG_W i ΔG_A .

Com que l'angle de contacte d'equilibri termodinàmic es defineix quan , el canvi d'energia també es pot calcular introduint l'equació de Young, donant com a resultat la coneguda equació [7]:

$$\Delta G = \pi R^2 \gamma_{AW} (1 \pm \cos \Theta)^2 \quad [3]$$

Com es mostra a l'Equació 3, el canvi d'energia lliure depèn fortament del radi de la partícula ($\Delta G \propto R^2$), cosa que indica que les partícules més petites tenen significativament menys energia d'adhesió. L'energia necessària és notablement més alta quan es mou la partícula cap a la fase aire. No obstant això, fins i tot per a ΔG_W i les partícules més petites ($\varnothing = 1 \mu\text{m}$), l'energia supera l'energia tèrmica $k_B T$ en un factor de 10^6 , cosa que indica una unió forta i irreversible de la partícula de NCC a la interfície.

Els aglomerats de NCC no són estables i els efectes dinàmics relacionats amb la hidratació, la degradació i la dispersió comencen en

contacte amb l'aigua (Figura 1b). Tanmateix, com s'ha assenyalat anteriorment, és important reconèixer que aquests fenòmens es produeixen a la interfície aire-aigua (i, en conseqüència, a la superfície del substrat de paper), ja que les partícules hi queden “atrapades”, cosa que és molt rellevant per a la creació de la capa superficial de NCC. Els passos principals són els següents: (1) difusió d'aigua a l'estructura d'aglomerat de NCC, (2) inflament per hidratació de l'estructura, (3) ruptura de l'estructura i (4) dispersió de cristalls (Figura 1b).

3.2. Inflament per hidratació

Es va investigar l'inflament per hidratació dels aglomerats de NCC en contacte amb l'aigua per obtenir informació sobre l'escala de temps necessària per a la desintegració completa en cristalls individuals. Tots els films estudiats van mostrar augment del gruix mantenint la seva integritat estructural durant els primers 60 minuts després del contacte inicial amb l'aigua. Es van observar dues fases diferents: La fase inicial, que va durar els primers 3 minuts, va mostrar una taxa d'inflament de $12 \text{ mm}^3/\text{min}$ i es va caracteritzar per una ràpida absorció d'aigua. La segona fase va començar després dels primers 3 minuts i va continuar fins al final, durant els quals la taxa d'inflament va disminuir a $2 \text{ mm}^3/\text{min}$. S'han reportat fenòmens similars en estudis sobre la interacció de films de NCC de gruix nanomètric amb vapor d'aigua i aigua líquida. En aquests estudis, l'inflament en dues fases es va atribuir a una ràpida absorció d'aigua inicial que omplia els nanoporus dins de l'estructura del film, seguida d'una fase més lenta impulsada per la humectació entàlpica dels cristalls. Es va proposar que aquesta humectació interrompia els enllaços d'hidrogen inter-partícula (responsables de la cohesió del film), i formava enllaços d'hidrogen NCC-aigua, que permetien la incorporació de múltiples capes moleculars d'aigua a l'espai interparticular.

3.3. Difusió de l'aigua en els films

Les proves d'inflament per aigua van permetre calcular el coeficient de difusió de l'aigua dins dels films. L'equació empírica de transport d'aigua proposada per Reid et al. [8] es va utilitzar per determinar el mecanisme de difusió de l'aigua. L'exponent adimensional de difusió "n" es va calcular a partir dels experiments i va donar un valor de $n = 0,4$, cosa que indica que l'absorció d'aigua per part de la NCC demostra un comportament gairebé Fickià. Sota la suposició de difusió Fickiana, el coeficient de difusió de l'aigua per als films de NCC es va calcular de la següent manera [9]:

$$D_w = \frac{\pi h^2}{t} \left(\frac{m^w}{4m^d} \right)^2 \quad [4]$$

on D_w és el coeficient de difusió de l'aigua (en $\mu\text{m}^2/\text{s}$), h és el gruix inicial del film (en μm), t és el temps (en segons) i m^d i m^w són els pesos dels films secs i humits, respectivament (en g). L'evolució de la velocitat de difusió es va calcular després del punt de transició, ja que l'estructura dels porus pot fer que l'absorció d'aigua es desviï del règim de difusió de Fick durant l'etapa inicial d'inflament. El coeficient de difusió és alt al principi i s'estabilitza al voltant d'un valor de $68 \mu\text{m}^2/\text{s}$. En conseqüència, el temps necessari per difondre una distància de $10 \mu\text{m}$ dins de la pel·lícula es va calcular utilitzant la segona llei de Fick, donant un valor de < 1 s. Atès que la majoria dels aglomerats NCC tenen diàmetres inferiors a $10 \mu\text{m}$ i experimenten una difusió bidimensional, s'estima que el temps necessari per a la hidratació completa d'un aglomerat NCC és inferior a un segon.

3.4. Estabilitat cinètica de les partícules de NCC i difusió dels NCC

La separació dels NCC en els films s'inicia en l'estat sec, on les partícules es troben en contacte i amb una distància interparticular mínima. La introducció d'aigua provoca l'inflament del film i un augment progressiu d'aquesta distància. La cohesió està governada

per forces interparticulars, que també determinen l'escala temporal de la desintegració, principalment per repulsió electrostàtica. Per analitzar les interaccions, es van calcular corbes DLVO per a diferents escenaris a partir dels films en estat sec. A distàncies molt curtes ($<0,1$ nm), dominen les forces atractives de Van der Waals, amb una contribució significativa dels enllaços d'hidrogen deguda als grups hidroxil dels NCC ($<0,3$ nm), mantenint la cohesió del film. Les interaccions de Van der Waals s'estenen fins a 100 nm, però esdevenen insignificants a distàncies superiors a 3 nm. L'augment de la separació s'atribueix a la incorporació d'aigua, i a mesura que els NCC es dilueixen, la repulsió electrostàtica passa a dominar, promovent una separació addicional.

La longitud de Debye calculada per a suspensions de NCC va ser de 8,9 nm a l'1% (p/p), disminuint amb l'augment de la concentració fins a 0,1 nm en films secs, d'acord amb la literatura. Un cop superat el rang de les forces repulsives (~ 20 nm) i reduït l'efecte de la difusió d'aigua als aglomerats, la separació addicional dels nanocristalls només és possible mitjançant la seva difusió individual en el medi aquós. Aquests resultats indiquen que la formació de capes de NCC no està limitada per la individualització de la pols de NCC sobre el paper, sinó per factors operatius, principalment la capacitat del sistema de deposició per generar i dipositar un flux massic suficient de partícules en suspensió d'aire.

3.5. Caracterització morfològica i propietats barrera dels papers estucats amb NCC

La porositat superficial del paper s'oclueix progressivament amb l'augment del gramatge de la capa de NCC. El paper no recobert presenta fibres clarament visibles, mentre que amb només 5 ± 3 g/m² les fibres ja apareixen cobertes, indicant una obstrucció de la porositat superficial. A 12 ± 3 g/m², la major part dels porus estan bloquejats, tot i que encara se'n detecten alguns, i a 20 ± 3 g/m² s'assoleix una cobertura completa. La rugositat Bekk i la brillantor augmenten

gradualment amb el gramatge de la capa de NCC, assolint valors màxims a 51 ± 5 g/m²; tanmateix, ambdues propietats es poden considerar estabilitzades a partir de 30–40 g/m². Les propietats de barrera davant líquids i gasos estan fortament condicionades per la capa de NCC. Per sota de 12 ± 3 g/m², l'absorció d'aigua és molt ràpida (<3 s), mentre que per gramatges superiors a 20 ± 3 g/m² el temps d'absorció augmenta fins a 3,5–10 min (Figura 2a), en coherència amb l'obstrucció observada per SEM.

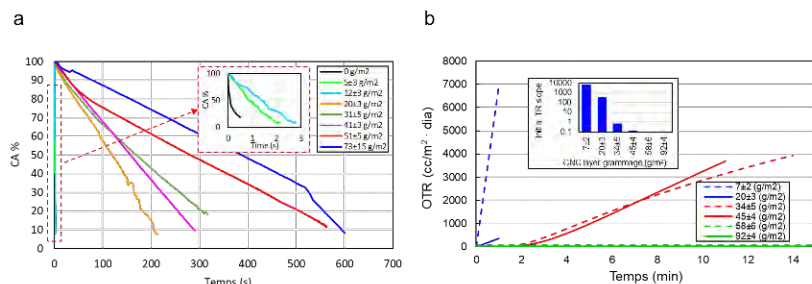


Figura 2. Canvi en l'angle de contacte (expressat com a % de l'angle de contacte inicial) en absorbir la gota d'aigua (a); Valors OTR en funció de l'augment del pes del recobriments de la capa NCC (b).

L'anàlisi de taques de tinta mostra un diàmetre màxim de 5,5 mm per al paper no recobert, que disminueix lleugerament fins a 12 ± 3 g/m² i cau bruscament fins a estabilitzar-se al voltant de 2 mm per gramatges superiors a 20 ± 3 g/m², indicant una expansió superficial molt més limitada. A 5 ± 3 g/m² s'observen dues taques diferenciades, atribuïdes a estructures de porus diferents que retenen el colorant, mentre que a gramatges superiors a 20 ± 3 g/m² les taques d'alta intensitat indiquen que la tinta (i l'aigua) queda atrapada dins la capa NCC sense arribar al substrat fibrós. L'OTR de les mostres amb gramatges NCC inferiors a 20 g/m² és extremadament elevada, implicant mesuraments estables per saturació ràpida del sensor (Figura 2b). A gramatges superiors, la

capa NCC proporciona una excel·lent barrera a l'oxigen, amb valors OTR inferiors a 1 cc/m²-dia, per sota del límit de detecció de l'equip, indicant que estem amb materials d'alta barrera. La transició des d'una baixa a alta barrera es produeix entre 20 i 45 g/m². Finalment, la barrera al vapor d'aigua i a l'aire millora clarament amb l'augment del gramatge de la capa NCC. Es va observar un increment en els segons Bekk de permeància i una disminució dels valors de WVTR amb el gramatge de capa de NCC, en acord amb la literatura.

4. Conclusions

Les imatges SEM mostren una obstrucció progressiva dels porus del paper, amb cobertura completa a 12 ±3 g/m² i superfícies llises i uniformes a gramatges superiors; les seccions transversals indiquen que el NCC es manté principalment a la superfície, amb difusió mínima al paper base. La suavitat de Bekk i la brillantor augmenten amb el gramatge de la capa NCC fins a estabilitzar-se a 30–40 g/m². La capa NCC influeix significativament en la cinètica d'absorció d'aigua, com confirmen les proves de taques de tinta, que revelen diferents estructures de porus. Les proves OTR identifiquen una transició de baixa a alta barrera, mentre que la barrera al vapor d'aigua i a l'aire millora amb l'augment del gruix de la capa, en coherència amb les observacions SEM. El sistema de deposició en sec de pols de NCC es seguirà aplicant en futurs treballs.

Agraïments

Aquesta publicació forma part del projecte PID2020-114070RB-I00 (CELLECOPROD), finançat per MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Els autors també volen agrair al grup de recerca consolidat AGAUR 2021 SGR 00852.

Referències

- [1] Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, *OECD Publishing*, Paris, 2022, accessed February 11, 2025.
- [2] Nayanathara Thathsarani Pilapitiya, P.G.C., & Ratnayake, A.S. (2024). The world of plastic waste: a review. *Clean. Mater.*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- [3] Sander, M., Weber, M., Lott, C., Zumstein, M., Künkel, A., & Battagliarin, G. (2023). Polymer biodegradability 2.0: a holistic view on polymer biodegradation in natural and engineered environments *Advances in Polymer Science*, 65–110. https://doi.org/10.1007/12_2023_163
- [4] Chu, G., Vasilyev, G., Qu, D., Deng, S., Bai, L., Rojas, O.J. et al. (2020). Structural arrest and phase transition in glassy nanocellulose colloids, *Langmuir*, 36, 979–985. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03570>
- [5] Wang, Q., Yao, Q., Liu, J., Sun, J., Zhu, Q., Chen, H. (2019). Processing nanocellulose to bulk materials: a review. *Cellulose*, 26, 7585–7617. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02642-3>
- [6] Ballard, N., Law, A.D., & Bon, S.A.F. (2019). Colloidal particles at fluid interfaces: behaviour of isolated particles. *Soft Matter*, 15, 1186–1199. <https://doi.org/10.1039/C8SM02048E>
- [7] Shi, S., & Russell, T.P. (2018). Nanoparticle assembly at liquid–liquid interfaces: from the nanoscale to mesoscale. *Adv. Mater.*, 30. <https://doi.org/10.1002/adma.201800714>
- [8] Reid, M.S., Kedzior, S.A., Villalobos, M., & Cranston, E.D. (2017). Effect of ionic strength and surface charge density on the kinetics of cellulose nanocrystal thin film swelling. *Langmuir*, 33, 7403–7411. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b01740>
- [9] Gagliardi, M. (2019). Mathematical modeling and experimental study of water diffusion and swelling in polymer films, *Macromol. Theory Simul.*, 28. <https://doi.org/10.1002/mats.201800063>

Modelización de deslizamientos inducidos por lluvia en un contexto de cambio climático

Alfonso Rodriguez-Dono

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Ehsan Badakshan

Escola Tècnica S. d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Fei Song

School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji
University, China

Yimiao Wei

School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and
Technology, China

Sebastià Olivella, Jean Vaunat

Escola Tècnica S. d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Mónica Buitrago, Àngel Priegue, Sergio Valero, Oscar Frutos

Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)

Resumen

Este artículo muestra cómo la simulación numérica acoplada puede contribuir a mejorar la resiliencia climática de infraestructuras situadas en entornos con riesgo de deslizamientos. Se utiliza el simulador termo-hidro-mecánico-químico acoplado CODE_BRIGHT para analizar la inestabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados sometidos a episodios de lluvia intensa, reproduciendo procesos clave como la pérdida de succión, la disminución de la cohesión aparente y la aparición de deformaciones progresivas que pueden preceder al

fallo. Se comparan distintas formulaciones constitutivas representativas (Drucker-Prager, CAP y una aproximación hiperbólica de Mohr-Coulomb) y se evalúa la influencia de factores habituales del terreno real, como la presencia de fracturas y la heterogeneidad y anisotropía espacial de la permeabilidad. Como caso de estudio, se analiza el talud de Montjuïc (Barcelona) para ilustrar la respuesta hidromecánica bajo diferentes patrones de precipitación y forzamiento atmosférico. Finalmente, se discute el potencial de estos modelos para apoyar la monitorización y la alerta temprana, por ejemplo mediante la generación de bases de datos sintéticas para entrenar modelos híbridos con IA, y su alineación con líneas de investigación en adaptación al cambio climático, sostenibilidad y resiliencia.

Abstract

This article shows how coupled numerical simulation can support climate-resilient infrastructure in landslide-prone environments. The coupled thermo-hydro-mechanical simulator CODE_BRIGHT is used to analyze rainfall-induced slope instability in partially saturated soils, capturing key processes such as suction loss, reduction of apparent cohesion, and progressive deformation that may precede failure. Several representative constitutive formulations (Drucker-Prager, CAP and a hyperbolic Mohr-Coulomb approximation) are compared, and the role of typical real-ground features is assessed, including embedded fractures and spatially heterogeneous and anisotropic permeability. The Montjuïc slope (Barcelona) is used as a case study to illustrate critical hydromechanical responses under different rainfall patterns and atmospheric forcing. The article also discusses how simulation outputs can support monitoring and early-warning schemes, for instance by producing synthetic datasets to train hybrid AI models, within broader research lines on climate adaptation, sustainability and resilience.

1. Introducción

Los deslizamientos de taludes se encuentran entre los peligros naturales con mayor capacidad de afectar a personas, activos e infraestructuras. En un contexto de cambio climático, el riesgo puede aumentar no solo por cambios en los promedios, sino también por la intensificación de los extremos. En regiones mediterráneas, la combinación de periodos secos más largos con episodios de lluvia

más concentrada favorece secuencias de humectación y secado, cambios rápidos en el contenido de agua del suelo y aumentos puntuales de presión de poros. Estos procesos pueden reducir la resistencia del terreno y activar deformaciones progresivas hasta alcanzar la rotura del talud y su deslizamiento (Duan et al., 2024).

La Figura 1 ilustra este marco climático a escala europea para finales del siglo XXI (2071-2100) en comparación con el periodo 1971-2000 (EEA, 2015). A la izquierda se muestran los cambios proyectados en la temperatura media anual, con incrementos generalizados en gran parte de Europa. A la derecha se representa el cambio porcentual de la precipitación anual: se aprecia un patrón espacial contrastado, con descensos en amplias zonas del sur y aumentos en parte del norte. En el ámbito mediterráneo, este tipo de señal climática suele asociarse a mayor estrés hídrico y, al mismo tiempo, a una mayor relevancia de las lluvias intensas de corta duración, que son precisamente las que pueden desencadenar respuestas críticas en taludes y laderas.

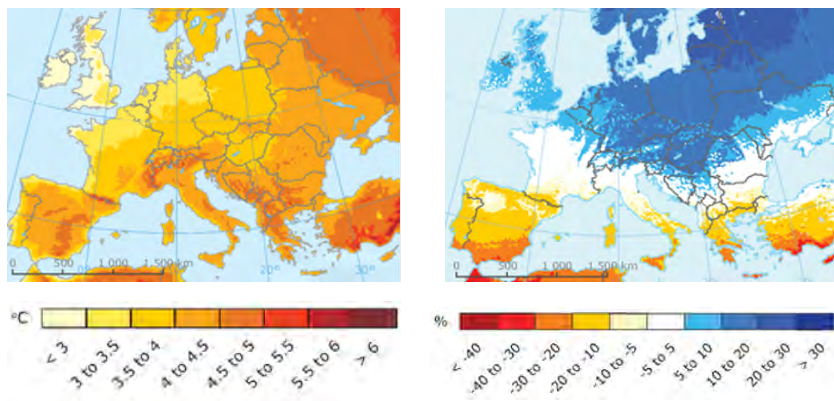


Figura 1. Cambios proyectados en la temperatura media anual (izquierda) y en la precipitación anual (derecha) en Europa para 2071-2100 respecto a 1971-2000.

Fuente: European Environment Agency (EEA, 2015).

Ante este escenario, la ingeniería geotécnica necesita herramientas que permitan conectar el clima con el comportamiento del terreno de manera físicamente consistente. En particular, resulta clave representar de forma acoplada la infiltración, la evolución de la succión en suelos parcialmente saturados, la generación y disipación de presiones de poros y su efecto sobre la deformación y la estabilidad. En este artículo se emplea el simulador termo-hidro-mecánico-químico acoplado CODE_BRIGHT (Olivella et al., 1996) para analizar taludes sometidos a lluvia, evaluando cómo la respuesta depende del modelo de comportamiento del suelo y de rasgos habituales del terreno real, como la presencia de discontinuidades y la variabilidad espacial de la permeabilidad. Además, se discute cómo los resultados de simulación pueden traducirse en indicadores prácticos para la monitorización y la alerta temprana, por ejemplo, mediante valores umbral y bases de datos sintéticas útiles para modelos predictivos.

2. Contexto: De simulaciones a soporte operativo (RESILMOB)

Este artículo se enmarca en el desarrollo de herramientas orientadas a conectar la modelización numérica con la gestión práctica del riesgo por inestabilidad de taludes en infraestructuras. El enfoque persigue trasladar resultados de simulación, a menudo difíciles de explotar directamente en entornos operativos, a indicadores interpretables y accionables para la toma de decisiones. En particular, se combinan tres componentes complementarios: (a) simulaciones numéricas acopladas de alta fidelidad, que permiten entender mecanismos y generar bases de datos sintéticas bajo múltiples escenarios; (b) adquisición de datos in situ y meteorológicos (precipitación, humedad, presión de poros, desplazamientos), que describen el estado actual del sistema; y (c) modelos predictivos que integran ambos tipos de información para realizar una evaluación periódica del riesgo y, cuando procede, emitir alertas.

En la línea de planteamiento de RESILMOB, las simulaciones desempeñan un papel específico: proporcionar un “espacio de referencia” físico con el que relacionar señales observadas (por ejemplo, ventanas recientes de lluvia) con respuestas del terreno (aumento de saturación, pérdidas de succión, aceleración de deformaciones) y con estados cercanos a condiciones críticas. Esta información puede emplearse para entrenar modelos híbridos (numéricos y de aprendizaje automático) capaces de actualizar diariamente un indicador de riesgo. A efectos operativos, dichos indicadores se traducen en categorías simples de interpretación —por ejemplo, mediante semáforos— que facilitan la comunicación del nivel de alerta y la priorización de actuaciones de inspección, seguimiento o mitigación.

3. Metodología numérica con CODE_BRIGHT

CODE_BRIGHT es un simulador orientado a medios geológicos capaz de resolver procesos acoplados termo-hidro-mecánicos (y, cuando procede, químicos) en suelos y rocas. Aplicado a taludes sometidos a lluvia, su valor principal es que integra en un mismo marco tres aspectos que, en la práctica, están estrechamente conectados: (i) cómo el agua de lluvia se infiltra y se redistribuye en el terreno a lo largo del tiempo, (ii) cómo cambian las condiciones de humedad en suelos parcialmente saturados, incluida la succión, y el efecto de esos cambios sobre tensiones efectivas y resistencia del terreno, y (iii) cómo responde el talud desde el punto de vista mecánico, desde deformaciones progresivas hasta la plastificación y el desarrollo de una posible superficie de rotura.

En términos operativos, el flujo de trabajo es directo. Primero se define en GiD la geometría del talud, la discretización (malla) y las condiciones de contorno e iniciales. A continuación, se ejecuta el cálculo en CODE_BRIGHT (Olivella et al., 2025) y se postprocesan los resultados

para identificar variables hidromecánicas relevantes (por ejemplo, contenido de agua, succión/presión de poros, tensiones y deformaciones) y su evolución durante el episodio de lluvia. Esta trazabilidad temporal es especialmente útil para relacionar patrones de precipitación con respuestas críticas del terreno y con indicadores potencialmente aplicables a monitorización y alerta.

3.1. Suelos parcialmente saturados y pérdida de cohesión por succión

En suelos parcialmente saturados, el agua no llena por completo los poros del suelo y el aire coexiste con el agua. En estas condiciones aparece la denominada succión matricial (presión negativa del agua), que actúa como un “pegamento” efectivo entre partículas y contribuye a aumentar la resistencia al corte. Este aumento suele describirse como cohesión aparente: no implica que el material sea cohesivo en sentido estricto, sino que la succión aporta una componente adicional de resistencia mientras el suelo permanece parcialmente saturado. Un ejemplo intuitivo es la arena ligeramente húmeda en la playa, donde la capilaridad y la succión permiten que un castillo de arena mantenga su forma; si la arena se satura o se seca por completo, disminuyen o

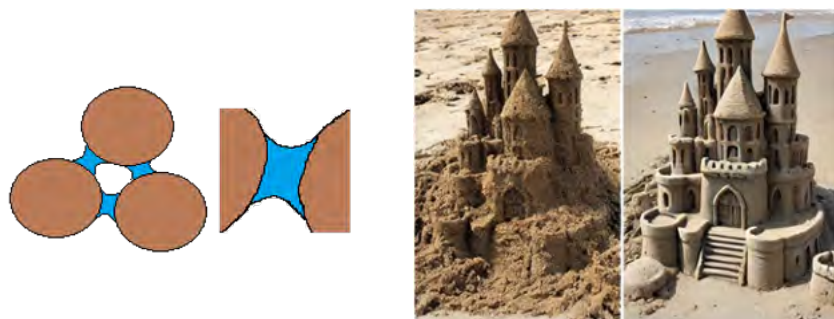


Figura 2. Cohesión aparente por succión: puentes capilares (izquierda) y castillo de arena (derecha). Al saturarse o secarse, se pierde estabilidad.

desaparecen los puentes capilares y se pierde esa contribución adicional, reduciendo la estabilidad (Figura 2).

Durante un episodio de lluvia, la infiltración incrementa el contenido de agua y reduce la succión. Como consecuencia, disminuye esa contribución adicional a la resistencia y el suelo puede pasar a un estado más cercano a la saturación, en el que se movilizan con mayor facilidad deformaciones y mecanismos de fallo. Este proceso puede ser rápido en superficie y más lento en profundidad, generando gradientes de humedad y zonas debilitadas que favorecen deformaciones acumulativas y, en algunos casos, fallos progresivos.

En CODE_BRIGHT, este efecto se incorpora de forma natural al resolver el flujo transitorio y su acoplamiento con el problema mecánico. La dependencia de la resistencia con el estado hidráulico puede introducirse mediante relaciones constitutivas en las que la cohesión (o parámetros equivalentes) evoluciona con la succión o con variables relacionadas con la saturación, permitiendo que el modelo refleje la pérdida de resistencia conforme avanza la humectación.

3.2. Modelos constitutivos considerados

Se consideran tres formulaciones representativas para describir el comportamiento elastoplástico del terreno: (i) Criterio de rotura Drucker-Prager, útil por su robustez numérica y por permitir incorporar una cohesión dependiente de la succión (Figura 3 izquierda); (ii) Criterio de rotura CAP, adecuado para representar compresibilidad y evolución de la respuesta volumétrica (endurecimiento o ablandamiento) bajo distintos estados tensionales (Figura 3 centro); y (iii) una aproximación hiperbólica de Mohr-Coulomb, que suaviza la superficie de rotura y mejora la estabilidad numérica en tracción y a bajas tensiones medias (Figura 3 derecha). La comparación entre modelos permite evaluar la sensibilidad de los desplazamientos, la

profundidad y geometría de los mecanismos de deformación, y la evolución de variables hidráulicas bajo episodios de lluvia.

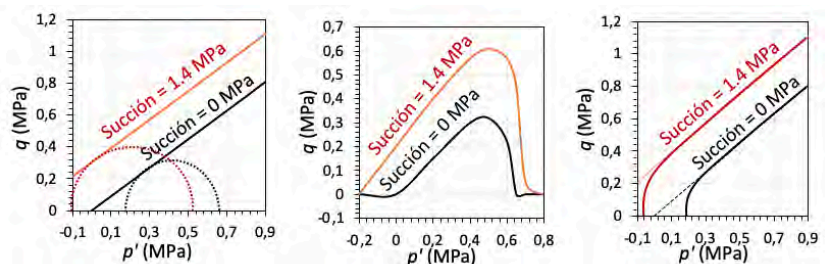


Figura 3. Criterios de rotura e influencia de la succión en la cohesión aparente: Criterio de rotura de Drucker-Prager (izquierda); Criterio de rotura CAP (centro). Criterio de rotura Mohr-Coulomb hiperbólico (derecha).

3.3. Fracturas embebidas y realimentación permeabilidad-deformación

La presencia de discontinuidades, o su desarrollo progresivo durante la deformación del talud, puede generar caminos preferentes de flujo y acelerar la respuesta hidrológica. Para representar este efecto sin introducir explícitamente una red de fracturas, se utiliza un esquema de fracturas embebidas que vincula la deformación con la capacidad de conducción hidráulica del medio (Rodríguez-Dono et al., 2024). En particular, se introduce una relación constitutiva entre la deformación volumétrica y la permeabilidad intrínseca, de modo que, al superar un umbral de deformación, la permeabilidad puede aumentar varios órdenes de magnitud (Figura 4 izquierda). Este aumento local no solo intensifica la infiltración, sino que canaliza el flujo hacia zonas deformadas, incrementando la conectividad hidráulica y favoreciendo la aparición de trayectorias de alta permeabilidad (Figura 4 derecha). Se establece así un bucle de realimentación: más deformación implica mayor permeabilidad, lo que facilita la entrada y redistribución de agua

y favorece, a su vez, nuevas deformaciones. El mecanismo resulta especialmente relevante bajo eventos extremos de lluvia, donde pequeñas aperturas o redistribuciones internas pueden traducirse en cambios significativos de conectividad hidráulica y, por tanto, en una aceleración del proceso de rotura.

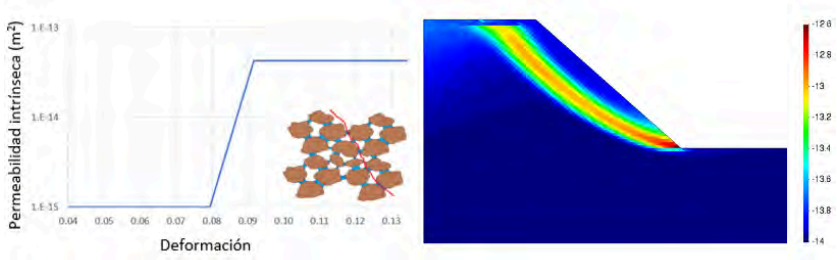


Figura 4. Fracturas embebidas: aumento de permeabilidad con la deformación volumétrica (izquierda) y distribución espacial de la permeabilidad intrínseca en el talud tras un periodo de lluvias (derecha).

3.4. Heterogeneidad y anisotropía espacial

Los taludes reales presentan variabilidad espacial en propiedades hidráulicas y mecánicas. Para aproximar mejor esta realidad, se han incorporado a CODE_BRIGHT módulos que permiten definir campos heterogéneos a partir de distribuciones estadísticas con correlación espacial, incluyendo anisotropía (correlación dependiente de la dirección) alineada con estratificación u otras estructuras preferentes (Rodríguez-Dono et al., 2023; Zhou et al., 2024). La Figura 5 ilustra ejemplos de distribuciones heterogéneas de permeabilidad intrínseca con anisotropía aproximadamente paralela y perpendicular al talud, lo que puede modificar tanto la conectividad hidráulica como la localización de deformaciones y mecanismos de inestabilidad. Estas capacidades permiten pasar de predicciones estrictamente

deterministas a análisis más robustos que incorporan, de forma explícita, incertidumbre geológica.

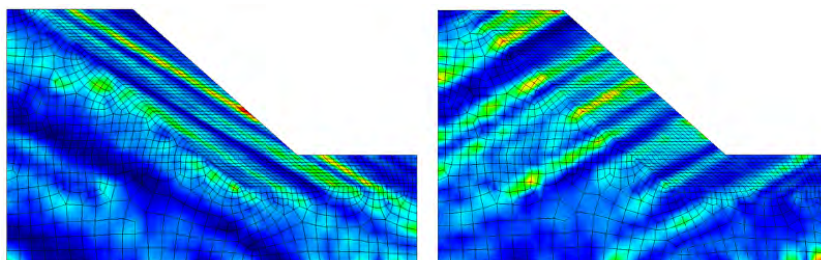


Figura 5. Heterogeneidad y anisotropía espacial de la permeabilidad intrínseca: ejemplos de campos aleatorios con estructuras preferentes paralelas (izquierda) y perpendiculares (derecha) al talud.

3.5. Condiciones atmosféricas y forzamiento climático (THM)

Más allá de prescribir la lluvia como una condición de contorno hidráulica, la formulación THM permite incorporar forzamientos atmosféricos variables en el tiempo (temperatura, radiación, presión del gas, evapotranspiración), lo que resulta relevante para representar ciclos de secado y humectación y para evaluar la respuesta del talud bajo escenarios de cambio climático (Badakhshan et al., 2024). En desarrollos recientes de la interfaz, estas condiciones de contorno pueden definirse mediante funciones temporales y vincularse a series meteorológicas externas, facilitando el uso de datos reales en simulaciones transitorias. En particular, es factible automatizar la importación de series de precipitación desde fuentes regionales (por ejemplo, METEOCAT) para alimentar simulaciones recurrentes y derivar indicadores operativos de respuesta y riesgo.

4. Caso de estudio: Talud de Montjuïc (Barcelona)

El talud de Montjuïc constituye un caso representativo de infraestructura urbana expuesta a inestabilidad bajo episodios de lluvia. Se han desarrollado dos niveles de modelización: un modelo simplificado para estudiar mecanismos y sensibilidad a parámetros, y un modelo más realista para aproximar condiciones geométricas y litológicas del emplazamiento. En ambos casos se analizan secuencias de episodios de lluvia con distinta intensidad y duración, intercaladas con periodos de secado.

4.1. Modelo simplificado y episodios de lluvia

El modelo simplificado reproduce la parte alta del talud y permite comparar, con coste computacional reducido, el efecto de los distintos modelos constitutivos y la inclusión de fracturas embebidas. Un resultado recurrente es que episodios de menor intensidad, pero mayor duración, pueden producir desplazamientos máximos más elevados que lluvias intensas cortas, al permitir mayor penetración del frente de humectación y reducción de succión a mayor profundidad. El seguimiento del grado de saturación a distintas profundidades resulta útil para explicar el carácter acumulativo de la deformación y la 'memoria' hidrológica entre eventos.

4.2. Modelo real y conexión con observaciones

El modelo real incorpora la geometría, malla y zonificación de materiales (por ejemplo, una base rocosa esencialmente elástica y una zona superficial con comportamiento elastoplástico), así como condiciones de contorno hidráulicas consistentes con lluvia y presión líquida en superficie. Este nivel permite contrastar patrones de deformación y ubicaciones potenciales de fisuración o tracción con evidencias observadas durante episodios de lluvia, y proporciona entradas para sistemas de monitorización y alerta.

5. Resultados principales

Los resultados confirman que la infiltración reduce la succión y, con ello, la cohesión aparente y la resistencia al corte disponible, activando deformación progresiva. Las variables clave para interpretar la evolución del estado del talud son: desplazamientos acumulados, grado de saturación, presión de agua (o succión) y permeabilidad intrínseca (especialmente cuando se activa el mecanismo de fracturas embebidas).

En particular, la evolución temporal muestra una respuesta no lineal con incrementos escalonados de desplazamiento asociados a episodios de lluvia y al aumento del grado de saturación, lo que evidencia el carácter acumulativo del proceso y la “memoria” hidrológica entre eventos (Figura 6b). Además, la distribución espacial de desplazamientos permite identificar las zonas más activas y la geometría del mecanismo movilizado tras los periodos lluviosos (Figura 6a).

En comparaciones entre formulaciones, se observan diferencias en la localización y profundidad del mecanismo de fallo, así como en la ‘suavidad’ de la respuesta: modelos con mayor sensibilidad volumétrica o con fracturas embebidas tienden a mostrar transiciones más abruptas en saturación y presión, mientras que simulaciones THM con condiciones atmosféricas producen evoluciones más graduales y realistas durante periodos sin lluvia. Estas diferencias son relevantes para seleccionar modelos según el objetivo: evaluación rápida a gran escala, análisis detallado en medios fracturados o simulación de largo plazo bajo forzamiento climático.

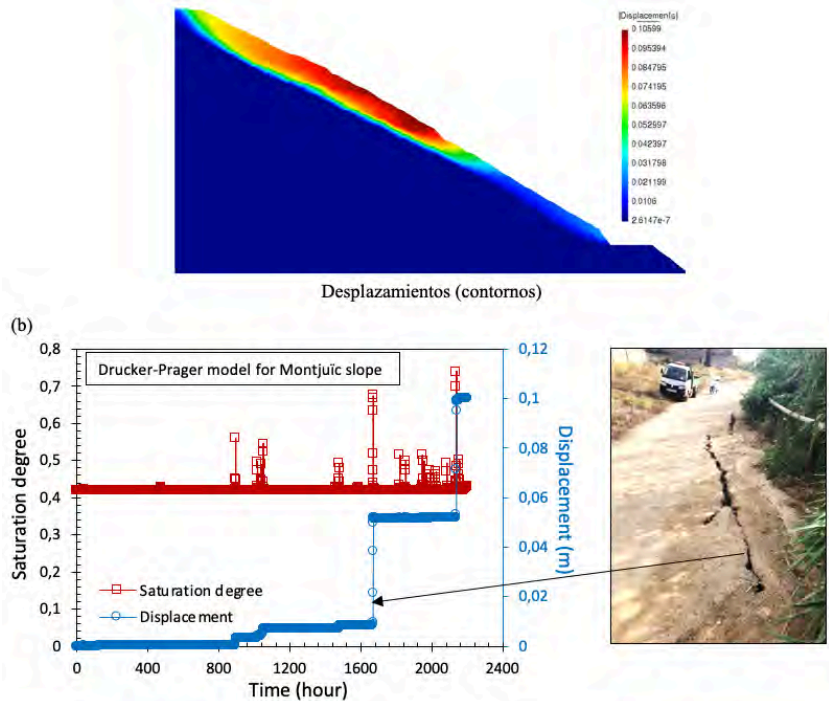


Figura 6. a) Contornos de desplazamientos finales en el talud tras episodios de lluvia;
 b) Evolución temporal del desplazamiento y del grado de saturación del agua, mostrando incrementos asociados a periodos lluviosos.

6. Conclusiones y trabajo futuro

CODE_BRIGHT permite representar, con un nivel de detalle elevado, la interacción hidromecánica que conduce a inestabilidad de taludes bajo lluvia, incluyendo suelos no saturados, pérdida de succión, fracturación y variabilidad espacial. La comparación de modelos constitutivos y la incorporación de condiciones atmosféricas constituyen elementos esenciales para evaluar la respuesta bajo escenarios climáticos cambiantes. Como trabajo futuro inmediato, se plantea (i) consolidar el modelo real con calibración sistemática a partir de observaciones, (ii)

automatizar el uso de series meteorológicas para análisis recurrentes, y (iii) reforzar la conexión con esquemas de alerta temprana para soporte a la toma de decisiones.

Referencias

- Badakhshan, E., Vaunat, J., & Veylon, G. (2024). Meteorological and vegetation effects on the thermal analysis of slopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196, 114352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114352>
- Duan, G., Song, F., Wang, H., Rodriguez-Dono, A., Wang, L., & Chen, J. (2024). Stability analysis of unsaturated loess slopes subjected to extreme rainfall incorporating creep effects. *Computers and Geotechnics*, 169, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106231>
- European Environment Agency. (2015). *Climate change impacts and adaptation*. <https://www.eea.europa.eu/soer/2015/europe/climate-change-impacts-and-adaptation>
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., & Alonso, E. E. (1996). Numerical formulation for a simulator CODE_BRIGHT for the coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*, 13(7), 87-112. <https://doi.org/10.1108/02644409610151575>
- Olivella, S., Vaunat, J., & Rodriguez-Dono, A. (2025). *CODE_BRIGHT User's Guide*.
- Rodriguez-Dono, A., Zhou, Y., & Olivella, S. (2023). A new approach to model geomaterials with heterogeneous properties in thermo-hydro-mechanical coupled problems. *Computers and Geotechnics*, 159, 105400. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105400>
- Rodriguez-Dono, A., Zhou, Y., Olivella, S., & Gens, A. (2024). Modelling a gas injection experiment incorporating embedded fractures and heterogeneous material properties. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 38, 100552. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100552>
- Zhou, Y., Rodriguez-Dono, A., & Olivella, S. (2024). A spatially correlated heterogeneous anisotropic model for simulation of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone. *Computers and Geotechnics*, 173, 106570. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106570>

Medir para transformar: el papel de los inventarios municipales de GEI en la acción climática en Cataluña

Macarena Antonucci Hidalgo

Institut Universitari de Recerca en Ciència i Tecnologies de la Sostenibilitat

Olga Alcaraz

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament de Física

Boris Lazzarini

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resumen

El cambio climático es uno de los principales desafíos globales y afrontarlo requiere acciones que se ajusten a las necesidades y capacidades de cada territorio. Los gobiernos locales son actores claves para avanzar en la acción climática efectiva, pero enfrentan dificultades al conectar diagnósticos cuantitativos con marcos de actuación política claros y evaluables. Esta investigación busca crear una herramienta para calcular las emisiones municipales en Cataluña, dirigida a las administraciones locales y concebida como apoyo para el diseño, seguimiento y evaluación de políticas de reducción. Se presenta la primera fase del estudio: sector de transporte y residuos, seleccionados debido a su relevancia, capacidad de incidencia municipal y disponibilidad de información. El proceso incluyó la identificación de fuentes de datos de actividad y factores de emisión, analizar su calidad y validar el marco metodológico junto a actores clave como el Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y el Ayuntamiento de Rubí. La propuesta avanza hacia el diseño de una herramienta operativa que pueda transformar la planificación climática local en un proceso más riguroso, comparable y orientado a la acción, que permita a su vez fortalecer la capacidad de los municipios para alcanzar la neutralidad en carbono.

Abstract

Climate change represents one of the main global challenges, but addressing it requires actions adapted to the needs and capacities of each territory. Local governments are key actors in driving effective climate action, but they face difficulties in linking quantitative diagnoses with clear and assessable policy frameworks. This research aims to develop a tool for calculating municipal emissions in Catalonia, designed for use by local administrations and conceived as a support for the design, monitoring, and evaluation of mitigation policies. The first phase of the study is presented, focusing on the transport and waste sectors, selected for their relevance, capacity for municipal impact, and availability of information. The process included the systematic identification of activity data sources and emission factors, the analysis of their quality and the validation of the methodological framework together with key actors such as the Barcelona Metropolitan Area (AMB) and the Rubí City Council. The proposal moves towards the design of an operational tool capable of translating local climate planning into a more rigorous, comparable, and action-oriented process, strengthening the capacity of municipalities to achieve carbon neutrality.

1. Introducción

Las ciudades y los gobiernos locales tienen un rol clave en la acción climática local. De acuerdo con lo señalado por la ONU-Habitat (2020), las ciudades consumen el 78% de la energía mundial y producen más del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Todo esto convierte a las ciudades en protagonistas tanto del problema como de la solución. Sin embargo, muchas de las políticas climáticas se diseñan desde una perspectiva global o nacional, lo que puede dificultar su aplicación a escala local. Como advierte el IPCC (2023), las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático que no consideran las condiciones territoriales específicas pueden amplificar las desigualdades sociales existentes, ya que los grupos más vulnerables tienden a enfrentar los impactos con menor capacidad de respuesta.

Para avanzar en una acción climática efectiva a nivel local, es necesario contar con marcos y herramientas que guíen a los municipios en cada etapa del proceso. En Cataluña, a pesar de que existen avances en la promoción de la acción climática, como el Programa de Acuerdos Voluntarios para la reducción de CO₂ y la elaboración de guías para el cálculo de las emisiones de GEI por parte de la Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC), continua la necesidad de contar con metodologías e instrumentos que incorporen un enfoque territorial más sólido y adaptado a escala municipal. También la falta de datos desagregados representa una limitación importante, ya que hace más difícil para las administraciones municipales elaborar inventarios que sean útiles para su propia planificación climática y, que, a la vez, sean coherentes con los compromisos nacionales e internacionales.

Por todo lo expuesto, esta investigación parte de la hipótesis de que adaptar las metodologías de cuantificación de emisiones a la escala y realidad de los municipios catalanes, incorporando datos locales y criterios territoriales, permite mejorar la precisión de los inventarios, facilitar la toma de decisiones informadas y contribuir de manera más efectiva a los objetivos de mitigación climática y justicia territorial.

2. Metodología

Las fases de la metodología adoptada para el estudio se presentan a continuación:

1. Revisión documental y análisis del estado del arte de las metodologías de contabilización de emisiones de GEI.
2. Evaluación de la aplicación de las metodologías en los sectores seleccionados: análisis de los enfoques metodológicos identificados y aplicados a los sectores de transporte y residuos,

identificando sus supuestos, requerimientos de datos y compatibilidad con el contexto municipal catalán.

3. Análisis de datos y fuentes de información disponibles: identificación, sistematización y evaluación de la información disponible a escala municipal en Cataluña.
4. Validación del marco metodológico: esto se realizará a través de consultas a actores claves y la aplicación, cuando sea posible, de la metodología propuesta al municipio de Rubí.
5. Formulación de la propuesta metodológica final ajustada a la realidad territorial de los municipios de Cataluña.

3. Resultados

3.1. Marco metodológicos para inventarios de GEI a escala local

El análisis del estado del arte muestra que los marcos metodológicos para el desarrollo de inventarios de emisiones de GEI han sido elaborados para ser utilizados principalmente a escala nacional u organizacional, lo cual limita su aplicabilidad directa en el ámbito municipal. Las directrices del IPCC constituyen el marco de referencia para los inventarios nacionales, mientras que la norma ISO 14064 y el GHG Protocol han sido ampliamente utilizados para la cuantificación de emisiones en organizaciones y actividades específicas. Sin embargo, estos enfoques responden principalmente a una lógica de huella de carbono organizacional y no están diseñados para apoyar la planificación climática local.

Ante esta limitación, el Protocolo Global para Inventarios de Emisiones de GEI a Escala Comunitaria (GPC) surge como el marco metodológico más adecuado para los gobiernos locales. El GPC permite contabilizar las emisiones atribuibles a las actividades que tienen lugar en el territorio municipal, facilitando la definición de líneas base, el establecimiento de objetivos de reducción y el posterior seguimiento

de las políticas climáticas locales. Por estos motivos, el enfoque ciudad del GPC se selecciona como el enfoque principal para el diseño del inventario municipal (ver Figura 1).

Protocolo GPC		Alcance 1	Alcance 2	Alcance 3
Enfoque ciudad				
Energía estacionaria	Uso de energía	Básico	Básico	Básico+
	Generación de energía suministrada a la red			
Transport		Básico	Básico	Básico+
Residuos	Generados en la ciudad	Básico		Básico
	Generados fuera de la ciudad			
Procesos industriales y usos de productos		Básico+		
Agrícola, forestal y otros usos de suelo		Básico+		
		Territorial		

Figura 1. Resumen de emisiones de GEI
Fuente: Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC).

Para aquellos aspectos que no son abordados de forma específica en el documento del GPC, se priorizó el uso de las guías elaboradas por la OCCC y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), dada su adaptación al contexto catalán y español respectivamente.

Respecto al reporte de las emisiones, la Figura 1 presenta los marcos de reporte de emisiones propuestos por el GPC (BÁSICO, BÁSICO+) y también señala las emisiones que serían consideradas bajo el enfoque

territorial y ciudad. En esta primera etapa de la elaboración del inventario municipal, se selecciona el marco de reporte BÁSICO.

En cuanto a los factores de emisión, se distinguen dos enfoques principales: el enfoque operacional, que considera únicamente las emisiones directas bajo control del territorio u organización, y el enfoque de ciclo de vida, que incorpora emisiones indirectas a lo largo de toda la cadena de suministro. El uso de factores de ciclo de vida en inventarios municipales puede conducir a problemas de doble contabilización, por lo que se recomienda priorizar el uso de factores operacionales siempre que sea posible.

3.2. Metodología y resultados del sector transporte

En este sector, el estudio se centró en el subsector de transporte por carretera, seleccionando el método de actividad residente definido por el GPC. Este método cuantifica las emisiones asociadas a la movilidad de los residentes del municipio.

Para el cálculo de las emisiones se utilizan los datos del padrón de vehículos municipales provenientes de la base de datos Microdatos del parque de vehículos de la Dirección General de Tráfico (2023), tales como los factores de emisión por vehículo, combinados con la información de kilómetros recorridos anuales por tipo de vehículo publicados por la DGT (2022). El cálculo se realiza para los vehículos de tipo turismo y motocicleta, clasificados en eléctricos y no eléctricos (híbrido, híbrido enchufable, autonomía extendida y batería). Las fórmulas utilizadas para el cálculo de las emisiones se presentan a continuación:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ A1} = \text{Kilómetros recorridos} \times \text{factor emisión CO}_2$$

$$\text{Kg CO}_2 / \text{año} = (\text{km/año}) \times (\text{Kg CO}_2 \text{ eq/km})$$

Ecuación 1. Emisiones Alcance 1 (no eléctricos y eléctricos)

Emisiones CO₂ A2 = Kilómetros recorridos x Consumo energía eléctrica x Factor red eléctrica

$$\text{Kg CO}_2/\text{año} = (\text{km/año}) \times (\text{KWh/km}) \times (\text{KgCO}_2/\text{kWh})$$

Ecuación 2. Emisiones Alcance 2 (eléctricos)

La aplicación de la metodología al municipio de Rubí permitió calcular las emisiones de Alcance 1 y Alcance 2 asociadas al transporte por carretera de Rubí. Los resultados del análisis reflejan que la principal limitación es la falta de datos de kilometrajes recorridos y factores de emisión de los vehículos más antiguos. Para superar esta limitación, se utilizan valores promedio por tipo de vehículo, lo que permite obtener una estimación preliminar de las emisiones anuales promedio por tipo de vehículo (ver Figura 2) y las emisiones totales del sector (ver Tabla 1)

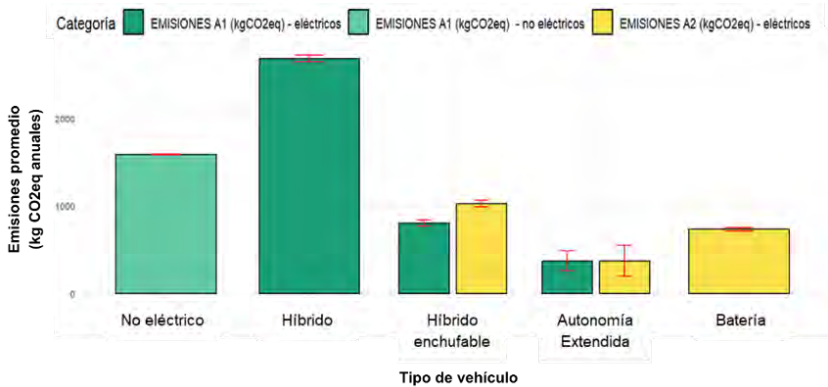


Figura 2. Emisiones de GEI promedio por tipo de vehículo.

Es importante señalar que los vehículos híbridos en Rubí son los tipos de vehículos que, en promedio, más emiten al año, lo cual se debe principalmente a una mayor tasa de uso de este tipo de vehículos. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de acceder a datos

reales de kilometraje para mejorar la precisión del inventario, reflejar adecuadamente el impacto y mejorar el diseño de las políticas locales de movilidad.

Alcance	Emisiones ktCO ₂ eq
Alcance 1 (A1)	70,7
Alcance 2 (A2)	0,4
Emisiones Totales (A1+A2)	71,1

Tabla 1.- Emisiones totales municipio Rubí.

3.3. Metodología y resultados del sector residuos

De acuerdo con lo definido en la guía del GPC, las ciudades producen residuos sólidos y aguas residuales (denominado en conjunto “residuos”). En línea con el enfoque ciudad y el reporte BÁSICO definido por el GPC para el sector residuos, las emisiones que se contabilizarán son aquellas generadas dentro de los límites geográficos del municipio y que son tratados: dentro de la ciudad (Alcance 1) y fuera de la ciudad (Alcance 2).

Los datos de generación y disposición final de los residuos proceden principalmente de la Agència de Residus de Catalunya (ARC), la cual proporciona información sobre los residuos municipales o urbanos (RSU), los residuos industriales (RI) y los lodos de depuradoras de agua (EDAR), y de la Agència Catalana del Agua (ACA), la cual aporta información relacionada a la cantidad de agua suministrada al municipio.

A continuación, se presentan los principales resultados y recomendaciones derivados del análisis de los datos de actividad que

deben considerarse para una posterior cuantificación de las emisiones a escala municipal:

- **RSU:** no se deben considerar las emisiones de los residuos que son reciclados o reutilizados debido al enfoque operacional aplicado en este estudio. Solo se deben considerar las emisiones de las siguientes fracciones de residuos que son recolectados selectivamente: RESTA, FORM, auto compostaje y residuos de poda y jardinería.
- **Tipos de disposición final:** solo se debe considerar el volumen de residuos dispuestos en incineración, disposición controlada, depuradoras fisicoquímico-biológica y otros. Las emisiones provenientes de los tipos de tratamientos de valorización, subproducto y almacenamiento se contabilizan en otros sectores.
- **RI:** una de las categorías del Catálogo Europeo de Residuos (CER) es “Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas de manera selectiva”; por lo tanto, estas cantidades deben restarse del total de RI para evitar una doble contabilidad.
- **Lodos EDAR:** si bien los datos se encuentran a nivel municipal, el volumen de lodos tratados se asigna al municipio en el que se realiza el tratamiento. Por lo tanto, se recomienda realizar una estimación del volumen de lodos generados por cada m³ de agua suministrada (consumida) para la asignación de los lodos generados por municipio y el posterior cálculo de emisiones.

El análisis de los factores de emisión disponibles para el sector residuos demuestra una elevada heterogeneidad en los enfoques utilizados para su elaboración. Varios de los factores empleados en Cataluña, especialmente los relacionados a residuos municipales y al ciclo del agua, se basan en un enfoque de ciclo de vida. Aunque este

enfoque permite tener una visión completa de los impactos ambientales asociados a la gestión de los residuos, su aplicación directa en inventarios municipales puede generar problemas de doble contabilización de emisiones.

Finalmente, es importante destacar las siguientes conclusiones generales del análisis de los factores de emisiones disponibles:

- Los factores de los RSU recolectados de forma selectiva y del agua suministrada tienen un enfoque de ciclo de vida, pero la información de las emisiones es entregada de forma segregada por etapa, lo cual permite identificar aquellas emisiones que deben ser excluidas del cálculo de las emisiones.
- Respecto al factor disponible del ciclo del agua que entrega la OCCC (2015), el 97% de las emisiones están asociadas al consumo eléctrico. Lo cual refleja la importancia de verificar y utilizar factores operacionales que eviten la doble contabilización de las emisiones en el inventario.
- No se pudieron verificar las actividades (directas e indirectas) consideradas en el cálculo de los factores de los RI. A pesar de lo señalado, se identifica información territorial suficiente para aplicar una metodología alternativa a corto plazo, basada en las guías de la OCCC.

4. Discusión

El análisis realizado de las iniciativas y herramientas impulsadas en España y Cataluña para el cálculo de emisiones de GEI muestra que, en general, las guías e inventarios disponibles adoptan una lógica de huella de carbono organizacional. Este enfoque, presente tanto en las herramientas promovidas por la OCCC y MITECO, se basa principalmente en la norma ISO 14064 y no está diseñado específicamente para su uso como instrumento de gestión climática

municipal. Todo esto plantea la necesidad y urgencia de adaptar los recursos disponibles a las capacidades y características de los municipios para luego, de acuerdo a lo señalado por el GPC, establecer metas de mitigación, crear planes de acción más específicos y hacer un seguimiento del progreso a través del tiempo, así como fortalecer las oportunidades para las ciudades de asociarse con otros niveles administrativos y aumentar el acceso a la financiación climática local e internacional.

Además, el análisis de los factores disponibles para el cálculo de las emisiones de GEI del sector residuos demuestra que, en muchos casos, estos se elaboran bajo un enfoque de ciclo de vida, lo que puede conducir a una doble contabilización de las emisiones en los inventarios. El desarrollo de este estudio, junto con la incorporación de la visión de actores claves en el proceso (AMB, Ayuntamiento de Rubí, entre otros), pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el conocimiento, el correcto uso y la utilidad por parte de las administraciones municipales, tanto de las herramientas disponibles como de los programas vigentes que incentiven la acción climática local, como, por ejemplo, el Pacto de los Alcaldes por la Energía y Clima.

En cuanto a la cuantificación de las emisiones de GEI del transporte por carreta, si bien se avanzó en el diseño y uso de datos más representativos a nivel municipal, sigue siendo necesario obtener datos más específicos y dinámicos, como los kilometrajes reales registrados en las Inspecciones Técnicas de Vehículos (ITV). Todo lo señalado, junto con los resultados que demuestran que en Rubí los vehículos que, en promedio, más emiten al año son los híbridos debido a su mayor tasa de uso, plantea la necesidad de diseñar políticas que graven a los que emiten más por sobre aquellos que tengan una peor etiqueta medioambiental.

5. Conclusión

Este trabajo ha desarrollado una propuesta metodológica para la elaboración de inventarios de emisiones de GEI en los sectores de transporte y residuos, adaptada al contexto territorial de los municipios de Cataluña. La metodología de referencia seleccionada fue el Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria (GPC), un marco contable ampliamente reconocido a nivel internacional, diseñado específicamente para ayudar a los gobiernos locales a mejorar la medición, seguimiento y reducción de las emisiones de sus ciudades.

El análisis de los métodos propuestos por el GPC, junto con el estudio de los datos actualmente disponibles en el contexto catalán, permitió identificar tanto las fortalezas como las limitaciones existentes para la implementación de un inventario de emisiones municipal. Además, se identificaron los requisitos y brechas de información, y también se elaboraron recomendaciones específicas por sector en base a estos hallazgos.

En el caso del sector transporte, se destaca la ausencia y la relevancia de obtener datos reales de los kilómetros recorridos al año por vehículo, ya que el uso de kilometrajes promedio a nivel nacional impide reflejar y cuantificar con precisión el impacto de las políticas locales orientadas a la reducción de emisiones, al no capturar los cambios reales en la movilidad del territorio. Por lo que se recomienda continuar avanzando en la solicitud a la DGT de los datos más específicos de kilometrajes anuales provenientes de las ITV.

En cuanto a los residuos, se dispone de información territorial relevante sobre el volumen de residuos generados y el tratamiento de los residuos a escala municipal, pero el mayor desafío se encuentra en los indicadores disponibles elaborados principalmente bajo el enfoque de ciclo de vida. Se recomienda verificar las actividades consideradas

en su diseño, ya que se debe priorizar el uso de factores de tipo operacional, los cuales reflejan las emisiones directas que se encuentran bajo el control directo de las administraciones locales. Esta aproximación permite una mayor coherencia entre los resultados del inventario y la capacidad real de los municipios para incidir mediante políticas públicas y acciones climáticas específicas.

En conclusión, este trabajo avanza en la definición de una propuesta metodológica adaptada al contexto de los municipios catalanes para la elaboración de inventarios de GEI en los sectores de transporte y residuos. La experiencia analizada muestra que disponer de datos locales representativos y metodologías adecuadas al ámbito territorial es clave para que los inventarios sean herramientas efectivas de planificación climática, contribuyendo a reforzar el papel de los gobiernos locales en la transición hacia territorios más sostenibles, resilientes y justos.

Referencias

- DGT. (2022). *Dirección General de Tráfico. Kilómetros anualizados recorridos por el parque móvil*. <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Kilometros-anualizados-recorridos-por-el-parque-movil-2022/>
- DGT. (2023). *Dirección General de Tráfico. Microdatos de parque de vehículos (anual)*. <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Microdatos-de-parque-de-vehiculos-anual/>
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- OCCC. (2015). *Càlcul de les emissions de GEH derivades del cicle de l'aigua de les xarxes urbanes a Catalunya*. .
- OCCC. (2024). *Càlcul de les emissions de GEH derivades de la gestió del residus municipals*.

OCCC. (2024). *Informe d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle per sectors a Catalunya*.

OCCC. (2024). *Guia per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH)*. https://canviclimatic.gencat.cat/ca/actual/guia_de_calcul_demissions_de_co2/

Organización de las Naciones Unidas. (10 / septiembre / 2020). *Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>

World Resources Institute. *C40 Cities Climate Leadership Group & ICLEI – Local*

Diseño de un marco metodológico para estimar las emisiones de GEI del sector industrial en el municipio de Rubí

Irene Martín Hernández

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Macarena Antonucci Hidalgo

Institut Universitari de Recerca en Ciència i Tecnologies de la
Sostenibilitat

Olga Alcaraz

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament de Física

Boris Lazzarini

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resumen

Las actuaciones a escala local representan un papel clave en la lucha contra el cambio climático, ya que permite tener presente el territorio y las particularidades del mismo. Sin embargo, muchos gobiernos municipales carecen de metodologías precisas para inventariar sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esta investigación aborda a esa carencia mediante el diseño de un marco metodológico para la estimación de emisiones industriales a escala municipal, tomando como primera aproximación el sector cementero en Cataluña. Este estudio se basa en la aplicación y adaptación de la metodología propuesta por el Protocolo Global para Inventarios de Emisiones de GEI a Escala Comunitaria (GPC), teniendo en cuenta las particularidades y complejidades de la industria. La metodología se valida en los municipios catalanes que albergan plantas de fabricación de cemento, obteniéndose emisiones de proceso de 604 ktCO₂eq en Sant Vicenç dels Horts,

521 ktCO₂eq en Santa Margarida i els Monjos, 331 ktCO₂eq en Alcanar y 280 ktCO₂eq en Montcada i Reixac. Se evidencian las dificultades derivadas de la falta de datos públicos y la relevancia de los inventarios locales en el desarrollo de políticas climáticas municipales.

Abstract

Local-level actions play a crucial role in combating climate change, as they allow for the consideration of territorial contexts and their specific characteristics. However, many municipal governments lack precise methodologies for inventorying their greenhouse gas (GHG) emissions. This research addresses this gap by developing a methodological framework for estimating industrial emissions at the municipal scale, using the cement sector in Catalonia as an initial case study. This study is based on the application and adaptation of the methodology proposed by the Global Protocol for Community-Scale GHG Emission Inventories (GPC), considering the specific characteristics and complexities of the industry. The methodology is validated in Catalan municipalities that have cement manufacturing plants, obtaining process emissions of 604 ktCO₂eq in Sant Vicenç dels Horts, 521 ktCO₂eq in Santa Margarida i els Monjos, 331 ktCO₂eq in Alcanar, and 280 ktCO₂eq in Montcada i Reixac. The difficulties arising from the lack of public data and the relevance of local inventories in the development of municipal climate policies are evident.

1. Introducción

La industria es un sector con importante contribución a las emisiones globales de GEI y, por tanto, también al cambio climático. Las emisiones de GEI del sector industrial tienen dos grandes orígenes. Por un lado, las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles para generar electricidad y calor en sus procesos de fabricación. A nivel de inventario de emisiones, éstas se contabilizan dentro del sector energético, subsector industrial, y no son el objeto de este trabajo. Por otro lado, las emisiones asociadas a diversos procesos de fabricación, y que son específicas de cada subsector industrial. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ que se originan en la fabricación de cemento como consecuencia del proceso de calcinación de la piedra

calcárea; o las emisiones que se originan en el proceso de Haber-Bosch durante la síntesis de amoníaco.

Ante el cambio climático este sector no es tan vulnerable como otros (agrícola o el turismo), aunque indirectamente el clima puede tener una incidencia muy importante en ciertas actividades industriales (Sánchez, 2005), al afectar, por ejemplo, a la disponibilidad de materias primas. Por tanto, al ser un factor que impulsa el cambio climático y a la vez sufre sus consecuencias, deberá adaptarse a estas y, sobre todo, tomar medidas para mitigarlas.

A nivel internacional la normativa relativa a emisiones industriales es compleja y varía por regiones. Destaca la Directiva 2010/75/UE de Emisiones Industriales, que constituye el principal acto legislativo de la UE destinado a prevenir y reducir la contaminación procedente de grandes plantas industriales mediante la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) (Consejo Europeo, 2024), como tecnologías más limpias y eficientes. Además, el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE ha tenido un papel clave en la actividad industrial, al establecer un mercado de permisos de emisión que fija un límite de gases por empresa y obliga a llevar un seguimiento de estas (MITECO, s.f).

Ambas herramientas establecen el marco de actuación para los países europeos. En España sirven de referencia las diferentes normativas específicas que regulan la contaminación y emisiones industriales, como el Reglamento de Emisiones Industriales y Ley de prevención y control integrados de la contaminación (GENCAT, s.f). En el contexto de Cataluña, también ha habido un esfuerzo para reducir la contribución de las industrias en el cambio climático mediante normativa y con medidas de seguimiento y control que permiten ajustar las actuaciones a un nivel más específico.

1.1. Industria en Cataluña

La industria ha desempeñado un papel clave en el crecimiento económico de Cataluña, aportando el 18,6% del Valor Añadido Bruto (VAB). Aunque este peso es inferior al de la industria en la eurozona (20,2%), supera al registrado en el conjunto del Estado español (16,7%) (GENCAT, 2024).

Dado el peso de este sector, su contribución a las emisiones de GEI también es considerable. En 2023, las emisiones no energéticas de procesos industriales representaron el 12% del total de emisiones de GEI en Cataluña (GENCAT, 2025). La elevada diversificación de la industria catalana implica múltiples fuentes de emisiones, destacando en ese mismo año la fabricación de productos minerales, que concentró el 40,9% de las emisiones de proceso, predominadas por la producción de cemento con un 86% de estas (GENCAT, 2025).

1.2. Papel de las ciudades y gobernanza municipal en el cambio climático

Las características específicas de cada región hacen que los impactos del cambio climático varíen según sus condiciones ambientales y socioeconómicas. Así, las soluciones generalizadas pueden no ser válidas para todos los ámbitos territoriales (Red Española de Ciudades por el Clima y FEMP, 2010). Además, en el sector industrial, la diversidad de procesos emisores dificulta una gestión estandarizada y obliga a adoptar estrategias de adaptación ajustadas a la especialidad y experiencia de cada actividad (Generalitat de Catalunya, 2005).

De esta manera, la escala local se presenta como una parte crucial en la lucha contra el cambio climático, ya que permite tener presente el territorio y las particularidades del mismo (Mora Ruiz, 2021). Por tanto, las políticas climáticas deben contar con herramientas que orienten a los municipios y que fomenten la participación local en las estrategias.

1.3. Inventarios de emisiones

Los inventarios de emisiones de GEI son informes que cuantifican las emisiones antropogénicas de GEI directas a la atmósfera en un territorio y período determinados (GENCAT, s.f-b). Son clave para elaborar estrategias climáticas, ya que permite identificar los sectores responsables de las emisiones, analizar tendencias y establecer medidas de reducción. Sin embargo, la variedad de métodos aplicados por las ciudades dificulta las comparaciones y la agregación de datos a nivel nacional (World Resources Institute et al., 2021).

Las directrices para los inventarios nacionales de GEI del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), publicadas en 1996, han servido de base para el desarrollo de metodologías posteriores. Destaca el Protocolo Global para Inventarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria (GPC), que proporciona a los gobiernos locales un marco estandarizado y globalmente aceptado para identificar, calcular y reportar emisiones de GEI (World Resources Institute, 2021).

El GPC indica que se deben utilizar dos enfoques distintos. En este estudio, se aplica el enfoque por alcance, que clasifica las emisiones según su lugar de origen. Para el sector industrial, se establece que únicamente se deben considerar las emisiones generadas dentro de los límites territoriales de la ciudad (Alcance 1).

2. Objetivos y alcance

Este trabajo forma parte de un proyecto cuyo objetivo general es diseñar un marco metodológico para estimar las emisiones de GEI del sector industrial a escala municipal, tomando como caso de estudio el municipio de Rubí. En una primera fase, el objetivo es definir una metodología de estimación aplicada a la actividad cementera en

municipios de Cataluña, que sirva como referencia para su posterior aplicación a otros subsectores industriales.

Los objetivos específicos de esta primera fase del proyecto son:

- Identificar las empresas de producción de cemento ubicadas en Cataluña.
- Examinar las bases de datos y fuentes de información del sector, así como identificar y resolver inconsistencias y vacíos de información.
- Recopilar los datos de producción y los parámetros requeridos por el GPC.
- Realizar un cálculo preliminar de las emisiones de proceso del sector a escala municipal en Cataluña.
- Definir y validar una metodología aplicable al resto de subsectores y formular recomendaciones para la mejora y estandarización de los inventarios locales.

Alcance:

En una primera aproximación, esta investigación se centra en la producción de cemento, perteneciente a la categoría de “*Procesos industriales y uso de productos (IPPU)*” del IPCC. Esta actividad se ha seleccionado por su alta contribución a las emisiones, ya que es responsable de un 27% del CO₂ industrial a escala global (UNECE, 2022).

De esta manera, el inventario que se diseñará se realizará para los municipios de Cataluña, considerando un año completo y enfocándose en las emisiones de CO₂ provenientes de la actividad industrial de fabricación de cemento.

3. Producción de cemento

3.1 Metodología de contabilización de emisiones del sector

En la producción de cemento, el 65% de las emisiones proviene de la descarbonatación de la piedra caliza para producir clínker, su componente principal y el 35% restante de la combustión de combustibles para calentar los hornos necesarios (BREF 2013). El presente trabajo sólo considera las emisiones derivadas de los procesos de transformación de las materias primas. Estas son las emisiones que se contabilizan en la categoría IPPU. Quedan excluidas del alcance del trabajo las asociadas a la quema de combustibles fósiles por parte de la industria.

Se evaluaron distintos métodos de contabilización de emisiones, si bien, el GPC es el más adecuado a los objetivos del estudio y a la disponibilidad de datos de Cataluña. Su elección se justifica por su carácter estandarizado, adaptabilidad al contexto local y reconocimiento internacional. A continuación, se presenta la principal opción metodológica propuesta por el GPC para cuantificar las emisiones de esta actividad industrial, junto con la fórmula y los datos necesarios para su aplicación (Tabla 1).

Método	Ecuación	Datos
Aplicación de un factor de emisión nacional a las cantidades de clínker producido por municipio	$Emisiones\ de\ CO_2 = M_{cl} \times EF_{cl}$	Emisiones de CO ₂ = Emisiones de CO ₂ (t) M_{cl} = Peso (masa) de clínker producido (t) EF_{cl} = factor de emisión de CO ₂ por unidad de masa de clínker producido (t CO ₂ /t clínker)

Tabla 1. Métodos contabilización emisiones de la producción de cemento.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información del GPC.

Así, para calcular las emisiones, en este caso, del sector cementero el GPC requiere recopilar la siguiente información: Principales industrias

de producción de cemento dentro de los límites de la ciudad, salida de clínker en toneladas anuales y factor de emisión del producto.

En relación con los factores de emisión, la guía prioriza el uso de factores específicos de la fábrica o regionales, pero referencia al valor predeterminado por el IPCC ante una posible ausencia de esta información.

3.2 Análisis de bases de datos y fuentes disponibles

Para recopilar la información requerida por el GPC, en primer lugar, se identificaron las fábricas de cemento en Cataluña y se evaluaron los datos disponibles para cada una. Se localizaron 5 plantas de producción de cemento en la comunidad (Fundación CEMA, 2025), de las cuales solo las de CEMEX en Alcanar y Cementos Portland Valderrivas en Santa Margarida i els Monjos aportan datos específicos de producción de clínker en sus declaraciones ambientales, con valores de 631.177 toneladas anuales (CEMEX, 2023) y 993.329 toneladas anuales (Grupo Cementos Portland Valderrivas, 2024), respectivamente.

En el caso de la planta del Grupo Cemento Portland en Vallcarca, los informes anuales indican una producción de cemento muy reducida, estando parada la mayor parte del tiempo (Grupo Cementos Portland Valderrivas, 2024). Dado que su actividad actual se centra en la extracción de caliza y la fabricación de áridos, su producción de cemento se ha considerado nula en este estudio. Para las otras dos plantas, HOLCIM España en Montcada i Reixac y Molins Industrial en Sant Vicenç dels Horts, no se dispone de datos de producción anual, sólo de capacidad máxima de producción: 750.000 y 1.500.000 t/año, respectivamente (Fundación CEMA, 2025). De esta manera, su producción se ha estimado aplicando una tasa media europea de utilización de capacidad del 71,2% (Harder, 2023), como aproximación a la producción real.

Se presenta a continuación una recopilación de la información de producción de clínker de cada fábrica para el año 2023 (Tabla 2).

Fábrica	Localización	Producción clínker (tn clínker/año)	Fuente/Método	Año
CEMEX España Operaciones, S.L.U	Alcanar	631.177	CEMEX (2023)	2023
HOLCIM España, S.A.U.	Montcada i Reixac	534.000	Cálculo a partir de la capacidad de producción y la tasa media de utilización de clínker	2023
Cementos Portland VALDERRIVAS	Santa Margarida i els Monjos	993.329	Grupo Cementos Portland Valderrivas (2024)	2023
	Vallcarca	No aplica	Grupo Cementos Portland Valderrivas (2024)	2023
MOLINS INDUSTRIAL, S.A.	Sant Vicenç dels Horts	1.150.500	Cálculo a partir de la capacidad de producción y la tasa media de utilización de clínker	2023

Tabla 2. Información de la industria de producción de cemento de Cataluña.

Respecto al factor de emisión, el GPC prioriza la aplicación de factores específicos por fábrica. Sin embargo, no se ha identificado factores propios para cada instalación. Por ello, en este estudio se adopta el valor de 0,525 tCO₂/t de clínker para emisiones de proceso, establecido por la Comisión Europea en la Decisión de 18 de julio de 2007. Este factor ha sido validado por el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, a partir de información de las cementeras españolas, por lo que se ajusta a las características propias del sector en este territorio.

3.3 Cálculo preliminar emisiones

Para evaluar la contribución de la fabricación de cemento a las emisiones de GEI se sigue el procedimiento que se describe a continuación. Los cálculos se realizan para los municipios catalanes que cuentan con cementeras en Cataluña: Alcanar, Montcada i Reixac, Santa Margarida i els Monjos y Sant Vicenç dels Horts.

En primer lugar, se identifica la cementera ubicada dentro de los límites municipales y sus datos de producción. Según las indicaciones del GPC el dato requerido es la producción anual de clínker (Tabla 2), junto con el factor de emisión seleccionado de 0,525 tCO₂/t clínker. Con esta información, se aplica la ecuación para el cálculo de las emisiones de GEI procedentes de la producción de cemento:

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ (t CO}_2 \text{ eq)} = M_{cl} \text{ (t clínker)} \times 0,525 \text{ (t CO}_2 \text{/t clínker)}$$

Ecuación 1. Cálculo de las emisiones de GEI procedentes de la producción de cemento

De este cálculo resultan las emisiones asociadas a la producción de cemento en los municipios de Cataluña que cuentan con fábricas de producción de cemento (Tabla 3).

Municipio	Fábrica	Emisiones de CO ₂ (ktCO ₂ -eq)
Alcanar	CEMEX España Operaciones, S.L.U	331
Montcada i Reixac	HOLCIM España, S.A.U.	280
Santa Margarida i els Monjos	Cementos Portland VALDERRIVAS	521
Sant Vicenç dels Horts	MOLINS INDUSTRIAL, S.A.	604

Tabla 3. Emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento.

4. Discusión y conclusiones

Se ha desarrollado una propuesta inicial para la elaboración de un inventario de emisiones de GEI en la actividad cementera de Cataluña, utilizando el GPC, un marco internacional, diseñado específicamente para gobiernos locales.

Para evaluar la coherencia de esta metodología se comparó la producción total de clínker recopilada para las cuatro fábricas con el dato oficial de Cataluña en 2023 (3,2 t/año) (Idescat, 2025). La diferencia entre ambos valores es de 5.794 t/año, lo que supone un 0,18% de error relativo, por lo que los valores estimados se consideran fiables. Esta desviación puede estar asociada a la posible contribución de la fábrica de Valderrivas de Vallcarca o a una mayor tasa de utilización de clínker en las plantas evaluadas frente al promedio europeo.

De esta forma, las emisiones derivadas de la producción de cemento muestran que Sant Vicenç dels Horts registra las más altas (604 ktCO₂eq) y Montcada i Reixac las más bajas (280 ktCO₂eq). Se debe tener en cuenta que estos datos corresponden solo a las cementeras, por lo que la presencia de otras industrias en esos municipios incrementa las emisiones locales.

Además, se han detectado importantes carencias en la información pública sobre producción industrial, con datos desactualizados, redondeados, con unidades incorrectas, y generalmente agregados a nivel de multinacional, dificultando las estimaciones precisas. Por tanto, para inventarios locales la mejor práctica es obtener información directamente de las fábricas.

Se determina que los inventarios de emisiones realizados a escala local permiten identificar las principales fuentes y cuantificar sus contribuciones, lo que facilita el diseño de medidas de mitigación adaptadas al municipio. En este sentido, constituyen una base

fundamental per a la planificació, evaluació i seguiment de les polítiques locals de clima, ja que proporcionen informació objectiva per prioritzar actuacions i avaluar l'evolució dels impactes.

Tras aplicar la metodologia al sector cementero, se extenderá a los demás subsectores de “Procesos Industriales y uso de Productos”. Definir en primer lugar el procedimiento a seguir para el cemento facilita localizar datos y factores de emisión para otras industrias. Una vez establecidos los marcos metodológicos se realizará un cálculo preliminar para el municipio de Rubí, evaluando la aplicabilidad y validando el método para otros municipios catalanes.

Referencias

- CEMEX. (2023). *Declaración Ambiental – 2023*. Departamento de Medio Ambiente y Comité Ambiental - CEMEX. <https://www.cemex.es/sostenibilidad/compromiso-medioambiental>
- Consejo Europeo. (2024, 26 d'abril). *Emissions industrials*. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/industrial-emissions/#what>
- Fundación Laboral del Cemento y Medio ambiente (Fundación CEMA). (2025). *Sector cementero*. Fundación Cema. <https://www.fundacioncema.org/sector-cementero/>
- GENCAT. Agència de Residus de Catalunya. (s.f.). *Normativa*. https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/sols_contaminats/instruments_normatius/index.html
- GENCAT. Departament de Medi Ambient y Sostenibilitat. (s.f.-b). *Inventaris de emissions atmosfèriques*. https://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/emissions_industrials/inventaris-emissions-atm/
- GENCAT. Departament d'Empresa i Treball. (2024). *Informe anual sobre la indústria a Catalunya (2023)*. Observatori de la Indústria. https://empresa.gencat.cat/ca/treb_ambits_actuacio/industria/industria-catalana/observatori/informe_anual/

- GENCAT. Departament de Territori, Habitatge i Transició Ecològica. (2025, novembre). *Informe de progrés del compliment dels objectius de reducció d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle: Avaluació de les emissions de GEH a Catalunya, 1990-2023*. Oficina Catalana de Canvi Climàtic. https://canviclimatic.gencat.cat/ca/oficina/publicacions/informes_progres/
- Grupo Cementos Portland Valderrivas. (2024). *Medio Ambiente - Declaración e Informe Ambiental*. <https://www.valderrivas.es/medio-ambiente/>
- Harder J. (2023, 17 octubre). The cement industry in Europe at the crossroads. OneStone Consulting Ltd. Zement Kalk Clips (ZKG). <https://www.zkg.de/en/artikel/the-cement-industry-in-europe-at-the-crossroads-4019235.html>
- Idescat. (2025, 20 novembre). *Indicadors bàsics de Catalunya: Indicadors del ciment*. GENCAT. <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=basics&n=10274&t=202301&col=1>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España (MITECO). (s.f.). *El comercio de derechos de emisión*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/que-es-el-comercio-de-derechos-de-emision.html>
- Red Española de Ciudades por el Clima y Red Española de Ciudades por el Clima, Sección de la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP). (2010). *La vulnerabilidad al cambio climático a escala local*. <https://redciudadesclima.es/sites/default/files/vulnerabilidad-cambioclimatico-escalalocal.pdf>
- UNECE. (2022, 11 de novembre). COP27: UN report shows pathways to carbon-neutrality in “energy intensive” steel, chemicals and cement industries. *UNECES*. <https://unece.org/media/press/372890>
- World Resources Institute, C40 Cities Climate Leadership Group, & ICLEI (Local Governments for Sustainability). (2021). *Protocolo Global para Inventarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria (GPC): Estàndard de contabilitat i de reporte para las ciudades – Versión 1.1*.

Análisis de las zonas de acumulación y orígenes de la basura marina flotante en la costa de Barcelona

José M. Alsina

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Ivan Hernandez

Escola Tècnica S. d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Resumen

Las concentraciones de residuos plásticos en las aguas costeras de Barcelona se encuentran entre las más altas del mar Mediterráneo, comparables a las observadas en los giros subtropicales. Mediante análisis de datos de muestreo de ciencia ciudadana durante 2020 y 2021 y técnicas modelado numérico cuantificamos las zonas de acumulación y aportes de basuras marinas en el litoral de Barcelona. Se observa que las principales fuentes de aportes de basura marina provienen de los ríos y sistemas de descarga directa afectando fundamentalmente a las playas urbanas. Además, se ha detectado un aporte importante de basura marina externa de fuera del dominio de Barcelona. Esta situación resulta en grandes concentraciones de partículas en las playas urbanas con valores medios de $1,8 \times 10^9$ elementos por km^2 y⁻¹. Estos hallazgos destacan la zona costera de Barcelona como un importante emisor y receptor de residuos plásticos debido a la conectividad hidrodinámica regional y al transporte. Los altos niveles de contaminación por plásticos ponen de relieve la urgente necesidad de reducir los residuos aguas arriba y de implementar medidas de mitigación específicas para evitar que la basura llegue al mar.

Abstract

Plastic waste concentrations in Barcelona's coastal waters are among the highest in the Mediterranean Sea, comparable to those observed in subtropical gyres. Through analysis of citizen science sampling data collected during 2020

and 2021 and numerical modeling techniques, we quantified the accumulation zones and inputs of marine litter along the Barcelona coastline. It was observed that the main sources of marine litter input originate from rivers and direct discharge systems, primarily affecting urban beaches. Furthermore, a significant influx of marine debris from outside Barcelona's area has been detected. This situation results in high concentrations of particles on urban beaches, with average values of 1.8×10^9 elements per km^2 . These findings highlight the Barcelona coastline as a major source and recipient of plastic waste due to regional hydrodynamic connectivity and transport. The high levels of plastic pollution underscore the urgent need to reduce upstream waste and implement specific mitigation measures to prevent debris from reaching the sea.

1. Introducción

La contaminación por plásticos en entornos marinos ha aumentado notablemente en las últimas dos décadas. Estimaciones recientes indican un promedio de 171 billones de partículas de plástico, principalmente microplásticos (MP), flotando en la capa superficial del océano, con una masa media de 2,3 millones de toneladas. Si bien los giros oceánicos subtropicales se han considerado zonas de acumulación primaria debido a corrientes convergentes de mesoescala, las regiones costeras ahora se reconocen como sumideros de desechos marinos (Liubartseva et al., 2018).

Barcelona, situada en la costa mediterránea occidental, tenía una población estimada de 1,7 millones de habitantes en 2024, cifra que ascendía a 3,2 millones al incluir el área metropolitana. Como uno de los mayores centros urbanos de la región, la ciudad experimenta una importante presión antropogénica en su litoral debido a la alta densidad de población, la actividad industrial y el turismo. Aproximadamente 15,6 millones de turistas visitan Barcelona anualmente, de los cuales un 70,6 % utiliza las playas de la ciudad durante su estancia. En 2021, la generación de residuos en la ciudad

ascendió a $1,6 \times 10^5$ toneladas de residuos industriales y $7,6 \times 10^5$ toneladas de residuos domésticos.

Barcelona ha sido identificada como uno de los mayores focos de basura marina en el Mediterráneo, con residuos presentes desde la superficie hasta el fondo marino. Según estimaciones basadas en la población, la ciudad vierte aproximadamente 1787 toneladas de residuos anualmente al medio marino (Liubartseva et al., 2018). Las muestras de arrastre de fondo han revelado altas concentraciones de plástico en la plataforma continental, especialmente en las proximidades del puerto de Barcelona, siendo las toallitas húmedas el objeto encontrado con mayor frecuencia. La ciencia ciudadana ha contribuido considerablemente al avance del estudio de la basura marina en la zona costera de Barcelona. Este enfoque ha permitido un muestreo eficiente de microplásticos flotantes, revelando concentraciones notablemente altas en aguas costeras, que van desde $1,1 \times 10^{-1}$ elementos km^2 de Camins et al. (2020), hasta $1,4 \times 10^{-1}$ elementos km^2 .

En el presente trabajo mediante modelado numérico y observaciones de partículas de plástico en las playas de Barcelona se hace un seguimiento de los principales focos emisores de partículas, flujos de transporte identificando magnitudes de la problemática de la basura marina plástica en las playas de Barcelona.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio. Litoral de Barcelona

El litoral de Barcelona está fuertemente modificado antropogénicamente, con rompeolas, muelles, puertos deportivos, nueve playas urbanas de arena y uno de los puertos más importantes del Mediterráneo Occidental que se extiende a lo largo de 9 km del litoral de la ciudad, como se muestra en la Figura 1. Barcelona está limitada por dos ríos: el

río Llobregat (LR) al sur y el río Besòs (BR) al norte. La basura proveniente del BR es principalmente de origen doméstico, mientras que el material del LR es predominantemente industrial (Hernandez et al., 2025). Las precipitaciones en la zona tienden a ser torrenciales y episódicas, con una media de aproximadamente 640 mm anuales, según las mediciones realizadas en la estación Fabra de Barcelona. Como parte del sistema de gestión de aguas residuales de la ciudad, se utiliza un sistema de alcantarillado combinado (CSO) para evacuar el exceso de agua de lluvia que las plantas de tratamiento no pueden procesar durante episodios de gran volumen. Este sistema es gestionado por la Agencia Catalana del Agua (ACA). Los puntos de vertido directos del CSO al litoral urbano a través de cuatro muelles emisores: Ginebra, Bogatell, Bac de Roda y Prim, que delimitan tramos de las playas urbanas de arena y se adentran aproximadamente 150 m en el mar. Otros puntos de vertido se encuentran en el puerto de Barcelona y en ríos.

2.2. Observaciones de contaminación en las aguas de Barcelona

Para determinar la cantidad de basura marina presente en las aguas de Barcelona, se analizaron datos de muestreos de playas mediante un enfoque de ciencia ciudadana, que se utilizaron como datos para las simulaciones numéricas lagrangianas con el fin de identificar el origen de esta basura marina. Se recogieron 94 muestras de agua de playa en cinco playas urbanas de Barcelona: Barceloneta, Llevant, Mar Bella, Nova Icaria y Sant Sebastià, así como en dos playas del área metropolitana: la playa de Castelldefels, al sur, y la playa de Montgat, al norte (Figura 1). Todas las muestras se recogieron entre el 1 de octubre de 2020 y el 30 de septiembre de 2021. La metodología y el diseño del enfoque de ciencia ciudadana para la recogida de muestras en playas y zonas costeras mediante una red de mantarrayas fijada a una tabla de paddle surf se describen en Camins et al. (2020). La red de arrastre tenía unas dimensiones de 0,36 m de ancho x 0,26 m de alto,

con una luz de malla de 0,33 mm y una bolsa recolectora en el extremo. Datos de geolocalización, incluyendo latitud, longitud, el tiempo y la distancia recorrida se registraron mediante la aplicación gratuita Wikiloc Outdoor, S.L. Las muestras se procesaron en la Universidad de Barcelona siguiendo la metodología y los protocolos descritos en de Haan et al. (2024). El número de elementos recolectados en un transecto se utilizó para obtener el número total de partículas en la playa muestreada.

2.3. Simulaciones numéricas y seguimiento hacia atrás en el tiempo

Se han realizado simulaciones lagrangianas para identificar posibles fuentes de basura marina en las aguas de la playa de Barcelona utilizando el modelo desarrollado en la UPC LOCATE (Hernandez et al., 2024). Los datos hidrodinámicos utilizados en el modelo LOCATE incluyen datos de circulación horarios de alta resolución proporcionados por Puertos del Estado, que incluyen abarcan mallas costeras y portuarias con resoluciones espaciales de 350 m y 70 m, respectivamente. La malla portuaria utiliza forzamiento meteorológico-oceánico para reducir la escala de los datos de la malla costera a la resolución más fina requerida. Las mallas de alta resolución se anidan a una malla regional obtenida del Copernicus Marine Environment System (CMEMS). Las simulaciones consideran datos de corrientes, y oleaje en el movimiento de las partículas.

Las simulaciones numéricas lagrangianas pueden implementarse en dos modos principales: simulaciones “hacia adelante en el tiempo”, en las que las partículas se liberan de fuentes conocidas y se rastrean para evaluar las vías de transporte y las posibles zonas de acumulación; y simulaciones “hacia atrás en el tiempo” (o de retroceso), donde las partículas se rastrean en sentido inverso desde la zona de acumulación para inferir sus probables orígenes. En el modo de retroceso, cuando una partícula cruza el límite de la línea de orilla (considerado varamiento en simulaciones directas), se interpreta que

ha alcanzado su punto de origen terrestre. Por lo tanto, el término neutro cruce del límite tierra-agua se utiliza de aquí en adelante para describir el comportamiento de esta partícula. De igual manera,

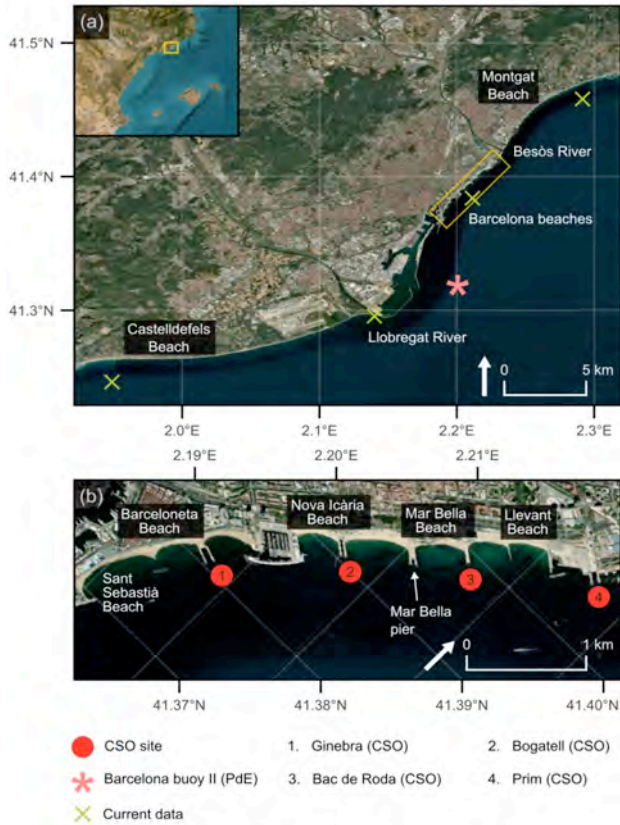


Figura 1. (a) Mapa del mar Mediterráneo con la zona de Barcelona etiquetada. (b) Mapa del litoral de Barcelona. Un primer plano de las playas urbanas de Barcelona y de los puntos de desbordamiento del alcantarillado combinado (CSO) se muestra en el recuadro amarillo. (c) Los puntos de CSO se muestran en rojo, los puntos de muestreo en morado.

cuando una partícula cruza el límite principal utilizando el comportamiento fuera de límites, indica cuándo y dónde una partícula habría entrado o sido importada al sistema desde una fuente externa al dominio.

3. Resultados

3.1. simulaciones hacia atrás en el tiempo “Backtracking”

Los resultados combinados de la simulación para el origen de las partículas procedentes de fuentes terrestres en cada playa se presentan en las figuras 2a-g. Los valores mostrados en las leyendas representan la proporción de partículas procedentes únicamente de fuentes terrestres, sin considerar las que se importan al sistema.

Se observan puntos calientes marcados en todas las playas urbanas de Barcelona. Varios puntos de descarga (CSO) se presentan como fuentes clave de residuos en varias playas. El aliviadero de Prim afecta a las playas de Llevant, Mar Bella, Nova Icària y Sant Sebastià, lo que pone de manifiesto su amplia influencia. El aliviadero de Bac de Roda es la principal fuente de contaminación para las playas de Mar Bella y Sant Sebastià, mientras que el aliviadero de Bogatell predomina en la playa de Nova Icària, con dos puntos calientes adyacentes que superan el 20%. El aliviadero de Ginebra afecta principalmente a la playa de la Barceloneta, mientras que la playa de Llevant recibe aportes adicionales de la zona cercana a la desembocadura del río Besòs. Estos patrones se alinean con el transporte costero impulsado por las corrientes predominantes del noreste y suroeste y las direcciones de las olas del suroeste.

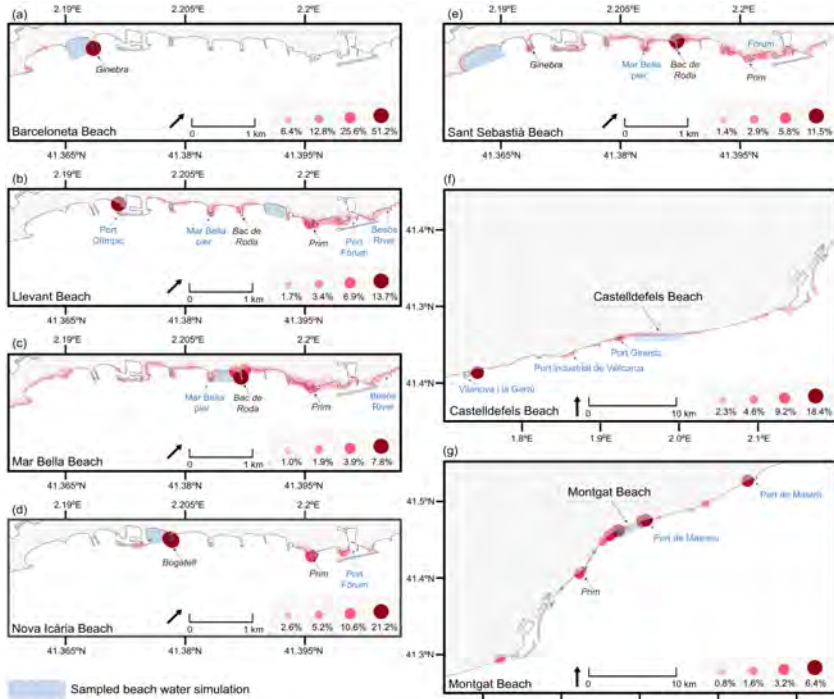


Figura 2. Mapas de densidad del origen de partículas de las simulaciones combinadas de: (a) Playa de la Barceloneta, (b) Playa de Llevant, (c) Playa de la Mar Bella, (d) Playa de Nova Icària, (e) Playa de San Sebastián, (f) Playa de Castelldefels, (g) Playa de Montgat. Las etiquetas de los lugares en cursiva negra representan los sitios de CSO, mientras que las demás estructuras están etiquetadas en azul. El tamaño y el color de las partículas representan el porcentaje relativo de cada parcela.

La proximidad a las fuentes de vertido se ha utilizado para explicar las mayores concentraciones de residuos plásticos en zonas costeras cercanas a regiones densamente pobladas, playas y desembocaduras de ríos (Hernandez et al., 2025). Se han encontrado correlaciones positivas entre la proximidad de los puntos de vertido, como los principales puertos, y las zonas de acumulación de basura marina.

Estudios numéricos en la región costera de Barcelona han demostrado que las zonas cercanas a los principales puntos de vertido, como el LR o el BR, tienen mayor probabilidad de recibir partículas de dichas fuentes (Hernandez et al., 2025). Por lo tanto, la proximidad puede considerarse un factor clave en el origen de las partículas, ya que las observaciones en las playas de Nova Icaria, Mar Bella y Barceloneta apuntan a puntos de vertido de CSO cercanos. En el caso de las playas donde el transporte se produjo desde fuentes más distantes, como Llevant y Sant Sebastià, esto puede atribuirse a las direcciones predominantes de las corrientes y las olas descritas anteriormente.

El origen de la contaminación observada se clasificó en grupos de zonas para determinar la proporción de partículas observadas y asociadas con cada grupo de origen, como se muestra en la Tabla 1. En la Tabla 1 se muestran número de partículas simuladas, proporción de partículas por cada grupo de origen y tiempo de residencia medios de las partículas en el litoral. La proporción de partículas procedentes de vertidos de CSO, como se muestra en la Tabla 1, oscila entre el 7,0 % en la playa de Sant Sebastià y el 25,2 % en la playa de la Mar Bella. Por el contrario, estas proporciones son insignificantes en las playas del área metropolitana, lo que pone de relieve la importancia de considerar la proximidad de los puntos de vertido a las playas urbanas. Los tiempos de residencia de las partículas procedentes de CSO también varían sustancialmente entre las playas urbanas y las del área metropolitana. Por ejemplo, las partículas procedentes de los CSO muestran tiempos de residencia que oscilan entre -7,1 h y -20,8 h en las playas urbanas, en comparación con las -116,4 h en la playa de Castelldefels. Con solo el 0,25 % de las partículas en playas urbanas atribuidas a ríos, la mayoría de las partículas procedentes de fuentes terrestres presentan tiempos de residencia medios inferiores a cuatro días. Las partículas importadas de fuera del dominio presentan tiempos de residencia de 6 a 10 días en las playas muestreadas, determinados

en gran medida por el tamaño del dominio. Aun así, estas estimaciones están limitadas por los límites del dominio de estudio, y el origen real de las partículas importadas no puede determinarse definitivamente con la configuración actual.

Es importante destacar que los números de partículas en la Tabla 1 se obtienen a partir de los números simulados representativos (que fueron dos órdenes de magnitud menores para la eficiencia y están sujetos a redondeo por el modelo LOCATE). Al considerar todas las playas muestreadas y las cantidades de la basura marina total observada, se estima unas cantidades estandarizadas por año y km² de zona litoral en las aguas de las playas metropolitanas de Barcelona de $7,4 \times 10^8$ elementos km⁻² año⁻¹, y sustancialmente mayor, de $1,8 \times 10^9$ elementos km⁻² año⁻¹, al considerar las playas urbanas. Estudios previos han detectado altos niveles de residuos plásticos a lo largo del litoral de Barcelona, basados tanto en modelos a gran escala como en muestreos directos (de Haan, 2024). Las concentraciones de MP en las aguas de Barcelona son comparables en magnitud a las encontradas en los giros oceánicos subtropicales.

	Barceloneta	Castelldefels	Llevant
Grupo de Origen	1,351,200	10,243,900	2,100,000
CSO	9.98%	0.01%	9.90%
	7.08h	116.37h	20.75h
Puerto	5.42%	0.18%	2.09%
	25.67h	106.87h	44.42h
Tierra	3.89%	42.80%	44.66%
	85.08h	79.33h	59.33h
Ríos	0.00%	1.07%	0.03%
	-	113.75h	224.42h
Importado	80.70%	55.72%	43.32%
	170.83h	231.92h	172.33h

	Mar Bella	Mongat	Nova Icaria	Sant Sebastià
Grupo de Origen	3,357,500	8,062,600	1,836,000	9,897,600
CSO	25.16%	0.00%	16.57%	7.03%
	11.38h	-	7.06h	18.85h
Puerto	13.36%	0.00%	1.25%	0.50%
	37.33h	-	118.60h	131.00h
Tierra	45.18%	73.11%	5.00%	24.87%
	20.83h	36.17h	59.53h	19.85h
Ríos	0.21%	0.18%	0.00%	0.38%
	27.18h	70.58h	-	288.00h
Importado	11.74%	26.70%	77.18%	62.83%
	234.17h	218.92h	167.25h	142.00h

Tabla 1. Partículas observadas (n), proporción de partículas simuladas (%) y tiempos de residencia medios (h) para cada origen de playa y grupo de zonas muestreado.

En total, las fuentes terrestres representan el 42,6 % del origen de las partículas en todas las zonas muestreadas (Tabla 1), alcanzando un máximo del 73,1 % en la playa de Montgat. Por el contrario, las playas urbanas muestran una menor contribución de las fuentes terrestres, con un 28,2 %. En estos emplazamientos urbanos, la proporción de partículas procedentes del puerto y de los emplazamientos de CSO es casi el doble que la observada en todas las playas muestreadas.

La mayor proporción de partículas simuladas se originó fuera del dominio, 49,0% para todas las playas muestreadas y 55,8% para las playas urbanas. Existen grandes diferencias entre las playas muestreadas, como se observa en la Tabla 1: las playas de Llevant, Mar Bella y Montgat tienen menos del 50% de partículas importadas al dominio, mientras que otras, como la playa de la Barceloneta, tienen un 80,7% proveniente de fuera del dominio. La principal vía de transporte de partículas que entran en las aguas de Barcelona es la Corriente del Norte (CN), con un 56,3% de todas las partículas

importadas procedentes del noreste. Una parte sustancial (39,8%) de las partículas importadas entró en el dominio desde el sureste y el suroeste, probablemente influenciada por el régimen de oleaje previo. Se han identificado zonas de acumulación alrededor de las Islas Baleares, y la modelización numérica muestra el litoral catalán como una de las principales zonas receptoras de partículas (de Haan, 2024).

4. Conclusiones

Las simulaciones que utilizan muestras de agua de playa como entrada para el modelo LOCATE rastrearon eficazmente el origen de las partículas en tierra, principalmente a fuentes proximales como sitios de descarga de CSO, áreas con alta complejidad estructural como muelles o puertos deportivos, que pueden albergar sitios de descarga desconocidos o ser también zonas de acumulación. De hecho, esto puede tener implicaciones en la gestión de basura marina para limitar o mitigar los efectos de las liberaciones de descargas del sistema de CSO durante eventos de precipitación. Los tiempos de resiliencia de las partículas de fuentes terrestres se mantuvieron muy cortos (del orden de días), lo que refleja tanto la escala del estudio como las dificultades de simular aguas costeras cercanas a la costa debido a las limitaciones de los datos hidrodinámicos. Las simulaciones también identificaron el litoral de Barcelona como un receptor neto de basura marina, con más de la mitad de los residuos plásticos moviéndose desde fuera del dominio. Sin embargo, esto no debería disminuir la gravedad de la acumulación de basura marina en aguas cercanas a la costa procedente de fuentes terrestres, lo que destaca la urgente necesidad de reducir los residuos plásticos en su origen, implementar medidas de mitigación antes de que lleguen al medio marino y mantener un seguimiento continuo de las emisiones.

Referencias

- Camins, E., de Haan, W.P., Salvo, V.S., Canals, M., Raffard, A., & Sanchez-Vidal, A., (2020). Paddle surfing for science on microplastic pollution. *Science of The Total Environment* 709, 136178.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136178>
- de Haan, W.P. (2024). Monitoring floating microplastics in coastal waters of the Western Mediterranean Sea. Phd thesis. Universitat de Barcelona. URL: <https://hdl.handle.net/2445/211464>. chapter 2.4, 201-246.
- de Haan, W.P., Uviedo, O., Ballesteros, M., Canales, I., Curto, X., Guart, M., et al. (2022). Floating microplastic loads in the nearshore revealed through citizen science. *Environmental Research Letters* 17, 045018.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5df1>
- Hernandez, I., Castro-Rosero, L.M., Espino, M., & Alsina, J.M. (2025). Processes controlling the dispersion and beaching of floating marine debris in the barcelona coastal region. *Frontiers in Marine Science* 11, 1534678.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1534678>
- Hernandez, I., Castro-Rosero, L.M., Espino, M., & Alsina, J.M. (2024). LOCATE v1.0: numerical modelling of floating marine debris dispersion in coastal regions using parcels v2.4.2. *Geoscientific Model Development* 17(754), 2221–2245. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-2221-2024>
- Liubartseva, S., Coppini, G., Lecci, R., & Clementi, E. (2018). Tracking plastics in the mediterranean: 2d lagrangian model. *Marine Pollution Bulletin* 129, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.019>

Cap a un assistent de feedback automàtic per a la representació dièdrica: Estudi pilot i flux híbrid

***Ismail El-Madafri Bennis, Noelia Olmedo-Torre,
Oscar Farrerons Vidal, Andrea Parga Vázquez,
Juan Carlos Marcillo Delgado***

**Escola d'Enginyeria Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny**

Resum

Aquest treball presenta una línia de recerca aplicada a l'assignatura d'Expressió Gràfica (primer curs d'enginyeria) orientada a millorar el feedback que reben els estudiants en exercicis de representació dièdrica a mà alçada. Davant la dificultat d'oferir una retroalimentació immediata i consistent quan el volum d'alumnat és elevat, el projecte analitza el potencial dels models multimodals per verificar criteris essencials del dibuix tècnic i generar comentaris breus i accionables. A diferència d'un enfocament de detecció exhaustiva d'errors, es proposa un marc de verificació criterial basat en una rúbrica universal i observable (completitud de vistes, alineació i coherència geomètrica, convencions de visibilitat, etiquetatge i llegibilitat), amb sortides estructurades per criteri (complert/ no complert/ dubtós) i justificacions concises. La primera fase defineix el protocol i avalua l'acord amb l'avaluació docent; la segona fase, a partir de les limitacions observades, planteja un flux híbrid que integra visió per computador i aprenentatge profund per extreure evidència estructural del dibuix i reduir falsos positius. Es discuteixen els objectius, el disseny experimental, el pla d'anàlisi i els aspectes ètics i de gestió de dades.

Abstract

This work presents an applied research line within the Engineering Graphics course (first-year engineering) aimed at improving the feedback students receive on freehand dihedral (orthographic) projection exercises. Given the difficulty of providing immediate and consistent feedback in large cohorts, the project examines the potential of multimodal models to verify essential technical-drawing criteria and generate brief, actionable comments. Rather

than adopting an exhaustive error-detection approach, we propose a criterion-based verification framework grounded in a universal, observable rubric (view completeness, alignment and geometric consistency, visibility conventions, labeling, and readability). The system produces structured outputs per criterion (met / not met / uncertain) with concise justifications. The first phase defines the protocol and assesses agreement with instructor evaluations; the second phase, building on the observed limitations, proposes a hybrid pipeline that integrates computer vision and deep learning to extract structural evidence from drawings and reduce false positives. We discuss the objectives, experimental design, analysis plan, and the ethical and data-management considerations.

1. Introducció

L'assignatura d'Expressió Gràfica en el primer curs d'enginyeria requereix que l'estudiant adquireixi competències de visualització espacial i comunicació tècnica a través de la representació normalitzada d'objectes, entre les quals destaca la representació dièdrica i el dibuix a mà alçada. En aquest context, l'avaluació formativa del dibuix no es limita a validar un resultat final, sinó que implica verificar criteris essencials de coherència geomètrica (completitud de vistes, alineació entre projeccions, convencions de visibilitat, etiquetatge i llegibilitat). Malgrat la seva importància, la correcció manual d'aquests exercicis és intensiva en temps i pot generar variabilitat en el feedback quan el volum d'alumnat és elevat, fet que dificulta oferir una retroalimentació immediata, específica i orientada a la millora. La recerca en avaluació formativa i feedback mostra que la seva eficàcia augmenta quan es proporciona de manera clara, accionable i en el moment adequat, facilitant la regulació del procés d'aprenentatge per part de l'estudiant (Nicol & Macfarlane, 2006; Hattie & Timperley, 2007).

En paral·lel, els avenços recents en models multimodals (models de llenguatge amb capacitat d'interpretar imatges) han impulsat l'interès

per la seva aplicació en contextos educatius, inclosa la possibilitat de generar explicacions i orientacions a partir de produccions visuals de l'alumnat. Tanmateix, l'estat actual d'aquests models mostra limitacions conegudes en tasques que exigeixen precisió geomètrica i interpretació robusta de traços imperfectes, especialment en presència d'ambigüïtat visual i soroll propi dels dibuixos a mà alçada (Yin et al., 2023). En conseqüència, una part crucial del repte es desplaça cap a la definició operativa de la tasca i dels criteris d'avaluació, de manera que el comportament del sistema sigui mesurable, replicable i contrastable amb l'avaluació docent. Això suggereix que l'objectiu rellevant, des d'una perspectiva metodològica i educativa, no és demostrar una "correcció automàtica completa", sinó delimitar de manera empírica quines verificacions són fiables, sota quines condicions, i com es pot estructurar la tasca per maximitzar la consistència del diagnòstic. Aquest projecte proposa un enfocament basat en verificació criterial: en lloc de demanar al sistema que identifiqui exhaustivament tots els errors possibles, s'utilitza una rúbrica reduïda i operativa de criteris universals i observables (p.e. presència de vistes requerides, alineació al voltant de la línia XY, ús correcte de línies ocultes, etiquetatge i llegibilitat) i es demana al model que emeti judicis acotats (complert/ no complert/ dubtós) amb justificacions breus i exemples concrets per criteri. Aquest plantejament permet (i) obtenir sortides interpretables i comparables amb l'avaluació docent, (ii) reduir falsos positius derivats d'una detecció oberta, i (iii) construir un marc experimental replicable per avaluar la utilitat real d'un assistent de feedback orientat a l'estudiant. Finalment, el projecte incorpora una segona fase orientada a la millora del sistema mitjançant un flux híbrid que integri visió per computador i aprenentatge profund per extreure informació estructural del dibuix (segmentació de vistes, detecció d'eixos, alineacions i patrons de línia) i alimentar el model multimodal amb evidències més robustes, incrementant la fiabilitat i la traçabilitat del feedback.

2. Objectius i preguntes de recerca

Objectiu general. Aquest projecte té com a objectiu analitzar, en un context real d'Expressió Gràfica (primer curs d'enginyeria), fins a quin punt un model multimodal pot verificar de manera fiable criteris essencials en dibuixos dièdrics a mà alçada i generar un feedback breu i accionable per a l'estudiant, tot identificant les limitacions que justifiquen el desenvolupament posterior d'un flux híbrid basat en visió per computador i aprenentatge profund.

Objectius específics. En particular, es plantegen els objectius següents: (O1) definir i operacionalitzar una rúbrica universal i estandarditzada, basada en criteris observables de qualitat en representació dièdrica (completitud de vistes, alineació i coherència geomètrica, convencions de visibilitat, etiquetatge i llegibilitat); (O2) establir un protocol d'avaluació comparativa entre professorat i model multimodal, amb sortides estructurades per criteri (complet/ no complet/ dubtós) i justificacions breus; (O3) quantificar el rendiment del model per criteri mitjançant mesures d'acord i d'error (p. ex., precisió/recall i acord interjutge), i caracteritzar sistemàticament els patrons de falsos positius i omissions; (O4) avaluar la utilitat educativa del feedback generat (claredat, especificitat i orientació a la millora) des de la perspectiva docent; i (O5) derivar, a partir dels resultats del pilot, els requisits funcionals per a la segona fase del projecte, orientada a integrar mòduls de visió per computador (segmentació de vistes, detecció d'elements estructurals i alineacions) que incrementin la robustesa del diagnòstic.

Preguntes de recerca. La recerca s'articula al voltant de tres preguntes principals: (RQ1) amb quin grau de fiabilitat pot un model multimodal verificar criteris essencials en dibuixos dièdrics a mà alçada, en comparació amb l'avaluació del professorat? (RQ2) quins criteris o condicions (p. ex., qualitat del traç, variabilitat en la disposició de les

vistes, presència d'elements de referència) expliquen millor els errors del model, i quins patrons de confusió són més recurrents? (RQ3) fins a quin punt el feedback generat és pedagògicament útil (específic, interpretable i accionable) i quins elements addicionals (p.e. evidències estructurals extretes amb visió per computador) són necessaris per millorar-ne la consistència i reduir falsos positius en una futura versió híbrida del sistema.

3. Disseny de l'estudi pilot

Es treballarà amb dibuixos dièdrics a mà alçada recollits en el marc docent d'Expressió Gràfica (primer curs d'enginyeria), digitalitzats i anonimitzats. El professorat actuarà com a referència mitjançant anotacions basades en una rúbrica universal i observable (vegeu la Taula 1), establint un criteri de comparació.

Rúbrica
Disposició de les vistes
Projecció de vistes i proporcions
Alienació i coherència geomètrica
Visibilitat i llegibilitat
Anotació
Línies ocultes

Taula 1. Dimensions d'avaluació utilitzades en l'estudi pilot de dibuix dièdric.

El model multimodal s'avaluarà sota diferents condicions generals (amb o sense material de referència, amb o sense retalls de vistes), evitant

detalls de configuració específics. La sortida principal de l'estudi serà la verificació per criteri (complet/ no complet/ dubtós) amb una justificació i exemples breus.

4. Pla d'anàlisi

L'anàlisi combinarà mesures quantitatives i qualitatives. A nivell quantitatiu, es calcularà el rendiment per criteri (p. ex., precisió/recall) i l'acord entre avaluadors humans i el sistema (mesures d'acord interjutge). També es durà a terme una anàlisi d'errors per identificar patrons de confusió, especialment falsos positius i omissions. A nivell qualitatiu, es revisarà la utilitat del feedback generat en termes de claredat, especificitat i orientació a la millora, amb suport del criteri docent.

Flux híbrid (visió per computador + model multimodal)

A partir de les limitacions detectades en l'estudi pilot, la segona fase del projecte planteja el desenvolupament d'un flux híbrid orientat a incrementar la robustesa del sistema i reduir, especialment, els falsos positius i les omissions en l'anàlisi de dibuixos dièdrics a mà alçada. Aquest plantejament es justifica perquè, tot i els avenços recents en models multimodals, la literatura descriu que aquests sistemes poden presentar inconsistències i fenòmens de tipus *hallucination* (sortides no alineades amb l'evidència visual), sobretot en situacions amb ambigüïtat o soroll a la imatge (Yin et al., 2023; Bai et al., 2024). En el nostre cas, aquesta ambigüïtat és inherent: el traç manual és irregular, hi ha variabilitat d'estil i, sovint, no existeixen referències perfectament definides, fet que incrementa la dificultat de les inferències geomètriques (Eitz et al., 2012).

En aquest context, el flux híbrid té com a objectiu ancorar el raonament del model multimodal amb evidència estructurada extreta directament del dibuix mitjançant visió per computador i aprenentatge profund.

Concretament, es preveu incorporar mòduls per (i) detectar o segmentar les vistes (alçat, planta, perfil), (ii) identificar elements estructurals com la traça XY i alineacions rellevants, i (iii) extreure una representació intermèdia basada en segments i unions (*wireframe-like representation*) que faciliti verificacions geomètriques simples i mesurables. Aquest enfocament s'alineja amb línies consolidades de recerca en *wireframe parsing*, que permeten obtenir representacions vectoritzades de línies i junctions a partir d'imatges mitjançant xarxes neuronals (Zhou et al., 2019; Xue et al., 2020). Igualment, la detecció robusta de segments —clau per identificar patrons d'alineació i traça discontinu— pot basar-se en detectors clàssics i/o profunds, com LSD (von Gioi et al., 2012) o DeepLSD (Pautrat et al., 2023), que proporcionen una base metodològica sòlida per extreure estructura geomètrica de la imatge. En última instància, el model multimodal integraria aquesta evidència (p. ex., mesures d'alineació, presència/ absència de patrons de línia discontinua, consistència entre vistes) per emetre una decisió per criteri (complert/ no complert/ dubtós) i generar feedback més consistent i justificable.

5. Aspectes ètics i pla de gestió de dades

La recollida de dades es farà amb consentiment informat i participació voluntària, sense impacte en l'avaluació acadèmica. Els dibuixos es tractaran de forma anonimitzada i es custodiaran en entorns segurs amb accés restringit al personal investigador. El consentiment contemplarà opcions diferenciades d'ús: experiments amb models multimodals, entrenament/validació de models de visió del grup de recerca i, si escau, incorporació a un conjunt de dades obert per a investigadors. Es preveu un pla de gestió de dades (DMP) que estableixi processos de conservació, accés i eventual compartició en obert.

Referències

- Bai, Z., Wang, P., Xiao, T., He, T., Han, Z., Zhang, Z. et al. (2024). Hallucination of multimodal large language models: A survey. *arXiv preprint*, arXiv:2404.18930.
- Eitz, M., Hays, J., & Alexa, M. (2012). How do humans sketch objects? *ACM Transactions on Graphics*, 31(4), Article 44.
<https://doi.org/10.1145/2185520.2185540>
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81-112.
<https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Nicol, D. J., & Macfarlane-Dick, D. (2006). Formative assessment and self-regulated learning: a model and seven principles of good feedback practice. *Studies in Higher Education*, 31(2), 199–218.
<https://doi.org/10.1080/03075070600572090>
- Pautrat, R., Barath, D., Larsson, V., Oswald, M. R., & Pollefeys, M. (2023). DeepLSD: Line segment detection and refinement with deep image gradients. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
<https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01662>
- Von Gioi, R. G., Jakubowicz, J., Morel, J.-M., & Randall, G. (2012). LSD: A line segment detector. *Image Processing On Line*, 2, 35–55.
- Xue, N., Wu, T., Bai, S., Wang, F.-D., Xia, G.-S., Zhang, L., & Torr, P. H. S. (2020). Holistically-attracted wireframe parsing. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Yin, S., Fu, C., Zhao, S., Li, K., Sun, X., Xu, T., & Chen, E. (2023). A survey on multimodal large language models. *arXiv preprint*, arXiv:2306.13549.
- Zhou, Y., Qi, H., & Ma, Y. (2019). End-to-end wireframe parsing. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*.

Recuperació de fibres de cel·lulosa de residus tèxtils post-consum mitjançant líquids iònics i tractaments enzimàtics

Elisabet Quintana, Carla Gutiérrez, M. Blanca Roncero

Escola S. d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Grup CELBIOTECH

Resum

La generació de residus tèxtils constitueix un repte ambiental de primer ordre, tant per la seva elevada quantitat com per la complexitat associada a la seva gestió. A Catalunya i a escala mundial, les taxes de recollida selectiva i reciclatge de tèxtils continuen sent molt baixes, fet que dificulta l'assoliment dels objectius establerts per la normativa europea en matèria d'economia circular. En aquest context, els processos de reciclatge químic i biotecnològic emergeixen com a alternatives prometedores per a la valorització de residus tèxtils cel·lulòsics, especialment el cotó. Els líquids iònics (LI) han demostrat una elevada eficiència en la dissolució de la cel·lulosa gràcies a la seva capacitat dissolvent, estabilitat tèrmica i baix impacte ambiental, especialment quan es combinen amb pretractaments enzimàtics amb cel·lulasa. La cel·lulosa dissolta pot ser posteriorment regenerada mitjançant l'addició d'un antisolvent, aigua, permetent l'obtenció de nous materials amb diferents morfologies i aplicacions potencials. En aquest estudi s'utilitza el líquid iònic 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate (EmimOAc) per a la recuperació de fibres de cel·lulosa procedents de residus tèxtils post-consum 100 % cotó i multicolor. S'avalua l'efecte d'un pretractament alcalí per a l'eliminació de colorants i l'optimització del procés mitjançant diferents condicions de pretractament enzimàtic, amb l'objectiu de millorar l'eficiència, la sostenibilitat i la viabilitat del procés.

Abstract

The generation of textile waste represents a major environmental challenge, both due to its large volume and the complexity associated with its management. In Catalonia and worldwide, selective collection and recycling

rates for textiles remain very low, which hinders the achievement of the objectives established by European regulations on the circular economy. In this context, chemical and biotechnological recycling processes are emerging as promising alternatives for the valorization of cellulosic textile waste, especially cotton. Ionic liquids (ILs) have demonstrated high efficiency in dissolving cellulose due to their solvent capacity, thermal stability, and low environmental impact, particularly when combined with enzymatic pretreatments using cellulase. The dissolved cellulose can subsequently be regenerated through the addition of an antisolvent, typically water, enabling the production of new materials with different morphologies and potential applications. In this study, the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate (EmimOAc) is used to recover cellulose fibers from post-consumer textile waste consisting of 100% cotton and multicolored fabrics. The effect of an alkaline pretreatment for dye removal is evaluated, along with process optimization through different enzymatic pretreatment conditions, with the aim of improving the efficiency, sustainability, and viability of the process.

1. Introducció

La generació de residus tèxtils representa un dels reptes ambientals més urgents del segle XXI, tant per la seva quantitat com per la complexitat en la seva gestió. A Catalunya, es calcula que cada ciutadà genera aproximadament 22 kg de residus tèxtils anuals, dels quals només un 11% es recull de manera selectiva (Agència de Residus de Catalunya, 2024). A escala mundial, menys de l'1% del mercat global de fibres procedeix de tèxtils reciclats, i una fracció encara menor de la roba usada es transforma directament en noves peces, segons dades recents (Exchange, 2020).

Aquesta situació s'emmarca dins un context europeu en què la Directiva 2018/851 de la Unió Europea estableix l'obligació d'implementar sistemes de recollida selectiva de tèxtils abans del 2025, amb l'objectiu de fomentar la reutilització i el reciclatge dins d'un model d'economia circular (Stanescu, 2021). Malgrat aquestes iniciatives, la presència de mescles de fibres en la composició dels

teixits, així com els tint, i els tractaments d'acabat dificulten la recuperació eficient de fibres naturals com el cotó, especialment en processos mecànics convencionals. En aquest context, els processos de reciclatge químic i biotecnològic emergeixen com alternatives viables per a la valorització dels residus tèxtils. Entre les estratègies més prometedores destaca l'ús de líquids iònics (LI) com a solvents verds per a la dissolució de la cel·lulosa, sovint combinats amb pretractaments enzimàtics.

Els líquids iònics (LI) són sals formades per un catió i un anió orgànics o inorgànics que, a diferència de les sals convencionals, presenten punts de fusió baixos i es mantenen en estat líquid per sota dels 100 °C (Mehrkes, 2016). Les seves propietats físiques i químiques depenen fortament de la combinació de catió-anió emprada, la qual cosa permet dissenyar-los de manera específica segons l'aplicació desitjada (Swami et al., 2024; Tang & Wang, 2022).

En el camp del reciclatge de fibres cel·lulòsiques, els líquids iònics han demostrat una elevada eficiència en la dissolució de la cel·lulosa, ja que ofereixen una elevada capacitat dissolvent, estabilitat tèrmica, així com l'avantatge de ser reciclables, no tòxics i no volàtils. Aquest enfocament sostenible es veu reforçat quan es combina amb un pretractament enzimàtic mitjançant cel·lulasa, que actua de manera selectiva sobre la fracció amorfa de la cel·lulosa, millorant-ne l'accessibilitat.

La cel·lulosa dissolta, posteriorment pot ser regenerada mitjançant l'addició d'un antisolvent, habitualment aigua. Aquest procés de regeneració condueix a la precipitació de la cel·lulosa dissolta i possibilita l'obtenció de nous materials en diverses formes, com filaments, films, fibres o gels, amb propietats mecàniques i funcionals d'interès. Aquesta estratègia ofereix el potencial de reintroduir la cel·lulosa regenerada dins la cadena productiva, contribuint al

tancament del cicle dels materials dins d'un model d'economia circular (Swami et al., 2024).

En aquest treball s'ha seleccionat el líquid iònic 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate (EmimOAc) com a dissolvent verd per al tractament de residus cel·lulòsics procedents de teixits de cotó. El líquid iònic 1-etil-3-metilimidazoli acetat (EmimOAc) és un solvent altament eficient per a la dissolució de la cel·lulosa, principalment pel paper clau de l'anió acetat. Aquest anió presenta una elevada basicitat i una forta capacitat d'acceptació d'enllaços d'hidrogen, la qual cosa li permet trencar la xarxa d'enllaços d'hidrogen intermoleculars que estableixen l'estructura cristal·lina de la cel·lulosa. D'aquesta manera, es facilita la separació i solvatació de les cadenes polimèriques. El catió imidazòlic contribueix de manera secundària, estabilitzant el medi i afavorint la mobilitat de l'anió (Zhang et al. (2017). A diferència dels líquids iònics basats en anions halur, el mecanisme de dissolució de (EmimOAc) està dominat per la basicitat i capacitat coordinadora de l'anió acetat, fet que explica la seva elevada eficiència a temperatures moderades. (Amini et al., 2021). D'altra banda, l'aplicació de tractaments enzimàtics per millorar l'accessibilitat de la cel·lulosa esdevé clau per optimitzar els processos de dissolució. Així, la selecció adequada del líquid iònic i de les condicions de procés pot determinar la viabilitat tècnica i ambiental del reciclatge de fibres cel·lulòsiques post-consum.

L'objectiu principal d'aquest estudi és recuperar fibres de cel·lulosa procedents de residus tèxtils post-consum 100% cotó i multicolor mitjançant l'ús de líquids iònics com a dissolvents de baix impacte ambiental. Atès que la presència de colorants pot dificultar la dissolució de la cel·lulosa en interferir en les interaccions entre el polímer i el líquid iònic, s'avaluarà l'eficiència d'un pretractament alcalí amb NaOH per a l'eliminació dels colorants i el seu efecte sobre la capacitat de dissolució de les fibres. Totes les mostres es dissoldran

utilitzant una relació de 4 g de cotó per cada 100 mL de líquid iònic. A més a més, s'estudiarà l'optimització del procés de dissolució mitjançant un tractament enzimàtic amb cel·lulasa, comparant dues condicions de treball: 40 U d'enzim per gram de pasta seca (g.p.s) durant 1 hora i 60 U/gps durant 30 minuts. El propòsit és determinar si un increment de la dosi enzimàtica permet reduir el temps de tractament sense comprometre l'eficiència del procés, contribuint així a la seva optimització en termes de rendiment, cost i sostenibilitat. Finalment, es determinarà l'activitat enzimàtica residual dels enzims després dels respectius tractaments, amb l'objectiu de poder reutilitzar aquests enzims en posteriors tractaments.

2. Materials i mètodes

2.1. Extracció alcalina amb NaOH

La mostra de cotó primerament es desfibra amb un molinet fins aconseguir una pols, i a continuació es col·loca dins una bossa de polietilè, juntament amb la quantitat adequada de la dissolució de NaOH, a una consistència del 5%. La bossa es submergeix en un bany maria d'acord amb les condicions de treball definides a la Taula 1. Finalitzat el tractament, la mostra resultant es renta amb aigua destil·lada fins assolir un pH neutre i a continuació es deixa assecar a temperatura ambient durant 24 hores. Finalment es torna a passar pel molinet fins aconseguir novament una pols.

Nomenclatura	Descripció Tractament
E(pH12, T90, 2h)	Extracció alcalina amb NaOH 1,5%, a un pH de 12, durant 2 hores a 90 °C
E(pH12, T90, 1h)	Extracció alcalina amb NaOH 1,5%, a un pH de 12, durant 1 hora a 90 °C
E(pH12, T90, 30')	Extracció alcalina amb NaOH 1,5%, a un pH de 12, durant 30 minuts a 90 °C
E(pH12, T50, 2h)	Extracció alcalina amb NaOH 1,5%, a un pH de 12, durant 2 hores a 50 °C
E(pH8, T90, 2h)	Extracció alcalina amb NaOH 1,5%, a un pH de 8, durant 2 hores a 90 °C

Taula 1. Descripció de les condicions de treball del pre-tractament amb NaOH.

2.2. Tractament enzimàtic amb cel·lulasa Fibercare

Les mostres resultants d'aplicar el pretractament, es sotmeten a un tractament enzimàtic amb la cel·lulasa Fibercare de Novozymes. El tractament enzimàtic es du a terme en una bossa de polietilè, al 5% de consistència amb tampó acetat-sòdic a pH 5, a 50 °C i a diferents dosis d'enzim i temps de reacció tal i com es detalla a la Taula 2.

Un cop la reacció ha finalitzat, es filtra la suspensió emprant un embut Büchner i es realitzen cinc rentats consecutius amb aigua descalcificada per eliminar l'enzim residual i els subproductes. La mostra sòlida resultant es deixa assecar a temperatura ambient durant 24 hores.

Nomenclatura	Descripció Tractament
C(40/1h)	Tractament enzimàtic amb 40 U/gps de cel·lulasa Fibercare durant 1h.
C(60/30')	Tractament enzimàtic amb 60 U/gps de cel·lulasa Fibercare durant 30 min.

Taula 2. Descripció de les condicions de treball del tractament enzimàtic amb cel·lulasa Fibercare de Novozymes.

2.3. Disseny experimental

A la Figura 1 es mostra el disseny experimental amb totes les etapes que s'han estudiat.

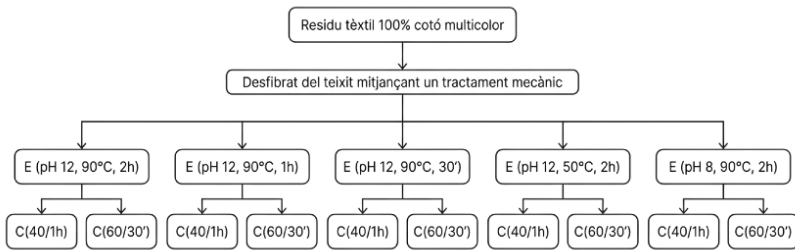


Figura 1. Diagrama de les etapes experimentals que s'han estudiat.

2.4. Obtenció dels films

Els films es van obtenir mitjançant la tècnica de casting. Es van pesar 0,3 g de cotó, als quals es va afegir la quantitat corresponent de líquid iònic 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate (EmimOAc) en una placa petri, treballant a una consistència del 4 % en pes (g de teixit per cada 100 g de LI). Seguidament, la mostra es va introduir immediatament en una estufa a una temperatura controlada de 90 °C per afavorir la dissolució de les fibres. Durant aquest procés, el sistema va adquirir una textura gelatinosa característica.

Per tal d'assegurar la dissolució completa de les fibres, es va realitzar un seguiment visual periòdic del procés. La dissolució es va considerar completa quan, en tocar el material amb un punxó, aquest recuperava la seva textura inicial en pocs segons. Un cop finalitzada aquesta etapa, la placa es va retirar de l'estufa i es va deixar refredar lleugerament. A continuació, es va afegir aigua destil·lada de manera lenta i controlada, actuant com a antisolvent, fet que va provocar la

precipitació de la cel·lulosa i la formació del film a la superfície de la placa.

El film obtingut es va sotmetre a deu rentats consecutius amb aigua destil·lada per assegurar l'eliminació del líquid iònic residual. Finalment, es va procedir a l'assecat del film aplicant pressió reduïda durant 1 hora a una temperatura constant de 60 °C, utilitzant una màquina Rapid-Köthen . Durant l'assecat, el film es va col·locar entre papers de filtre en disposició de sandvitx per garantir un assecat uniforme i evitar deformacions.

2.5. Determinació de l'activitat enzimàtica residual

Un cop finalitzats els tractaments enzimàtics, es van recollir els efluents generats amb l'objectiu d'avaluar l'activitat enzimàtica residual d'aquests. L'activitat enzimàtica es va mesurar mitjançant un assaig colorimètric basat en l'absorció (ABS), emprant un espectrofotòmetre per detectar la presència de sucres reductors que es generen degut a l'efecte hidrolític de l'enzim. A partir dels valors d'absorció obtinguts es pot calcular l'activitat enzimàtica residual en unitats per mil·lilitre i minut (U/mL·min), valor que representa la capacitat de l'enzim per hidrolitzar la cel·lulosa en un determinat interval de temps.

2.6. Microscopi llum polaritzada

La microscòpia de llum polaritzada es va utilitzar per avaluar qualitativament la capacitat del líquid iònic (LI) de dissoldre completament les fibres de cotó. Es van preparar diferents mostres de composició 100 % cotó blanc, amb una concentració de fibra del 4 % en pes, i es va variar el temps que les mostres van romandre a l'estufa a 90 °C. Un cop finalitzat el temps d'exposició, les mostres es van observar mitjançant microscòpia de llum polaritzada per avaluar el grau de dissolució de les fibres.

3. Resultats

A la Figura 2, es mostren les imatges obtingudes per microscòpia de llum polaritzada, on es confirma que l'augment del temps d'exposició a l'estufa afavoreix la dissolució de les fibres de cotó. S'observa que després de 2h d'exposició a l'estufa, la presència de fibres és molt reduïda, indicant un alt grau de dissolució de la cel·lulosa.

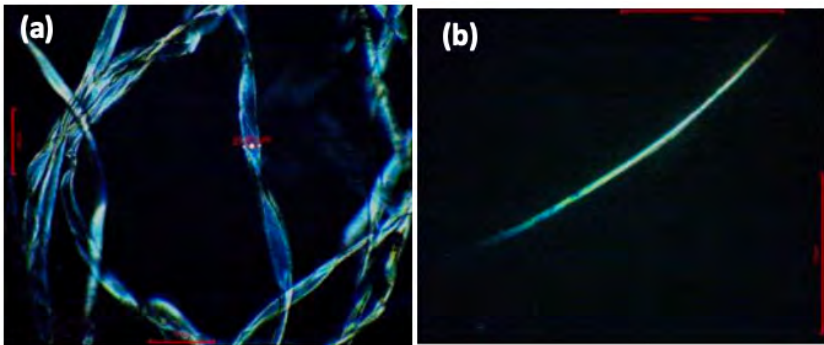


Figura 2. (a) Fibres de cotó dissoltes amb LI al cap de 30' de reacció dins l'estufa a 90 °C, (b) Fibres de cotó dissoltes amb LI al cap de 2h de reacció dins l'estufa a 90 °C.

En estudis previs, es va establir que les condicions d'extracció alcalina a pH 12, 90 °C durant 2 hores oferien una alta eficàcia en l'eliminació de colorants presents en residus tèxtils 100 % cotó (Figura 3). Aquestes condicions es van considerar ideals com a punt de partida, però amb l'objectiu de reduir el temps i/o la intensitat del tractament sense comprometre l'eficiència del procés, l'estratègia experimental es va basar en modificar una única variable per assaig (temps, temperatura o pH), mantenint constants les altres, per tal d'identificar quina d'elles té un impacte més significatiu sobre l'eliminació de colorants i l'estat estructural de la fibra. A la Figura 3 s'observa que el film procedent d'haver aplicat un pretractament àlcali de 2h a 90°C i a continuació un

tractament enzimàtic presenta millors resultats en quan a decoloració en comparació al film obtingut d'aplicar només un tractament enzimàtic.



Figura 3. Aspecte final dels films: a l'esquerra, film obtingut després d'una seqüència d'extracció alcalina (90°C, 2h) seguida d'un tractament enzimàtic amb cel·lulasa (E_C(40/1h)); a la dreta, film obtingut aplicant únicament un tractament enzimàtic amb cel·lulasa (C(40/1h)).

La Figura 4 mostra el temps necessari per a la dissolució completa de les fibres de cotó en funció de les diferents condicions experimentals, comparant mostres sense tractament enzimàtic i mostres sotmeses a un tractament amb cel·lulasa sota diferents condicions d'extracció alcalina (variació de temps, pH i temperatura). Les mostres control, tractades únicament amb líquid iònic (LI) al 4%, presenten un temps mitjà de dissolució al voltant de les 20 h.

En absència d'un tractament enzimàtic, però després d'un pretractament alcalí, els temps de dissolució es redueixen significativament respecte al control, situant-se generalment entre 10 i 12 h, independentment de les condicions d'extracció alcalina aplicades. Aquest resultat indica que l'extracció alcalina contribueix a millorar l'accessibilitat de la cel·lulosa al líquid iònic, probablement mitjançant l'eliminació parcial d'impureses i la modificació de l'estructura de la fibra degut a l'inflament d'aquesta, tot i que l'efecte és limitat.

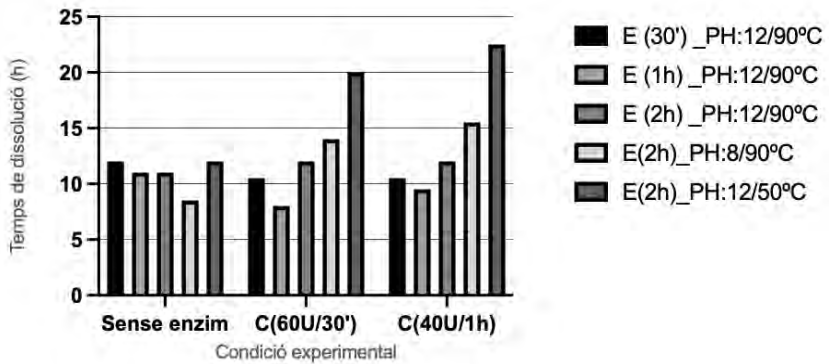


Figura 4. Temps de dissolució (h) dels residus tèxtils multicolors en funció del pretractament alcalí i de la presència d'enzim. La línia de color vermell indica el temps mitjà de dissolució de les mostres dissoltes amb LI sense haver aplicat prèviament cap tipus de tractament.

La incorporació d'un pretractament enzimàtic amb cel·lulasa comporta en alguns casos una reducció addicional del temps de dissolució, destacant que la condició de 60 U durant 30 min, aconsegueix els temps de dissolució més baixos. Aquest comportament suggereix que una dosi enzimàtica elevada aplicada durant un temps curt és més efectiva que una dosi menor aplicada durant un període més llarg (40 U durant 1 h), ja que afavoreix una hidròlisi més eficient de la fracció amorfa de la cel·lulosa i incrementa la seva accessibilitat. No obstant, si analitzem l'efecte de l'extracció alcalina sobre el tractament enzimàtic, s'observa que les condicions més severes (pH 12 i 90 °C) aconsegueixen reduir el temps de dissolució, destacant que el menor temps s'obté amb un pretractament àlcali a pH 12, 90 °C durant 1h. En canvi, condicions més suaus, com un pH més baix o una temperatura més suau, donen lloc a temps de dissolució superiors al tractament control i fins i tot assolint temps de dissolució pròxims a la mostra sense cap tractament. Aquest augment notable del temps de dissolució

possiblement és degut a processos de reorganització estructural de la cel·lulosa o un augment de la cristal·linitat de la cel·lulosa dificultant l'accessibilitat del LI.

La Taula 3 mostra l'activitat enzimàtica residual de la cel·lulasa Fibercare sota diferents condicions experimentals, variant el pretractament alcalí (pH, temperatura i temps) i la dosi/temps d'aplicació enzimàtica (60 U durant 30 min i 40 U durant 1 h). En totes les condicions assajades, s'observa activitat enzimàtica residual positiva, indicant que l'enzim manté activitat després dels diferents tractaments previs. Aquests resultats són molt interessants i rellevants ja que permetria una reutilització dels efluents i per tant un estalvi en l'ús d'enzim nou.

Condicions Extracció alcalina	Condicions tractament cel·lulasa	Activitat enzimàtica després dels tractaments (U/mL·min)
pH 12, 90°, 1h	C(60_30')	5,7
pH 12, 90°, 1h	C(40_1h)	6,7
pH 12, 90°, 30'	C(60_30')	4,2
pH 12, 90°, 30'	C(40_1h)	4,7
pH 12, 50°, 2h	C(60_30')	4,9
pH 12, 50°, 2h	C(40_1h)	5,6

Taula 3. Resultats de l'activitat enzimàtica de l'enzim Fibercare després d'aplicar els diferents tractaments enzimàtics.

Les condicions amb extracció alcalina a pH 12 i 90 °C durant 1 h mostren els valors d'activitat residual més elevats, especialment quan s'aplica la condició de 40 U durant 1 h, assolint els màxims del conjunt de dades. Quan el temps d'extracció a pH 12 i 90 °C es redueix a 30

min, l'activitat residual disminueix lleugerament, tot i mantenir-se en valors moderats per a ambdues condicions enzimàtiques. En el cas de l'extracció a pH 12 i 50 °C durant 2 h, s'observen valors d'activitat residual lleugerament inferiors als obtinguts a 90 °C durant 1h. De manera anàloga, les mostres tractades a pH 8 i 90 °C durant 2 h presenten activitats residuals comparables.

No obstant, tot i que l'enzim mantingui activitat residual, caldria correlacionar aquests resultats amb la producció de glucooligosacàrids (GOS) per tal d'entendre l'acció que ha causat l'enzim a la cadena de cel·lulosa.

4. Conclusions

Els pretractaments alcalins i enzimàtics aplicats a les fibres de cotó multicolor han demostrat millorar l'eficiència de la dissolució respecte a la dissolució directa amb líquid iònic (LI). L'extracció alcalina (E), destinada sobretot a eliminar colorants i inflar les fibres per augmentar-ne l'accessibilitat, ja ha contribuït a reduir el temps de dissolució, observant poques diferències entre les diferents condicions estudiades.

El tractament enzimàtic amb cel·lulasa, orientat a facilitar la penetració del LI i accelerar la dissolució de la cel·lulosa, ha resultat especialment eficient amb Fibercare a 60 U/30', que ha mostrat millor rendiment que a 40 U/1h. A més, els efluents d'aquest tractament van mantenir certa activitat residual, obrint la possibilitat de reutilitzar-los i reduir el consum d'enzim.

Agraïments

Aquest estudi forma part del projecte 22S09407-001 finançat per l'Ajuntament de Barcelona. Elisabet Quintana és professora Serra Húnter.

Referències

- Amini, E., Valls, C., & Roncero, M. B. (2021). Ionic liquid-assisted bioconversion of lignocellulosic biomass for the development of value-added products. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129275. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129275>
- Exchange, T. (2020). Preferred Fiber & Materials Market Report 2020. 103.
- Mehrkes, A. (2016). Optimization-based design and analysis of tailor-made ionic liquids. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1612.06407>
- Stanescu, M. D. (2021). State of the art of post-consumer textile waste upcycling to reach the zero waste milestone. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14253–14270. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12416-9>
- Swami, S., Suthar, S., Singh, R., Thakur, A. K., Gupta, L. R., & Sikarwar, V. S. (2024). Potential of ionic liquids as emerging green solvent for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(9), 12871–12891.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32100-y>
- Tang, C., & Wang, Y. (2022). Phase Behaviors of Ionic Liquids Attributed to the Dual Ionic and Organic Nature. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2210.14490>

Un Pont Pedagògic entre Teoria i Pràctica. Aprentatge corporitzat i habilitats humanes en la formació d'enginyeria mecànica en l'era de la IA

Mariolly Dávila Cordido

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

La creixent automatització dels processos de disseny en enginyeria mecànica, impulsada per eines digitals avançades i sistemes basats en intel·ligència artificial (IA), planteja nous reptes pedagògics. En aquest context, resulta necessari identificar quines habilitats humanes continuen essent essencials i com poden ser desenvolupades de manera efectiva dins la formació universitària. Aquest article presenta l'anàlisi del projecte docent de l'assignatura Ampliació d'Expressió Gràfica. Disseny Mecànic (AEGDM), impartida al cinquè quadrimestre del Grau en Enginyeria Mecànica a la UPC. El projecte, desenvolupat al llarg de tot el semestre, actua com un pont pedagògic entre teoria acadèmica i pràctica professional, integrant aprenentatge corporitzat, humanics i eines digitals avançades. L'avaluació, basada en dades quantitatives i qualitatives, mostra que el desenvolupament d'habilitats humanes, com la percepció espacial, el pensament crític, el judici tècnic i la responsabilitat professional, és inseparable de l'assoliment de competències tècniques. Es conclou que aquest tipus de projectes constitueixen un llindar pedagògic necessari abans de la incorporació plena a entorns de disseny automatitzats.

Abstract

The increasing automation of design processes in mechanical engineering, driven by advanced digital tools and artificial intelligence (AI)-based systems, poses new pedagogical challenges. In this context, it becomes necessary to identify which human skills remain essential and how they can be effectively developed within university education. This article presents an analysis of the

teaching project of the course *Advanced Engineering Graphics. Mechanical Design* (AEGDM), taught in the fifth semester of the Bachelor's Degree in Mechanical Engineering at UPC. The semester-long project acts as a pedagogical bridge between academic theory and professional practice, integrating embodied learning, humanics, and advanced digital tools. The evaluation, based on quantitative and qualitative data, shows that the development of human skills, such as spatial perception, critical thinking, technical judgment, and professional responsibility, is inseparable from the acquisition of technical competencies. It is concluded that this type of project constitutes a necessary pedagogical threshold prior to full integration into automated design environments.

1. Introducció

La distància entre la formació acadèmica en enginyeria mecànica i les exigències de la pràctica professional ha estat àmpliament documentada. En els darrers anys, la creixent incorporació d'eines de disseny assistit, simulació computacional i intel·ligència artificial ha accentuat aquesta bretxa, especialment en les fases inicials del procés de projecte.

Tot i els beneficis de l'automatització, existeix el risc que dimensions clau del pensament enginyeril, com la comprensió espacial, la interpretació funcional o el judici tècnic, quedin diluïdes. Això planteja una qüestió pedagògica central: com formar enginyers capaços d'integrar tecnologia avançada sense renunciar al criteri propi ni a la responsabilitat professional?

En aquest context, l'assignatura *Ampliació d'Expressió Gràfica. Disseny Mecànic* incorpora un projecte integrador que articula coneixement teòric, aprenentatge corporitzat i ús crític d'eines digitals. Aquest estudi analitza fins a quin punt aquest enfocament contribueix al desenvolupament d'habilitats humanes clau abans de la incorporació intensiva d'eines d'intel·ligència artificial.

2. Marc teòric: Aprenentatge corporitzat i humanics

2.1. Aprenentatge corporitzat

Les teories contemporànies de la cognició han superat la visió del coneixement com un procés purament abstracte, proposant que la cognició emergeix de la interacció dinàmica entre cos, ment i entorn (Varela et al., 1991; Wilson, 2002). L'aprenentatge corporitzat (embodied learning) considera que l'acció, la percepció i la manipulació física són fonamentals en la construcció del coneixement, especialment en domini amb raonament espacial i comprensió de sistemes complexos (Barsalou, 2008; Macrine & Fugate, 2021).

En educació, diverses evidències mostren que les estratègies corporitzades milloren la comprensió conceptual, la retenció i la transferència del coneixement, especialment en activitats que impliquen prototipat i manipulació d'objectes (Johnson-Glenberg et al., 2014; Skulmowski & Rey, 2018).

2.2. Aprenentatge corporitzat en enginyeria mecànica

L'enginyeria mecànica és un camp especialment adequat per a l'aprenentatge corporitzat, ja que el disseny i desenvolupament de projectes requereix percepció tridimensional, comprensió del comportament mecànic i prototipat iteratiu (Sheppard et al., 2009; Dym et al., 2005).

Activitats *hands-on*, com el treball en taller i el prototipat físic, afavoreixen comprensió profunda dels principis mecànics i milloren la resolució de problemes oberts (Prince & Felder, 2006; Kolmos et al., 2009). A més, reforcen el raonament espacial, clau per a l'èxit en disciplines d'enginyeria (Sorby et al., 2013).

2.3. Humanics: habilitats no automatitzables

Amb l'avenç de la IA, emergeix el concepte de Humanics, que subratlla la importància d'habilitats no automatitzables com empatia, pensament crític, comunicació, col·laboració i responsabilitat ètica (Aoun, 2017;

Markauskaite et al., 2022). Aquestes competències són essencials per interpretar l'impacte social i ambiental de decisions tècniques (Boden et al., 2019; UNESCO, 2023).

2.4. Complementarietat entre aprenentatge corporitzat i humanics

L'aprenentatge corporitzat i el desenvolupament de competències humanics es reforcen mútuament. L'acció i el treball col·laboratiu no només milloren la comprensió tècnica, sinó que generen espais per a la reflexió ètica i la presa de decisions compartida (Dewey, 1938; Kolb, 1984; Trevelyan, 2014).

2.5. XR com a extensió del corporitzat

Les tecnologies de *Extended Reality* (VR, AR, MR) poden potenciar l'aprenentatge corporitzat, permetent experimentar amb prototips virtuals i escenaris costosos o perillosos (Bower et al., 2017; Lampropoulos et al., 2025). Tot i això, la immersió ha d'anar acompanyada de reflexió guiada i connexió amb la pràctica física (Makransky & Petersen, 2019).

2.6. Prototipat i expressió gràfica

El prototipat i l'expressió gràfica (croquis, dibuix tècnic, CAD) medien entre pensament abstracte i execució material. Són eines fonamentals per al raonament creatiu i la iteració del disseny (Goldschmidt, 2014; Oxman, 2017; Verstijnen et al., 1998). Quan s'integren amb entorns XR i eines digitals, reforcen la visualització espacial i la capacitat crítica.

2.7. Reptes educatius

Implementar aquest enfocament presenta reptes: sobrecàrrega cognitiva, desigualtat d'accés a tecnologia i necessitat de formació docent específica. A més, l'avaluació de competències humanics requereix indicadors que vagin més enllà dels mètrics tècnics (Skulmowski & Rey, 2018; Markauskaite et al., 2022).



Figura 1. Diagrama conceptual d'aprenentatge corporitzat i humanics en el projecte d'enginyeria mecànica.

3. Metodologia: Exercici pedagògic a l'AEGDM

L'exercici pedagògic desenvolupat a l'assignatura Ampliació d'Expressió Gràfica. Disseny Mecànic (AEGDM) actua com un pont entre la teoria acadèmica i la pràctica professional de l'enginyeria mecànica. Es duu a terme amb estudiants de tercer curs del Grau en Enginyeria Mecànica (cinquè quadrimestre) i integra principis de humanics i design thinking, estructurant el projecte en tres fases principals que reproduïxen el procés real de disseny d'un producte mecànic.

3.1. Fase 1. Ideació i interpretació del mecanisme

La primera fase correspon a la ideació col·lectiva, basada en l'anàlisi i interpretació d'un mecanisme real. Els estudiants treballen en equip

per comprendre el funcionament global del conjunt, identificant les seves parts, moviments i relacions funcionals.

Aquesta fase inclou principalment:

- Observació directa del mecanisme,
- Descripció funcional i cinemàtica,
- Croquis a mà alçada per a la interpretació geomètrica,
- Geometrització de les peces principals,
- Definició preliminar de materials i acabats.

L'objectiu és construir una comprensió conceptual i espacial sòlida abans de qualsevol automatització del disseny. Aquesta etapa activa habilitats humanes clau com el raonament espacial, el pensament crític i la presa de decisions col·lectiva, constituint la base del procés posterior.

3.2. Fase 2. Prototipat i desenvolupament del disseny

La segona fase correspon al prototipat, entès tant en el seu vessant físic com digital. A partir de la ideació prèvia, els estudiants desenvolupen el disseny detallat de les peces i del conjunt, combinant eines analògiques i digitals.

Aquesta fase inclou:

- Modelatge CAD de les peces,
- Definició d'acoblaments i assemblatge del conjunt,
- Especificació de toleràncies dimensionals i geomètriques,
- Aplicació d'ajustos i acabats superficials segons normatives UNE,
- Disseny paramètric mitjançant fulls de càlcul,
- Preparació de prototips físics mitjançant impressió 3D.

Tot i l'ús intensiu d'eines digitals, el procés es manté intencionadament low-tech en les fases inicials, garantint que les decisions de disseny

siguin resultat del criteri de l'estudiant i no d'una automatització prematura.

3.3. Fase 3. Testeig, validació i reflexió crítica

La tercera fase correspon al testeig i avaluació del disseny, on els estudiants validen el funcionament del conjunt i revisen críticament les decisions preses durant el procés.

Aquesta fase inclou:

- Simulacions computacionals del comportament mecànic (anàlisi estàtica, fatiga, optimització dimensional),
- Verificació de la cinemàtica i dinàmica del conjunt,
- Anàlisi de possibles errors funcionals o constructius,
- Revisió del muntatge i de les posicions alternatives de peces mòbils,
- Elaboració de vídeos i animacions del funcionament,
- Reflexió crítica final recollida a la memòria tècnica.

El testeig permet als estudiants entendre el disseny com un procés iteratiu, on l'error esdevé una eina d'aprenentatge i millora.

3.4. Aprenentatge corporitzat dins un entorn digitalitzat

Tot i l'alt grau de digitalització del projecte, l'estructuració en aquestes tres fases garanteix que l'estudiant mantingui un contacte corporal i cognitiu directe amb el mecanisme abans de delegar tasques a entorns automatitzats.

Aquest enfocament permet:

- Comprendre la cinemàtica abans de simular-la,
- Justificar toleràncies abans de definir-les digitalment,
- Detectar incoherències funcionals abans de l'automatització.

Així, l'aprenentatge corporitzat no substitueix l'ús de la tecnologia, sinó que el fonamenta i el reforça, assegurant una integració crítica i responsable de les eines digitals i de la IA.

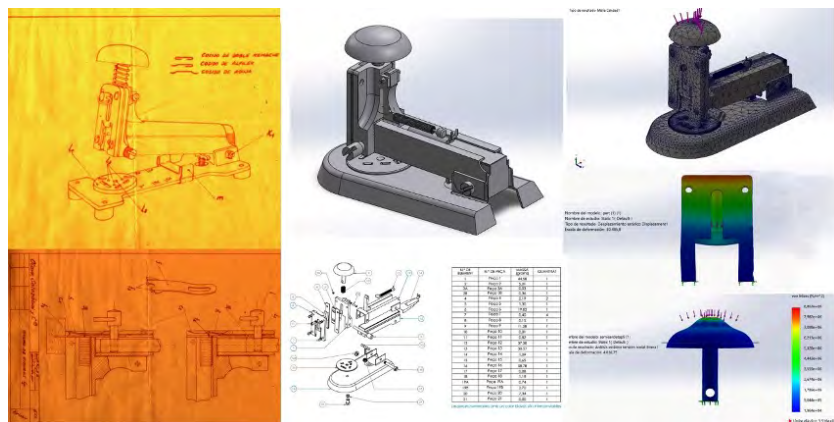


Figura 2. Exemples de prototips low-tech realitzats pels estudiants de l'AEGDM.

4. Avaluació i resultats

L'avaluació es va dur a terme mitjançant un qüestionari final amb preguntes quantitatives (escala Likert) i qualitatives. Els resultats mostren:

- Una millora significativa en la percepció espacial,
- Una major seguretat en la presa de decisions tècniques,
- Una millor comprensió del procés global de disseny mecànic.

Les respostes obertes indiquen que la combinació de croquis, modelatge, simulació i documentació va facilitar una visió integrada del projecte, més propera a la pràctica professional real.

Grup	Nº estudiants	Col·laboració	Percepció espacial	Pensament crític / presa de decisions
G1	3	4,6	4,4	4,3
G2	3	4,5	4,3	4,2
G3	4	4,7	4,6	4,5
G4	3	4,4	4,2	4,1
G5	4	4,6	4,5	4,4
G6	3	4,3	4,1	4,0
G7	4	4,8	4,6	4,6
G8	3	4,5	4,4	4,3
G9	4	4,7	4,6	4,5
G10	3	4,4	4,2	4,1
Mitjana global	34	4,55	4,39	4,29

Taula 1. Resultats del qüestionari final per grup (escala Likert 1–5).

Els resultats quantitatius mostren puntuacions elevades en tots els indicadors analitzats, amb una mitjana global superior a 4 en una escala de 1 a 5. Destaquen especialment els valors associats a la col·laboració i a la percepció espacial, aspectes directament vinculats al treball en equip i a les fases d'ideació i prototipat del projecte. El pensament crític i la presa de decisions tècniques també presenten valors alts, fet que indica una millora en la capacitat dels estudiants per justificar i validar les seves decisions de disseny.

5. Discussió

El projecte AEGDM pot entendre's com un llinar pedagògic abans de la incorporació plena d'eines d'IA generativa i automatització del disseny. Abans de delegar decisions a sistemes algorítmics, els estudiants han d'haver desenvolupat criteri propi, capacitat d'anàlisi i responsabilitat tècnica.

Lluny d'oposar-se a la digitalització, aquest enfocament prepara els estudiants per utilitzar-la de manera crítica, conscient i professional.

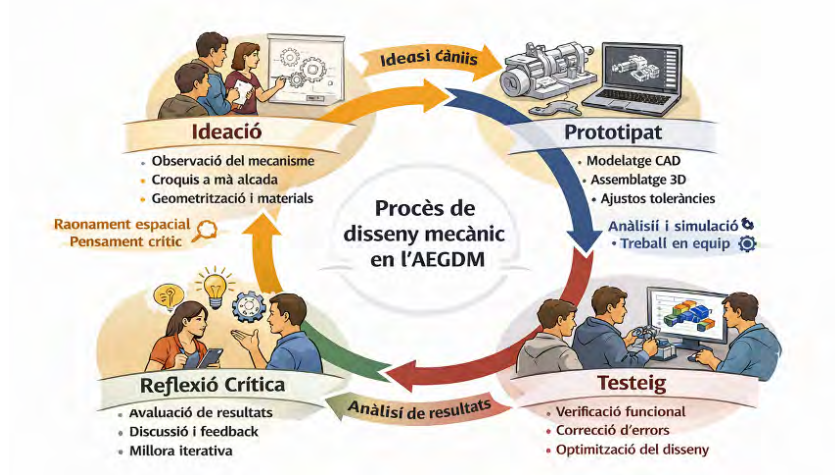


Figura 3. Representació del procés pedagògic iteratiu del projecte AEGDM: ideació → prototipat → testeig → reflexió crítica.

6. Conclusions

L'estudi demostra que el projecte d'Ampliació d'Expressió Gràfica constitueix un pont pedagògic efectiu entre teoria i pràctica en la formació d'enginyeria mecànica. La integració d'aprenentatge corporitzat, humanics i eines digitals avançades permet formar

enginyers capaços d'afrontar entorns tecnològics complexos sense perdre el criteri humà.

En l'era de la intel·ligència artificial, aquest tipus de projectes no només són rellevants, sinó necessaris.

Referències

- Aoun, J. E. (2017). *Robot-proof: Higher education in the age of artificial intelligence*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11456.001.0001>
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Boden, M. A., et al. (2019). AI ethics. *AI Magazine*, 40(2), 7–15.
- Bower, M., et al. (2017). Augmented reality in education. *Educational Technology & Society*, 20(2), 1–15.
- Dewey, J. (1938). *Experience and education*. Macmillan.
- Dym, C. L., et al. (2005). Engineering design thinking. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 103–120. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00832.x>
- Goldschmidt, G. (2014). Linkography. *Design Studies*, 35(6), 571–588. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9455.001.0001>
- Johnson-Glenberg, M. C., et al. (2014). Embodied games. *Educational Psychology Review*, 26, 403–428.
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning*. Prentice Hall.
- Lampropoulos, G., et al. (2025). Virtual reality in engineering education: A scoping review. *Education Sciences*, 15(8), 1027. <https://doi.org/10.3390/educsci15081027>
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2019). Immersive VR and learning. *Educational Psychology Review*, 31, 791–820.
- Markauskaite, L., et al. (2022). AI and human capabilities. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 3, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100070>
- Oxman, R. (2017). *Design at the intersection of digital and physical*. Routledge.

- Prince, M., & Felder, R. (2006). Inductive teaching and learning methods. *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123–138.
<https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>
- Radianti, J., et al. (2020). A systematic review of immersive VR. *Computers & Education*, 147, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
- Sheppard, S. D., et al. (2009). *Educating engineers*. Jossey-Bass.
- Sorby, S. A., et al. (2013). Spatial skills in engineering. *Engineering Design Graphics Journal*, 77(3), 22–35.
- UNESCO (2023). *Guidance on generative AI in education*. UNESCO Publishing.
- Varela, F., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind*. MIT Press.
<https://doi.org/10.7551/mitpress/6730.001.0001>
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>

Emocions i aprenentatge: l'impacte de l'ansietat a l'adolescència

Sònia Buj Cussó

Màster universitari en Formació del Professorat d'Educació Secundària
Obligatòria i Batxillerat, Formació Professional i Ensenyament
d'Idiomes

Oscar Farrerons Vidal

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resum

Aquest article presenta una fonamentació teòrica orientada a facilitar la comprensió del procés d'aprenentatge i del paper que hi juguen les emocions, amb una atenció especial a l'ansietat. L'anàlisi se centra principalment en l'etapa de l'adolescència, tenint en compte el moment biològic i maduratiu del cervell, encara que els plantejaments desenvolupats tenen rellevància més enllà d'aquesta etapa. L'objectiu final és comprendre com l'ansietat i l'estrès interfereixen en el procés d'aprenentatge, així com posar en relleu la necessitat de reduir-los als entorns educatius per afavorir un clima més segur i propici per aprendre, i contribuir d'aquesta manera al benestar i desenvolupament integral de les persones.

Abstract

This article presents a theoretical framework designed to facilitate the understanding of the learning process and the role of emotions within it, with a particular focus on anxiety. The analysis primarily addresses adolescence, considering the biological and maturational stage of the brain, although the concepts discussed are relevant beyond this period. The ultimate aim is to understand how anxiety and stress interfere with learning and to emphasize the importance of reducing them in educational settings to foster a safer and more supportive learning environment. In doing so, it contributes to the well-being and holistic development of individuals.

1. Educació i emocions

L'educació és un procés de transformació que va més enllà de la transmissió de coneixements. Segons David Bueno, «educar vol dir canviar el cervell dels altres» (Bueno, 2017), modulant d'aquesta manera les connexions neurals que sustenten els processos d'aprenentatge i la memòria. En aquesta mateixa línia, Marina Garcés, a *Escola d'aprenents*, assenyala que «educar és aprendre a viure junts i aprendre junts a viure. [...] assumint que l'existència dels altres, allò que ja són i allò que encara podrien ser, queda, en part, en mans dels qui els eduquen» (Garcés, 2020), posant en relleu la dimensió social i col·lectiva del procés educatiu.

En aquest marc, les emocions tenen un paper fonamental. Estudis en neuroeducació han mostrat que els aprenentatges vinculats a experiències emocionals tenen més probabilitats de consolidar-se i de ser recordats, ja que les emocions actuen com a catalitzadors de l'atenció i la memòria. Així, quan una persona se sent reconeguda i valorada, l'aprenentatge esdevé més significatiu.

Ara bé, aquest procés també pot veure's condicionat per factors que interfereixen en el rendiment acadèmic. Un d'ells és l'ansietat. Quan una persona pateix ansietat, aquesta interfereix directament en processos cognitius bàsics com l'atenció, la memòria de treball i la capacitat de presa de decisions (Pascoe et al., 2020). En situacions de tensió elevada, el cervell activa circuits que prioritzen la detecció de possibles amenaces en detriment de la concentració en tasques acadèmiques. Això pot derivar en dificultats per retenir informació, participar a classe o mantenir la motivació.

2. Fonamentació teòrica

2.1. El funcionament del cervell humà

Per tal d'entendre el procés d'aprenentatge és fonamental conèixer el funcionament del cervell. Aquest òrgan constitueix el centre de control de l'organisme i és responsable de funcions essencials com pensar, sentir, recordar i actuar. Està integrat principalment per neurones, les cèl·lules encarregades de transmetre informació, i per cèl·lules glijals, que exerceixen tasques de suport i manteniment. Quan es produeix un nou aprenentatge, les connexions entre neurones es reforcen o se'n generen de noves, fenomen conegut com a plasticitat cerebral.

Tot i la seva complexitat, és possible identificar-ne algunes parts principals i les seves funcions específiques: el lòbul (o escorça) frontal està relacionat amb la planificació, la presa de decisions, el llenguatge i el control del moviment; el lòbul parietal integra la informació sensorial, com el tacte o la percepció de l'espai; el lòbul temporal juga un paper destacat en la memòria i en el processament del llenguatge i dels sons; i el lòbul occipital és l'àrea encarregada de processar la informació visual (Bear, 2016).

A més de l'es corça cerebral, altres estructures internes resulten igualment essencials: l'hipocamp participa en la memòria i l'aprenentatge; l'amígdala regula les emocions i influeix en la manera com es recorden les experiències; el cerebel s'ocupa de la coordinació i l'equilibri; i el tronc de l'encèfal regula funcions vitals bàsiques, com la respiració o el ritme cardíac.

El cervell pot ser entès com una xarxa de regions interconnectades que treballen conjuntament. L'educació, en aquest context, n'aprofita la capacitat de canvi, la plasticitat, per afavorir la generació de nous coneixements i habilitats.

2.2. El paper de les emocions

El procés d'aprenentatge està fortament vinculat a les emocions i la motivació. Lluny de ser un element secundari, les emocions constitueixen una peça clau del mateix mecanisme que permet retenir informació, prendre decisions i actuar. Quan un estímul desperta una resposta emocional, el cervell li atorga prioritat: en capta l'atenció, en facilita la memòria i condiona la conducta.

Les emocions poden definir-se com a patrons de resposta automàtics i universals que s'activen davant d'un canvi rellevant en l'entorn, sigui percebut com una amenaça o com una oportunitat. Aquestes respostes inclouen components fisiològics, com l'augment de la freqüència cardíaca, conductuals, com les expressions facials o els gestos; i cognitius, com l'atenció focalitzada. Des del punt de vista evolutiu, han estat essencials per a la supervivència, ja que preparen l'organisme per actuar amb rapidesa i eficàcia davant de situacions perilloses o que ofereixen un benefici per a la supervivència. Per exemple, la por davant d'un depredador desencadena respostes immediates de fugida o defensa, mentre que les emocions positives, com l'alegria associada a la cooperació o el plaer de compartir aliments, reforcen els vincles socials i afavoreixen la supervivència del grup.

Tradicionalment, es distingeixen les següents emocions bàsiques: por, ira, alegria, tristesa, fàstic i sorpresa, compartides entre cultures i presents en altres espècies. A partir d'aquestes se'n desenvolupen de més complexes, com la culpa, la vergonya o l'orgull, que depenen de la maduració cognitiva i de la interacció social (Ekman, 1999). Una altra classificació rellevant és la que diferencia entre emocions positives, com l'alegria i l'entusiasme, que afavoreixen la motivació i l'aprenentatge, i emocions negatives, com la por o l'ansietat, que poden ser adaptatives en petites dosis, però resulten perjudicials quan es mantenen en excés. En conjunt, totes les emocions compleixen una

funció adaptativa: orientar l'atenció cap al que és rellevant en cada moment.

En l'arquitectura cerebral, una de les estructures més rellevants en la gestió emocional és l'amígdala. Des del punt de vista evolutiu, l'amígdala s'ha mantingut gairebé intacta perquè compleix funcions essencials per a la supervivència: detectar possibles amenaces, generar respostes ràpides i automàtiques i assignar valor emocional als estímuls. Està estretament connectada amb regions com l'hipocamp i el tàlem, cosa que li permet influir tant en la memòria com en l'atenció. El seu caràcter primitiu explica que les emocions puguin aparèixer de manera immediata i intensa, fins i tot abans que esdevinguin conscients, i que posteriorment siguin modulades per zones més reflexives com el còrtex prefrontal.

Quan l'amígdala detecta un estímul significatiu, envia senyals a l'hipocamp, que consolida aquesta informació en la memòria a llarg termini. Això explica per què les experiències carregades d'emoció queden més fixades que les neutres. L'amígdala, però, no actua de manera aïllada: manté un diàleg constant amb el còrtex prefrontal, la regió encarregada de regular i valorar les respostes emocionals de manera més reflexiva. Aquesta interacció permet que una emoció inicialment impulsiva pugui reconduir-se i transformar-se en una resposta més adequada al context. En l'àmbit educatiu, això implica que els aprenentatges associats a emocions positives, com l'interès o la motivació, tendeixen a consolidar-se amb més força, mentre que els vinculats a emocions negatives intenses, com la por, l'estrès sostingut o l'ansietat, poden bloquejar la memòria o quedar associats a records desagradables.

La recerca en neurociència posa de manifest que les emocions orienten l'atenció, un recurs limitat. El cervell no pot processar-ho tot alhora i ha de seleccionar on dirigir els seus recursos. Segons

Francisco Mora, l'atenció funciona com un focus de llum: allò que queda dins el feix es processa amb claredat, mentre que la resta es difumina (Mora, 2017). Quan una tasca desperta interès o motivació, l'activació emocional manté l'atenció i facilita una codificació més eficient. En canvi, un excés d'estrès concentra l'atenció en l'amenaça percebuda, reduint la capacitat d'aprenentatge, mentre que la manca d'activació emocional afavoreix la dispersió i la dificultat per mantenir la concentració.

En síntesi, les emocions actuen com a motor de l'atenció, la memòria i la conducta. No hi ha aprenentatge profund sense implicació emocional, ja que és a través de l'emoció que el cervell decideix què és rellevant i ho consolida en forma de record. Les emocions positives afavoreixen la plasticitat neural i generen connexions més sòlides, mentre que l'ansietat i la por interfereixen en aquests processos i limiten la capacitat de reflexió.

2.3. El procés d'aprenentatge

«Naixem amb un cervell diferenciat, però amb moltes similituds amb altres humans, i són les nostres experiències individuals i les circumstàncies de la vida les que van modulant la nostra estructura i funcionalitat cerebral».

(Beatriz Fagundo, sobre els resultats dels estudis neurocientífics sobre la individualitat del cervell liderats per Lutz Jäncke)
(Facundo, 2022).

El procés d'aprenentatge no consisteix únicament a acumular coneixements, sinó a modificar el cervell a través de la plasticitat neuronal. Cada experiència reforça o crea connexions noves, fet que explica la singularitat de cada cervell, determinada per la interacció entre la base genètica i l'entorn.

El desenvolupament cerebral estableix ritmes d'aprenentatge. Les finestres sensibles de la infància i, especialment, l'adolescència, etapa

marcada per la maduració prefrontal i la construcció de la identitat, fan d'aquest període un moment decisiu per a la consolidació d'hàbits i coneixements. S'ha de tenir en compte, també, que aprendre implica desaprendre, substituint connexions menys útils per rutes alternatives mitjançant la pràctica, la revisió de l'error i l'experiència.

L'adolescència és una etapa de grans canvis al cervell. Després de l'expansió de connexions pròpia de la infància, s'inicia un procés d'afinament: d'una banda, s'eliminen connexions poc útils; d'altra, es fa més ràpida i precisa la transmissió de la informació. El resultat és un cervell més eficient i amb millors connexions a llarga distància.

Aquest refinament és especialment intens al còrtex prefrontal, la zona encarregada de planificar, controlar els impulsos, prendre decisions i regular la conducta. Es tracta d'una de les darreres regions a madurar, i diversos estudis mostren que aquest procés pot allargar-se fins ben entrada la vintena. Això no vol dir que el cervell adolescent sigui immadur, sinó que es troba en una transició cap a mecanismes de control més estables.

Al mateix temps, els circuits emocionals i de recompensa, com l'amígdala, són molt actius des del començament de l'adolescència. Aquesta diferència de ritmes: un sistema emocional molt potent i uns mecanismes de control encara en desenvolupament, ajuda a explicar algunes conductes típiques de l'etapa: la recerca de novetats, la importància del grup d'iguals i el pes dels estímuls emocionals en les decisions.

Lluny de ser un problema, aquest desequilibri ofereix una finestra d'oportunitat. El cervell adolescent és altament plàstic i sensible a l'aprenentatge social: normes, rols, sentit de pertinença i hàbits que poden consolidar-se per molts anys. Per això, les experiències i els models que reben en aquesta etapa tenen un gran impacte en la identitat, els valors i la manera d'autoregular-se.

Cal recordar que cada cervell avança al seu ritme i que l'entorn hi té molta influència. Per això és important un clima emocional segur, que permeti al còrtex prefrontal anar guanyant pes sense apagar la curiositat i l'energia pròpies d'aquesta etapa. Amb un bon acompanyament, l'adolescència es pot convertir en una gran oportunitat educativa.

2.4. Aprenentatge i ansietat a l'adolescència

El cervell adolescent es troba en una etapa de gran plasticitat, però també de vulnerabilitat. Aquesta combinació el fa especialment sensible a les experiències emocionals que viu, tant dins com fora de l'aula. En aquest context, la por i l'ansietat adquireixen una rellevància especial, ja que poden condicionar de manera decisiva la forma com els joves aprenen i interactuen amb el seu entorn.

La por constitueix una resposta immediata davant d'un perill concret, mentre que l'ansietat té un caràcter més difús i anticipatori (Farré, 2014) que presenta un estat d'inquietud davant la percepció d'una amenaça futura. Es manifesta en pensaments anticipatoris i en símptomes fisiològics, com tensió muscular o alteració del ritme cardíac. En nivells moderats pot ser adaptativa, ja que prepara per afrontar reptes, però quan és intensa o persistent interfereix en processos clau per a l'aprenentatge, com l'atenció, la memòria o la presa de decisions, afavorint bloquejos i dificultats acadèmiques.

Ambdues comparteixen un mateix circuit cerebral: l'amígdala, que detecta l'amenaça i activa patrons automàtics d'alerta i defensa. Aquest mecanisme, fonamental per a la supervivència, esdevé un obstacle quan s'activa en situacions acadèmiques o socials que no impliquen un risc vital: el cervell prioritza la supervivència per damunt de la reflexió i el procés d'aprenentatge queda compromès.

Quan l'amígdala s'activa, l'hipocamp, el responsable de la consolidació de la memòria, veu alterada la seva funció a causa de l'excés de

cortisol, l'hormona de l'estrès. Alhora, el còrtex prefrontal, encarregat del control executiu i de la presa de decisions, redueix la seva eficàcia.

La recerca ha confirmat que un nivell moderat d'ansietat pot tenir un efecte activador i millorar el rendiment. És el que descriu la llei de Yerkes-Dodson: existeix un punt d'activació que potencia l'aprenentatge, però quan aquest llindar se supera, es produeix el fenomen contrari: un bloqueig cognitiu.

En el cas de l'estrès crònic, els efectes són encara més preocupants. L'exposició prolongada al cortisol altera l'equilibri neuroquímic i pot modificar de manera persistent les connexions neuronals, especialment en infants i adolescents. Estudis recents assenyalen que aquest procés pot deixar una empremta en l'amígdala i en el còrtex prefrontal, afavorint dificultats en la regulació emocional i en l'autoestima, així com una major predisposició a reaccions agressives en l'edat adulta.

En l'àmbit educatiu, les conseqüències són evidents: aprendre sota la por o l'ansietat condueix a aprenentatges superficials i fràgils, sovint associats a experiències negatives amb el coneixement. Per contra, quan l'aprenentatge es vincula a emocions positives com la curiositat, el cervell ho interpreta com a valuós i ho consolida amb més solidesa. Així, els models educatius basats en amenaces poden oferir resultats immediats, però comprometen la motivació intrínseca i el desig d'aprendre a llarg termini. En canvi, aquells que fomenten un clima segur, amb retroaccions constructives i l'error entès com a oportunitat, promouen aprenentatges més profunds i duradors.

En síntesi, la por i l'ansietat són respostes adaptatives necessàries per a la supervivència, però quan es traslladen sense control a l'entorn acadèmic, i a la vida en general, esdevenen un dels principals obstacles per a l'aprenentatge. La clau no consisteix a eliminar-les, sinó a regular-les i canalitzar-les perquè no bloquegin els processos

cognitius essencials i perquè l'energia emocional que generen pugui transformar-se en un motor equilibrat al servei de l'aprenentatge. D'aquesta manera, l'educació no només garanteix la transmissió de coneixements i la preparació professional, sinó que contribueix també a la formació integral de les persones, ajudant-les a créixer amb més seguretat, autonomia i capacitat de gestionar les seves emocions.

2.5. La figura del neuroeducador

La figura del neuroeducador (Mora, 2022) ha emergit en els darrers anys com una resposta a la necessitat de traduir els avenços en neurociència cap a la pràctica educativa. El seu paper no consisteix a substituir la tasca docent ni a assumir funcions clíniques, sinó a actuar com a pont entre la recerca científica i l'aula, aportant coneixements que permetin entendre millor com aprèn el cervell i com es poden optimitzar els processos d'ensenyament-aprenentatge.

Aquest perfil professional es fonamenta en una mirada interdisciplinària que integra neurociència, psicologia i pedagogia, amb l'objectiu d'oferir als docents estratègies fonamentades. En paraules de Mora, l'educació només es pot comprendre en tota la seva profunditat quan es coneix el cervell, ja que «només s'aprèn allò que s'estima» (Mora, 2013), destacant així la importància d'aplicar els coneixements neurocientífics a la realitat escolar.

Així, el neuroeducador esdevé una figura clau per connectar teoria i pràctica, ajudant a dissenyar entorns d'aprenentatge que respectin els ritmes de maduració cerebral, potenciïn l'atenció i la motivació, i integrin les emocions com a motor fonamental de l'aprenentatge. Tot i ser una professió encara en construcció i pendent de consolidació institucional, representa una aposta prometedora per fer que l'educació avanci d'acord amb el coneixement científic actual.

Referències

- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M.A. (2016). *Neurociencia: La exploración del cerebro* (4ª ed.). Wolters Kluwer.
- Bueno i Torrens, D. (2017). Neurociència per a educadors. Rosa Sensat.
- Ekman, P. (1999). Basic Emotions. T. Dalgleish & M. Power (Eds.). *Handbook of Cognition and Emotion*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470013494.ch3>
- Fagundo Morales, B., & Pedreira Álvarez, M. (2022). *Diàlegs entre educació i neurociència*. Eumo Editorial.
- Farré, J.M, Mestre G., & Mallorquí, N. (2014). El paisaje de las sensaciones. Las emociones. En J.M. Farré, R. Gómez & L. Salvador-Carulla (Eds.). *La aventura del cerebro. Viajando por la mente*. Barcelona: Singlantana.
- Farrerons, Ó., & Olmedo, N. (2016). *Las TIC y la ingeniería gráfica*. Editorial OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.306>
- Garcés, M. (2020). *Escola d'aprenents*. Galàxia Gutenberg.
- Mora, F. (2017). *Neuroeducación: Sólo se puede aprender aquello que se ama*. Alianza Editorial.
- Mora, F. (2022). *Neuroeducador. Una nueva profesión*. Madrid: Alianza Editorial.
- Pascoe, M. C., Hetrick, S.E., & Parker, A.G. (2020). The impact of stress on students in secondary school and higher education. *International Journal of Adolescence and Youth*, 25(1), 104-112. <https://doi.org/10.1080/02673843.2019.1596823>

Producción científica orientada a políticas de reducción de CO₂ basada en redes de cooperación

Juan C. Marcillo-Delgado

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

J. Tatiana Hidrobo-Morales

Sant Cugat Escola Superior de Negocis. Departament de Recerca

Resumen

La existencia de redes de cooperación para reducir los niveles de CO₂ en la atmósfera y mitigar sus efectos es clave para alcanzar la meta 2050, al aportar enfoques científicos, técnicos y prácticos de gestión. Este estudio tiene como objetivo mapear la producción científica sobre redes orientadas a la reducción de la huella de carbono mediante un análisis bibliométrico de 52 publicaciones. Los resultados muestran que la producción científica sobre redes para la reducción del CO₂ están centradas mayormente en las políticas para la reducción de CO₂ en diferentes sistemas, especialmente las vinculadas con la energía y la electricidad. En términos de impacto, el secuestro de CO₂ destaca como el tema con mayor promedio de citas. El análisis de coocurrencias de palabras clave evidenció cinco ámbitos clave donde aportan las redes de cooperación: reducción de CO₂ en el sector industrial, consumo responsable de los recursos naturales, valoración ambiental y secuestro de CO₂ en atmósfera, impuestos de carbono y optimización del consumo eléctrico y energético. Se concluye que las redes de cooperación desempeñan un papel central en la articulación de estrategias de reducción de los niveles de CO₂ en la atmósfera y a los objetivos climáticos de 2050.

Palabras clave: Huella de carbono, Redes de cooperación, Análisis bibliométrico, Reducción.

Abstract

The existence of cooperation networks aimed at reducing atmospheric CO₂ levels and mitigating their effects is essential to achieving the 2050 climate target, as they provide scientific, technical, and practical management approaches. This study aims to map the scientific production on networks oriented toward carbon footprint reduction through a bibliometric analysis of 52 publications. The results indicate that research on carbon reduction networks is primarily focused on policies for CO₂ reduction across different systems, particularly those related to energy and electricity. In terms of scientific impact, CO₂ sequestration emerges as the topic with the highest average number of citations. Keyword co-occurrence analysis identifies five main domains in which cooperation networks contribute: CO₂ reduction in the industrial sector, responsible consumption of natural resources, environmental assessment and atmospheric CO₂ sequestration, carbon taxation, and optimization of electricity and energy consumption. The study concludes that cooperation networks play a central role in articulating integrated strategies for reducing atmospheric CO₂ levels and supporting the achievement of the 2050 climate objectives.

Keywords: Carbon footprint; Cooperation networks; Bibliometric analysis; Reduction

1. Introducció

La reducció de les emissions de CO₂ al 2050 és un objectiu polític que promueu el ús racional de energies renovables i que demanda no només la implicació d'organismes internacionals com la Organització de Nacions Unides (ONU), sinó també de la societat, els governs, les universitats i les empreses en general. Sarkheil et al. (2025) mencionen que la mitigació del canvi climàtic i la reducció de les emissions de carboni constitueixen una agenda política imperativa per a les societats i els governs del segle XXI.

Cheon i Ahn (2025) mencionen que acords internacionals com la Convenció Marco de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic, el Protocol de Kioto, l'Acord de París i les directrius del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic enfatitzen la

reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Siendo una de las principales metas para el 2050 que todos los países se comprometen a reducir sus emisiones y así contribuir a un planeta más sostenible y que atienda a las necesidades de las futuras generaciones.

Así, tanto gobiernos locales, nacionales como regionales han comenzado a crear políticas para reducir sus emisiones de CO₂, y generar capacidad de evaluación de estas políticas (Fitzmaurice et al., 2022). Estas políticas de reducción de CO₂ han demandado una serie de transformaciones en sectores como el económico, el energético y el alimenticio (Xia & Yan, 2022). Estrategias de consenso global como *carbono cero* propuesta en el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) propuesta, aparecen como soluciones alternativas que buscan disminuir los efectos del cambio climático (Xia & Yan, 2022).

El informe del IPCC destacó la necesidad de un cambio urgente y transformador si se pretendía limitar el calentamiento global a un 80% menos de emisiones para el año 2050, lo cual representa un enorme desafío en temas como: tecnología, ingeniería, político y social para los próximos 30 años (Greg Marsden, 2020). Egerer et al. (2016) evidenciaron que las estrategias individuales de medición y reducción de CO₂ por sí solas son insuficientes para la planificación y consecución de estrategias a largo plazo como la meta 2050. En esta línea, es necesario la existencia de redes que planteen varios escenarios y estrategias para mitigar esta problemática desde una perspectiva integral y sistémica.

Estas redes aportan perspectivas científicas, técnicas y prácticas para frenar en conjunto este problema que aqueja el mundo. Sin embargo, su mapeo es mínimo en la actualidad. Mapear el trabajo de las redes de sostenibilidad para la reducción de CO₂ permite visibilizar las

políticas y estrategias que ya han sido implementadas, validadas y retroalimentadas y valorar su eficacia en diferentes contextos.

El objetivo del presente estudio es mapear los estudios asociados a redes de reducción de la huella de carbono desde una perspectiva bibliométrica. Este estudio pone en valor el trabajo realizado por estas redes, detecta tendencias emergentes, visibiliza cuáles son las áreas de investigación que son de mayor interés para la comunidad científica y sirve de referencia y ofrece un instrumento de apoyo para el diseño de políticas públicas, estrategias institucionales y futuras investigaciones orientadas al cumplimiento de los objetivos climáticos establecidos para 2050.

2. Materiales y métodos

Para el presente estudio se seleccionó la base de datos de Web of Sciences debido a que contiene artículos de alto impacto JCR. La búsqueda se centró en el Abstract de las publicaciones debido a que es un apartado equilibrado que resume lo realizado en el estudio. La búsqueda incluyó los siguientes términos separados por el tag AND que denota intersección: *network AND (footprint OR carbon OR CO₂) AND reduction AND (organization* OR international) AND policy*. Esta búsqueda tuvo por objetivo encontrar literatura sobre redes organizativas orientadas a las políticas de reducción del CO₂.

Esta búsqueda dio un total de 114 publicaciones. Después de una revisión detallada de los mismos se optó por trabajar con 52 artículos que eran los que cumplían con los objetivos del estudio.

Para alcanzar los objetivos planteados se optó por realizar un análisis de coocurrencias de palabras clave siguiendo con el método *Visualization of Similarities* (VOS) (Hidrobo-Morales et al., 2025; Marcillo-Delgado, 2023; Marcillo-Delgado et al., 2023). Para este efecto se consideró el análisis ALL KEYWORDS (all keywords y

keywords plus). Adicionalmente se utilizó la opción thesaurus para homologar palabras sinónimas.

3. Resultados y discusiones

La Figura 1 muestra una red de coocurrencias de palabras clave para los 52 papers asociados al tema de las redes orientadas a la reducción de CO₂. Cada nodo representa una palabra clave, mientras más grande es el nodo más relevante es esa palabra en el estudio. Las líneas o vínculos representan conexiones entre palabras, mientras más gruesa son las líneas, más fuertes son las relaciones entre palabras.

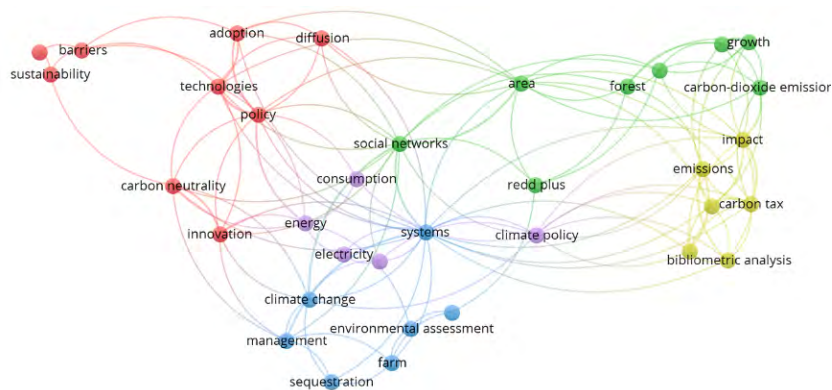


Figura 1. Análisis de coocurrencias de palabras clave.

Los indicadores bibliométricos revelaron que el tema con mayor coocurrencia a nivel de vínculos y fortaleza de los vínculos fue el análisis de sistemas, apareciendo como un componente determinante e integrador a la hora de analizar las redes orientadas a la reducción de CO₂ (foco de este estudio). Las palabras con más ocurrencias fueron: *sistemas*, *políticas* y *energía*, resaltando la importancia de las

políticas para la reducción de CO₂, especialmente las vinculadas con la energía y en diferentes sistemas.

Dentro de los temas con mayor promedio en citas resalta la palabra clave *secuestro*, que hace referencia a la captura y almacenamiento de CO₂ para evitar que llegue a la atmósfera y contribuir a las políticas de reducción de la contaminación de CO₂. En segundo lugar, resalta la palabra *área*, la cual es muy estratégica para conocer las unidades de análisis de los diferentes estudios como: áreas de tecnología, áreas de crecimiento, áreas de contaminación, áreas políticas; y áreas de difusión. En tercer lugar, destacan el CO₂ como centro de estudio, los *sistemas*; el *impacto* de lo analizado, la *agricultura* como un sector vulnerable sobre el que se hace mucha investigación, y las políticas climáticas. A continuación, se presentan en detalle los factores más importantes ligados a la investigación de redes para la reducción de CO₂.

3.1. Clúster rojo: reducción de CO2 en el sector industrial

El clúster rojo está ligado con el sector industrial y la meta 2050 de neutralidad de carbono. Bajo este enfoque, se visibilizaron temas como las barreras y políticas industriales de adopción y difusión de tecnologías de innovación sostenible. Los términos que conforman este clúster son: *Adoption, barriers, carbon neutrality, construction industry, diffusion, innovation, policy, sustainability, technologies*.

Tassou (2018) afirma que el sector industrial es responsable del 33% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Las empresas nacionales e internacionales hoy en día buscan mejorar el desarrollo de una economía baja en carbono, pero se enfrentan a una mayor presión para el ahorro energético y reducir las emisiones de CO₂. En esta línea, la creación de sistemas de gestión del rendimiento energético, las finanzas verdes, las evaluaciones ambientales, sociales

y de gobernanzas son aspectos clave para la reducción de las emisiones de carbono empresarial (Que, 2023).

Muchos autores consideran que obtener certificaciones de carbono cero es imposible bajo las condiciones actuales, lo cual genera desconfianza, especialmente por casos de afirmaciones dudosas. Un ejemplo de cero neto real es Coopedota, la primera organización a nivel mundial en lograr la certificación de carbono cero utilizando un estándar internacional reconocido (Birkenberg & Birner, 2018). Esta certificación se basa en una Especificación Públicamente Disponible (EPD) 2060 y está basada en un Análisis del Ciclo de Vida del Producto (CVP) donde los factores sociales, políticos e institucionales jugaron un rol fundamental para impulsar esta certificación. Así, para avanzar en temas de carbono cero en empresas es necesario innovar significativamente en los enfoques tecnológicos de todas las etapas de la cadena de valor, adoptando una visión holística que incluye interacciones tanto interna como externa de las organizaciones, gobiernos y países.

3.2. Clúster verde: consumo responsable de los recursos naturales

Este clúster está altamente vinculado con la protección de los bosques y la naturaleza. Aquí se destaca a *redd plus* que es un mecanismo internacional para reducir emisiones de CO₂ mediante la protección y gestión sostenible de los bosques. Este clúster se relaciona con terminologías como comercio que tiene que ver con el comercio de productos naturales cosechados de forma responsable como los bosques. Además, se destaca el uso de redes sociales para promover la protección de la naturaleza y concientizar sobre los efectos de la contaminación y la preservación de los recursos naturales. Este clúster se relaciona con palabras como: *area; carbon-dioxide emissions; forest; growth; pollution; redd plus; social networks; trade.*

Xia y Yan (2022) sostienen que la implementación de políticas de control de las emisiones de CO₂ podrían contribuir a reducir significativamente el riesgo de escasez de recursos naturales, aportando beneficios en economías de bajos y altos recursos económicos. El desarrollo de una cartera tecnológica que cree un mapeo de rutas empresariales y de infraestructuras y tecnológicas bien planificadas y sólidas para su implementación permitirían logrando frenar la emisión de gases sería de gran aporte.

La escasez de recursos, la escasez de capital humano capacitado, los desafíos administrativos, las restricciones políticas, los desafíos operativos y los impactos ambientales limitan el control de la emisión de CO₂ (Ibne Bashir, 2022). En esta línea, es importante que se planteen soluciones acordes y adaptadas a las necesidades locales donde se incluya campañas de concientización y estrategias para contar con una infraestructura adecuada para frenar las emisiones de gases (Mondal & Suman, 2025).

Las emisiones de CO₂ podrían reducirse a través de la modernización de toda la estructura industrial siendo efectiva en países o regiones que se basan en recursos naturales. Sin embargo, la dependencia de estos recursos juega un papel moderador en la reducción del CO₂, teniendo como efecto indirecto una mejor posición de países que no dependen de los recursos naturales desde la perspectiva económica, administrativa, geográfica y de disminución de las emisiones de CO₂ (Liu et al., 2025).

A nivel de comercio, la red intermodal logística global afirma que es posible la reducción del CO₂ hasta un 87% a través de una correcta innovación tecnológica (Wang et al., 2019). Xu et al. (2024) mencionan que la innovación tecnológica reduce directamente la huella de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética de los centros

de datos, la optimización de los procesos de producción y la gestión de recursos en tiempo real.

3.3. Clúster azul: valoración medioambiental del gas efecto invernadero y secuestro del CO₂

El clúster azul trata temas ligados a la valoración medioambiental de los gases efecto invernadero, el secuestro de carbono, y la gestión de sistemas medioambientales. Se vincula con las palabras clave: *climate change; environmental assessment; farm; ghg emissions; management; sequestration; systems*. Además, que dentro de los sistemas ambientales resalta el agrícola como uno de los más vulnerables al tema del cambio climático.

El principal objetivo de las redes que pretenden frenar las emisiones de CO₂ es identificar y desarrollar estrategias que capturen el carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero, a través de una base científica mediante posibles programas de crédito y comercialización de carbono que son utilizadas para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero logrando así mejorar la calidad ambiental y la sostenibilidad del planeta (Jawson et al., 2005)

Zheng et al. (2021) sostienen que las acciones científicas y adecuadas para la reducción de CO₂ permiten a los gobiernos establecer objetivos de reducción de emisiones para ciudades o regiones, buscando mitigar estas emisiones desde una perspectiva integral en función de su propio nivel de desarrollo. Según Jürgen-Friedrich et al. (2009) aquellas entidades que adoptaron o midieron sus emisiones de CO₂ durante más tiempo (2010-2020) o se plantearon alcanzar el cero neto en referencia de las que no lo hicieron, generaron más prácticas de gestión de reducción de CO₂ y redujeron significativamente la emisión de gases.

3.4. Clúster amarillo: impuestos a las emisiones de CO₂

El clúster Amarillo está relacionado con lo concerniente a *emisiones de CO₂, impuestos de carbono e impacto de tasas de CO₂*. Aquí resalta el uso del análisis bibliométrico como herramienta para visibilizar el desarrollo de estas estrategias. Al respecto, Zhong et al. (2023) sostienen que los impuestos verdes favorecen de manera positiva a la reducción de emisiones tal y como lo afirma y lo hace de forma descendente imponiendo estas tasas a un nivel medio-alto, aplicando políticas locales que favorezcan esta estrategia.

Que (2023) muestra que los sistemas de gestión de compensación empresarial construyen un modelo de optimización y propone medidas para optimizar la compensación empresarial en el contexto del rendimiento ambiental social y de la gobernanza de la política económica empresarial internacional actual.

3.5. Clúster púrpura: modelos y políticas para la optimización y el consumo de electricidad y energías renovables

El clúster púrpura está relacionado directamente con *modelos y políticas climáticas sobre el consumo de electricidad y energías*. Dentro de las palabras claves están: *climate policy; consumption; electricity; energy; models*.

Sin lugar a dudas, el uso de herramientas de evaluación para planificar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es fundamental para convertir políticas en implementaciones prácticas para lograr este objetivo que no es solo local sino mundial (Lei et al., 2023). Así, existen herramientas novedosas como las propuestas por Chen et al. (2024) que permiten predecir las emisiones basándose en cuatro pasos: descomposición, reconstrucción, predicción e integración de comercios logrando ser más sostenibles y eficientes.

4. Conclusiones

Se concluye que las redes de cooperación desempeñan un papel central en la articulación de estrategias de reducción de los niveles de CO₂ en la atmósfera y a los objetivos climáticos de 2050. Los temas más relevantes desde el punto de vista de la producción científica sobre redes para la reducción del CO₂ son las políticas para la reducción de CO₂ en diferentes sistemas, especialmente las vinculadas con la energía. Mientras que, a nivel de citas, el tema más relevante es el referente al secuestro de CO₂ en la atmósfera.

Se observó mediante un mapeo bibliométrico que las redes cooperación para la reducción de las emisiones de CO₂ contribuyen, al menos, desde cinco perspectivas: a) reducción de CO₂ en el sector industrial; b) fomento del consumo responsable de los recursos naturales como bosques; c) valoración medioambiental y generación de propuestas para mitigar el gas efecto invernadero y secuestro del CO₂ de la atmósfera; d) planificación de impuestos a las emisiones de CO₂ y seguimiento de sus efectos; y e) modelos y políticas para la optimización del consumo de electricidad y energías renovables.

En resumen, el presente estudio sirve como instrumento de apoyo para fortalecer las políticas públicas orientadas al desarrollo de redes para la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de la meta 2050, así como base para ampliar las líneas de investigación sobre redes de descarbonización desde un enfoque más estructurado y sistemático.

Referencias

- Birkenberg, A., & Birner, R. (2018). The world's first carbon neutral coffee: Lessons on certification and innovation from a pioneer case in Costa Rica. *Journal of Cleaner Production*, 189, 485–501.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.226>

- Chen, J., Peng, D., Liu, Z., Wu, L., & Jiang, M. (2024). A Sustainable Model for Forecasting Carbon Emission Trading Prices. *Sustainability*, 16(19), 8324. <https://doi.org/10.3390/SU16198324>
- Cheon, J., & Ahn, Y. (2025). Advanced modeling of plastic recycling supply chain networks for emission reduction and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 499, 145231. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2025.145231>
- Egerer, J., Gerbaulet, C., & Lorenz, C. (2016). European electricity grid infrastructure expansion in a 2050 context. *Energy Journal*, 37(Special Issue 3), 101–124. <https://doi.org/10.5547/01956574.37.SI3.JEGE;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION>
- Fitzmaurice, H. L., Turner, A. J., Kim, J., Chan, K., Delaria, E. R., Newman, C. et al. (2022). Assessing vehicle fuel efficiency using a dense network of CO₂ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(6), 3891–3900. <https://doi.org/10.5194/ACP-22-3891-2022>
- Greg Marsden. (2020). Submission to the Department for Transport's. *Transport Decarbonisation Plan Consultation*. 2, 1–9.
- Hidrobo-Morales, J. T., Marcillo-Delgado, J. C., & García-Carrillo, A. (2025). Mapping of innovation as instrument for business enhancement: A bibliometric review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11(1), 100454. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100454>
- Ibne Bashir, M. O. (2022). Application Internet of Things (IoT) to calibrate with IMO 2050 Decarbonization Charters and Phase Out Greenhouse Gases from the Shipping Industry of Bangladesh. *Oceans Conference Record (IEEE)*. <https://doi.org/10.1109/OCEANSCHENNAI45887.2022.9775331>
- Jawson, M. D., Shafer, S. R., Franzluebbbers, A. J., Parkin, T. B., & Follett, R. F. (2005). GRACEnet: Greenhouse gas reduction through agricultural carbon enhancement network. *Soil and Tillage Research*, 83(1), 167–172. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2005.02.015>
- Jürgen-Friedrich, H., Hubert, H., Olga, S., & Jochen, S. (2009). CCS for Germany: Policy, R&D and demonstration activities. *Energy Procedia*, 1(1), 3917–3925. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2009.02.195>
- Lei, Q., Lau, S. S. Y., Fan, Y., Fu, I. C. S., Chan, J. T. Y., Tao, Y. et al. (2023). From Policy to Implementation—An Analytic Network Process (ANP)-Based Assessment Tool for Low Carbon Urban and Neighborhood Planning. *Buildings*, 13(2), 484. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13020484>

- Li, Y., Zhang, X., Li, Y., Wang, X., Xu, D., & Zhang, Y. (2023). Which industrial path contributed to CO₂ transfer and emissions slowing-down of China and the United States most in international trade? *Journal of Cleaner Production*, 413(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137429>
- Liu, Y., Ouyang, Q., & Lu, C. (2025). Exploring the effect of urban position of the inter-urban pollution transfer network on carbon emissions: Evidence from 276 cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 516, 145789. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2025.145789>
- Marcillo-Delgado, J. C. (2023). *Marco de referencia para la planificación y desarrollo continuo de la comunicación de riesgos y crisis frente a amenazas en Sudamérica*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Marcillo-Delgado, J. C., Alvarez-Garcia, A., & García-Carrillo, A. (2023). Bibliometric mapping of the trends and contributions of scientific publications to risk and crisis communication regarding South America. *Sustainable Environment*, 9(1), 2254145. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/27658511.2023.2254145>
- Mondal, S., & Suman, N. K. (2025). Challenges in Embracing Electric Vehicles: Exploring the Policy Landscape and Way Forward. *Transportation in Developing Economies*, 11(2), 27. <https://doi.org/10.1007/S40890-025-00248-Y>
- Que, X. (2023). Optimization path of corporate ESG performance and compensation performance management under carbon neutral target. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. <https://doi.org/10.2478/AMNS.2023.1.00173>
- Sarkheil, H., Salahjou, T., Seyyedi Eshkiki, S. R., & Hashemi, A. (2025). An integrated economic and machine learning approach using DNN and SVR for forecasting Iran's copper market under climate change. *Mineral Economics* 38(4), 761–794. <https://doi.org/10.1007/S13563-025-00544-4>
- Tassou, S. (2018). Optimising Energy Management in Industry “OPTEMIN” EPSRC. *Impact*, 11.
- Wang, W., Li, Z., & Cheng, X. (2019). Evolution of the global coal trade network: A complex network analysis. *Resources Policy*, 62(1), 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.10.005>
- Xia, Y., & Yan, B. (2022). Energy-food nexus scarcity risk and the synergic impact of climate policy: A global production network perspective. *Environmental Science & Policy*, 135, 26–35. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2022.04.008>

- Xu, L., Dabuo, F. T., Madzikanda, B., & Appiah-Twum, F. (2024). Beyond bits and bytes: Examining the dynamic influence of digital economy on ecological footprint in OECD economies. *Journal of Cleaner Production*, 482, 144141. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144141>
- Yun, S. J., Ku, D., & Han, J. Y. (2014). Climate policy networks in South Korea: alliances and conflicts. *Climate Policy*, 14(2), 283–301. <https://doi.org/10.1080/14693062.2013.831240;WGROUP:STRING:PUBLICATION>
- Zheng, H., Li, A., Meng, F., Liu, G., Hu, Y., Zhang, Y., & Casazza, M. (2021). Ecological network analysis of carbon emissions from four Chinese metropolises in multiscale economies. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123226. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123226>
- Zhong, H., Chen, W., & Gu, Y. (2023). A system dynamics model of port hinterland intermodal transport: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under different carbon taxation policies. *Research in Transportation Business & Management*, 49, 100987. <https://doi.org/10.1016/J.RTBM.2023.100987>

Design validation of a handstand device

Sacha Victor

Université de Technologie de Compiègne

Andrew Allen Rosenthal Tejrina

Escola Tècnica S. d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Edgar Isaac Rivas Hernandez

Escola Tècnica S. d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Resum

Aquest projecte té com a objectiu validar el disseny mecànic i el comportament funcional del Handsat, un dispositiu d'entrenament assistit per ressort destinat a facilitar l'aprenentatge del pi mitjançant l'aplicació d'un parell estabilitzador a nivell de les espatlles. L'estudi aborda dos objectius principals: verificar la integritat estructural del mecanisme sota condicions de càrrega extrema i assegurar una assistència de parell consistent per a una àmplia gamma d'usuaris. En primer lloc, es va dur a terme una anàlisi mecànica i cinemàtica detallada per caracteritzar les condicions de càrrega i moviment del sistema. A partir d'aquesta anàlisi, es van definir vint-i-cinc escenaris representatius combinant cinc masses d'usuari amb cinc configuracions d'extensió de la palanca. El cas més desfavorable, corresponent a un usuari de 120 kg amb extensió màxima, es va analitzar mitjançant el mètode dels elements finits, confirmant que els esforços es mantenen dins dels límits admissibles del material. Paral·lelament, l'estudi del comportament del parell va permetre desenvolupar un nou mecanisme de pretensió ajustable, que garanteix un lliurament de parell uniforme i una millor adaptabilitat a diferents perfils d'usuari.

Abstract

This project aimed to validate the mechanical design and functional performance of the Handsat, a spring-assisted training device designed to support users during handstand learning by applying stabilizing torque at the shoulders. Two main challenges were addressed: ensuring structural integrity under extreme user loading and maintaining consistent torque assistance

across users of different body sizes. A comprehensive mechanical and kinematic analysis was first conducted to characterize the system's loading and motion. Based on this analysis, twenty-five representative user scenarios were defined by combining five user mass categories with five lever extension settings. The most critical case, corresponding to a 120 kg user at maximum lever extension, was subsequently evaluated using finite element analysis. Stress distributions and mesh-refined singularity assessments confirmed that all components remain below material yield limits. In parallel, torque variations across all scenarios were quantified, leading to the development of an adjustable pretensioning mechanism. This redesigned system enables preload tuning to individual users, ensuring uniform torque delivery and improved usability across a wide range of users.

Keywords: Finite Element Analysis (FEA), Pretensioning Mechanism, stress distribution, Singularities, Torque Compensation.

1. Introduction

A handstand requires balancing the body in a stable, inverted vertical position on the hands, with arms and legs fully extended and hands shoulder-width apart. Entering the handstand typically involves kicking up from a lunge or squat, using momentum to align the body vertically while the shoulders and arms resist collapse—a stage particularly challenging for beginners due to the required timing, strength, and spatial awareness.

To facilitate learning, the device studied here provides physical support and posture correction during handstand attempts. Its adjustable arms allow the shoulder pads to accommodate different user heights, increasing accessibility. However, the torsional mechanism that stabilizes the user is not adjustable, causing torque to vary with lever length. Additionally, the device has not yet undergone structural validation, thus not having any safety limits for potential users.

This study is therefore motivated by two main objectives: to perform a structural analysis to ensure the device can safely withstand user loads,

and to evaluate and optimize functional performance to deliver consistent support across different user sizes. By addressing both structural reliability and functional uniformity, the device aims to provide safe and effective aid for individuals learning handstands.

2. State of the art

The Handsat device operates through a pair of mechanical levers coupled to a spring-assisted mechanism designed to support users during the learning phase of handstands. During operation, the user positions their shoulders against the levers, which apply stabilizing forces as the user transitions into the inverted position. These forces partially support body weight, guide posture, and reduce the risk of instability or falls, particularly during early training stages.

A key feature of the Handsat is the adjustability of the lever lengths, allowing the device to accommodate users of varying heights and shoulder positions. While this adaptability improves ergonomic compatibility, it introduces a significant mechanical challenge. As lever length increases, the torque arm acting on the spring mechanism also increases, resulting in lower applied torque for taller users. Because the existing spring system does not compensate for changes in lever length, users experience inconsistent levels of assistance. Taller users generate greater deflections and receive lower corrective torque, while shorter users may receive too much support. This imbalance can negatively affect learning effectiveness.

The Handsat belongs to a broader class of exercise and assistive devices that replace traditional weight stacks with resilient elements, such as springs, to provide resistance or assistance. Various approaches to spring-based resistance adjustment exist, for example, Wilson's U.S. Patent US4208049A [5] describes an apparatus in which resistance is adjusted by mechanically engaging multiple independent springs, allowing discrete changes in total force without modifying

individual spring properties. Other systems, such as the variable-stiffness mechanism proposed by Mathews and Braun [6], use a single torsional spring combined with adjustable linkages to alter effective stiffness. In this design, the user can continuously modify stiffness via a pivot-shifting mechanism secured by a ratchet and pawl, enabling stiffness adjustment even during motion.

Spring pretensioning itself is a well-established engineering concept. In automotive suspension systems, compression spring preload is commonly adjusted using threaded collars to modify the spring's initial length. For torsional springs, an analogous approach is used, where the initial angular displacement is adjusted instead of linear length. An example of this principle is found in U.S. Patent US5722331A [7], where torsion spring preload is altered by rotating a threaded shaft that changes the angular bias applied to pivoting arms.

Despite these precedents, no existing solution was found that was sufficiently simple, compact, or directly applicable to the Handsat's specific requirements. In particular, the need for a discrete, user-adjustable torsional spring pretensioning system capable of normalizing torque across a wide range of user anthropometrics represents a unique design challenge. This gap in existing designs, combined with established validation methodologies that integrate analytical modeling, finite element analysis, and experimental verification, provides the motivation and justification for the present study.

3. Objectives

The objective of this study is twofold. First, it aims to address the inconsistency in assistance across users by analyzing the torque distribution of the lever system and evaluating possible adaptations of the existing spring mechanism to achieve variable resistance and uniform performance. Second, the study seeks to determine the

maximum allowable user weight by assessing the structural integrity of the device through linear static finite element analysis under extreme loading conditions and proposing design improvements if necessary.

4. Materials and methods

4.1. Mechanical and kinematic modeling

To determine the correct spring preloads for each combination of user size and weight, a mechanical and kinematic analysis of the system was performed.

The torque contributions from gravity and the spring, as functions of the arm's angle, are described by the following equations:

$$\tau_{grav} = -\frac{mgL}{2} \cos \Theta \quad (1)$$

$$\tau_{springs} = -2k \left(\Theta + \Theta_{preload} - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

To compute the angular acceleration generated by the sum of torques, considering planar motion, the assumption that the user is a uniform rod was made, with a moment of inertia of:

$$I = \frac{1}{3} mL^2 \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{-1}{I} \left[2k \left(\Theta + \Theta_{preload} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{mgL}{2} \cos \Theta \right] \quad (4)$$

Using this and the entry speed (at a 90° angle), the squared angular velocity can be calculated.

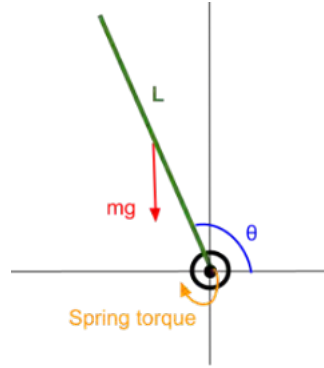


Figure 1. Simplified diagram of the Handstat detailing torque, forces and angular displacement.

$$\omega^2(\Theta) = w_0^2 + 2 \int_{\Theta_0}^{\Theta} \alpha(\Theta') d\Theta' \quad (5)$$

To evaluate system performance, numerical values were substituted into the governing equation to determine its roots. If the first root in the counterclockwise direction occurs below 130°, the spring is able to counteract the user's load without reaching its mechanical stop. The maximum torsional load (= 201,27 Nm), resulting from the combined effects of gravity and spring action at this position (= 97,2°), was then used as the input for subsequent structural simulations. To ensure suitability across a wide user range, multiple discrete spring preload settings were defined. These pretensioning levels were used to determine, for each of the 25 combinations of user mass and lever extension, the minimum preload required to balance the user's weight (Tables 4 and 5).

4.2. Finite element model

Given the static nature of the analysis, the small displacement assumption was upheld. To streamline the model and reduce computational complexity, non-contributing components were excluded. Out of the whole initial model only a single lever was considered for the analysis, as the Handsat is perfectly symmetrical. Furthermore, since the analysis conducted is a static one, the torsional spring, not being relevant under the static load assumption, was also omitted from the analysis. All elements considered in the analysis can be seen in figure 6.

For improved accuracy, rather than modelling the entire lever and applying the force at the centre of the shoulder support, a remote force of 291,27 N was computed from the maximum torque previously stated, and applied at the correspondent location, defined by the software as the following:

Using a local coordinate system, we can pinpoint the exact location where the load is to be applied. As per figure 3 the load will be transmitted by rigid bars, therefore a substantial portion of the lever body was removed to focus computational resources on the critical region.

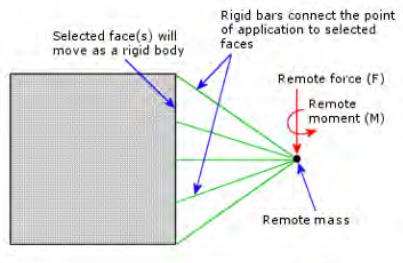


Figure 2. Remote load diagram [4].

All components included in the simulation were assigned the appropriate aluminium alloy as the material specification, that being the following aluminium alloy: AlSi10Mg, composed mainly by Silicon (9-11%), Magnesium (0,25-0,45%), Manganese (0,45%), Titanium (0,15%) and the rest being Aluminium. It's properties are as shown in the table below.

Mechanical properties		Physical properties	
Yield strength	271-279 MPa	Density	2,67 g/cm ³
Tensile strength	450 MPa		
Elongation at break	6-8 %		
Module of elasticity	73-74 GPa		

Table 1. Mechanical and physical properties of AlSiMg10 (adapted from [3]).

Boundary conditions were defined such that the base component of the device was fully constrained (i.e., fixed support), and additional constraints were applied to ensure appropriate mechanical behaviour

and convergence, such as constraining the rotating arm in the axial and radial directions and leaving the circumferential direction free, therefore simulating its concentric rotation around the central pin. All global interactions between components were defined using bonded contact conditions.

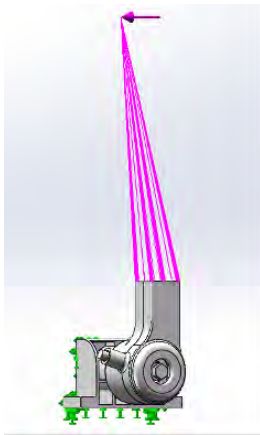


Figure 3. Boundary conditions (loads and restrictions).

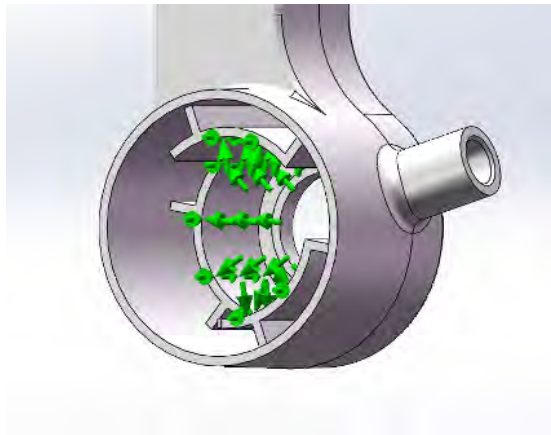


Figure 4. Boundary restrictions for the rotating arm.

An initial uniform mesh was applied to all components and following a preliminary simulation, mesh refinement was applied selectively in regions exhibiting elevated stress concentrations to enhance result fidelity. The preliminary simulation results revealed that the highest stress magnitudes—evaluated using von Mises stress criteria, given the ductile nature of the material—occurred at the contact regions between the Gasket and the retaining pin. These elevated stresses are attributed to geometrical singularities arising from nodal interactions at sharp geometric transitions. Such singularities are known to produce non-physical stress values, which do not accurately reflect the real



Figure 5. Mesh overview.

stress distribution across the contact surfaces [1]. To reduce the influence of these singularities two measures were taken: first, to reduce the contact edges sharpness, small 0,5 mm radius fillets were applied to the Gasket. Secondly, not only to enhance result fidelity but also to ensure the correct meshing of the added fillets, local mesh refinements were applied. The details of the mesh and the refinements can be observed in Table 2.

Global mesh settings		Mesh control applied on the rotating arm	Mesh control applied in critical contact regions
Mesh type	Blended curvature mesh		
Maximum element size	7,50 mm	12,50 mm	2,00 mm
Minimum element size	1,50 mm	11,25 mm	1,80 mm
Min num of elements in a circle	8	8	8
Element growth ratio	1,2		

Table 2. Mesh setting and controls for first simulation.

A key characteristic of singularities is that the stress values tend to increase without bound as the mesh is refined, if this behaviour is found, the results won't converge. To investigate this, two additional simulations were conducted with a refined mesh in the regions of interest. The mesh control parameters employed for these simulations are outlined below.

	1 st mesh refinement	2 nd mesh refinement
Maximum element size	1,5 mm	1,00 mm
Minimum element size	1,35 mm	0,90 mm
Min num of elements in a circle	8	8

Table 3. Subsequent mesh refinements.

If the results of these simulations do not converge and thus the stress concentrations are confirmed to be singularities, a subsequent study must be run. This study involves mesh convergence analysis in the vicinity of the singularities. Utilizing the three previous meshes, three more simulations were carried out (one for each mesh), the objective was to evaluate the stress gradient relative to nodal proximity to said singularity. The “real” or accurate stress value was deemed achieved when the relative variation in stress between two successive mesh refinements was less than 1% [2].

5.3. Pretensioning mechanism design

Finally, a mechanism has been developed to enable the pretensioning of the helical torsional spring to the specifications determined in the previously conducted multiple case study. This system incorporates several new components: a pretensioning disk, a new compression spring, a rubber element for impact absorption, and a dedicated

wrench or key for actuation. Additionally, modifications have been implemented on certain pre-existing elements to accommodate the new design.

The mechanism operates as follows: the wrench engages with and rotates the pretensioning disk through the newly designed slots on the side of the base of the original assembly. Due to its specific geometry and the inclusion of a compression spring, the system can achieve multiple discrete configurations, each corresponding to a particular level of pretension in the torsional spring, as per table 4. The mechanism can be reset by applying force with the opposite end of the wrench. This action compresses the spring sufficiently to disengage the locking interface between the disk and the base, thereby allowing the torsional spring to return the mechanism to its neutral or initial position. An elastomeric element has also been added to reduce the impact between the returning pretensioning disk and the base. An exploded view of the mechanism's new design including all new elements alongside the original model can be seen below.

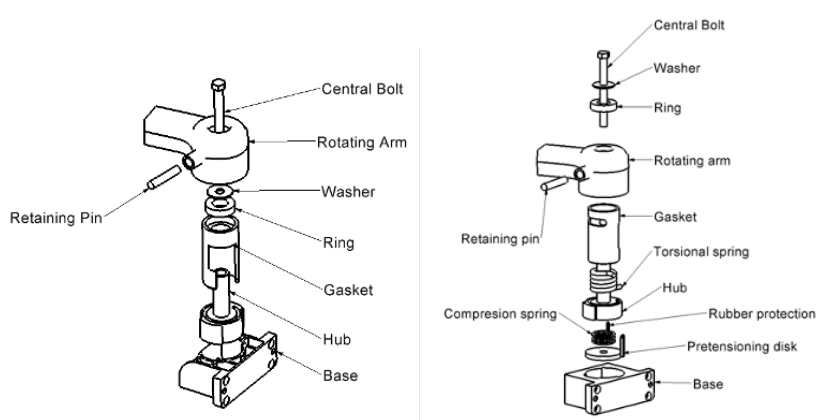


Figure 6. Exploded view of all the elements considered for the FEA.

Figure 7. Exploded view of all the elements in the redesigned mechanism.

5. Results and discussion

5.1. Kinematic and pretensioning results

The entry angular velocity (at a 90° angle with the ground) is considered to be 1.13rad/s. This value was estimated by analysing video footage of people performing a handstand using the Handsat.

We consider that the most demanding case is that of a 120kg user at the maximum arm extension. In order to limit the different preload positions to a reasonable number while allowing for the use of the Handsat by a wide range of profiles, each position is set at an angle of $\pi/12$ radians from the previous one. For the most demanding case, we find that a preload of $11\pi/12$ is necessary. Considering the corresponding data, here is the resulting equation from which the maximum displacement is computed.

$$\omega^2(\Theta) = -85.18\sin(\Theta) - 2.620\Theta^2 - 6.85\Theta + 103.67 \quad (6)$$

We find the first root at $\theta = 1.7$ rad, which corresponds to a 7° displacement, at this angle the torsional load applied by the spring and gravity is 201 Nm.

The table below presents the necessary spring preloads for various combinations of user weight and size parameters. If the selected preload exceeds the recommended value, the machine may become overly stiff and behave like a rigid barrier. Conversely, if the preload is set below the recommended value, the device may not function correctly and could be at risk of mechanical failure.

		User weight (kg)									
		Torsional spring pretensioning angle					Preloading settings based on user size and weight				
		40	60	80	100	120	40	60	80	100	120
Size parameter	1	$\pi/6$	$\pi/4$	$5\pi/12$	$\pi/2$	$7\pi/12$	1	2	4	5	6
	2	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$	$2\pi/3$	2	3	4	5	7
	3	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$7\pi/12$	$3\pi/4$	2	3	5	6	8
	4	$\pi/4$	$5\pi/12$	$7\pi/12$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	2	4	6	7	9
	5	$\pi/3$	$\pi/2$	$7\pi/12$	$3\pi/4$	$11\pi/12$	3	5	6	8	10

Table 4. Torsional spring pretensioning angle and preloading based on user size and weight.

5.2. Structural analysis results

As previously stated, the finite element analysis was conducted on the most critical loading scenario identified in the case study— which results in a force of 291,27 N. The results of the initial simulation are

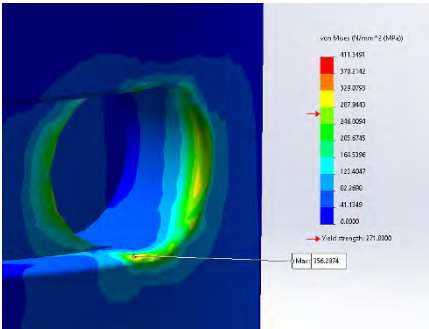


Figure 8. Second high stress region, corresponding to the Retaining pin.

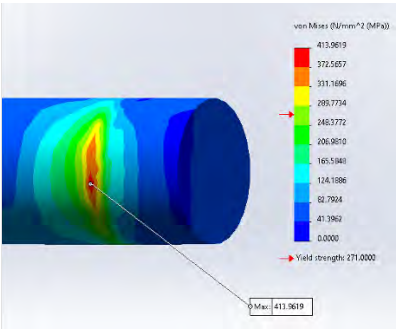


Figure 9. One of two high stress regions, corresponding to the Gasket.

presented below, with particular emphasis on the regions exhibiting the highest stress concentrations, this being the Gasket and the Retaining pin, specifically the contact region between both.

As we can see the maximum von Misses equivalent stress for both elements is, respectively for the Gasket and the pin, 356,28 Mpa and 413,93 Mpa. Evidently, these values surpass the material's yield strength, however, it is important to note that these stresses occur in a contact region, where such results are often influenced by singularities. Further verification is required to determine whether these elevated stresses are indeed indicative of singular behavior.

Running two new simulations with the mesh refinements detailed in table 3, the maximum stresses for each component was noted and introduced in the following table. It can be observed that the variation in stress values between successive simulations does not diminish with mesh refinement. This indicates that the high stress values are a result of localized stress concentrations associated with geometric or contact-induced singularities. Therefore, a singularity convergence study was performed.

	Retaining pin	Gasket
1 st simulation	413,93 MPa	356,28 MPa
2 nd simulation	445,02 MPa	362,08 MPa
3 rd simulation	522,57 MPa	492,20 MPa

Table 6. Maximum stresses for the Gasket and the Retaining pin for each simulation.

In accordance with the previously described methodology, the results of the analysis are presented in the following graph.

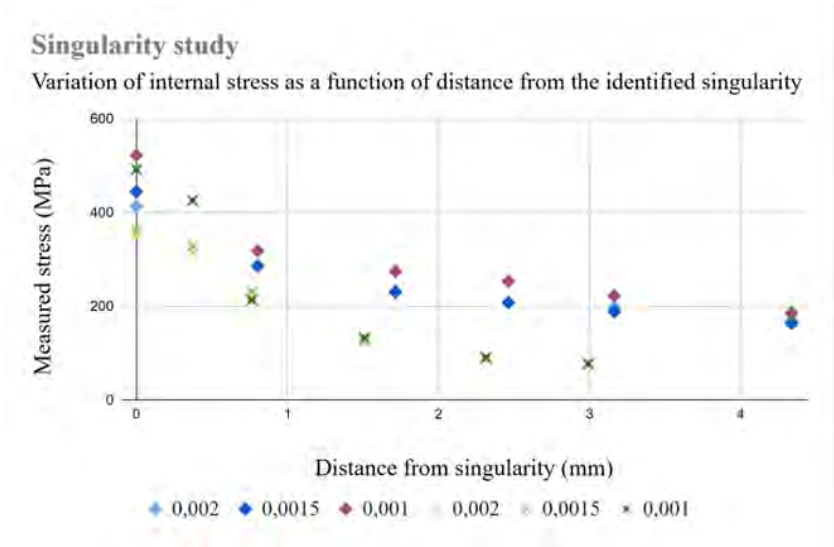


Figure 10. Singularity study results for the Gasket (crosses) and the Retaining pin (diamonds).

This plot shows the variation of internal stress as a function of distance from the identified singularity, revealing a consistent decrease in stress magnitude and improved convergence as the distance increases. For the Gasket, a clear reduction in variability between successive mesh refinements is observed, attributed to the more uniform mesh in the analyzed region. The minimum relative variation between refinements was 0.984%, corresponding to stress values of 126.93 MPa and 125.68 MPa, confirming the latter as the most representative peak stress, as it belongs to the finer mesh.

A similar but less pronounced convergence trend is observed for the Retaining Pin. For element sizes of 2 and 1.5 mm, stress values differed by less than 1% beyond 0.85 mm from the singularity, indicating strong convergence. However, due to increased variability introduced by the

finer mesh size (1 mm), reliable stress values for the Retaining Pin were confirmed only beyond 4 mm, leading to a validated maximum stress of 164.17 MPa. Although it still exhibits a relative variation of 3.52%, this deviation remains within acceptable limits for the purposes of this study. Consequently, the maximum validated stress value for the Retaining pin is 164.17 MPa for a mesh size of 1.5 mm.

Finally, with respect to the design of the pretensioning mechanism, the newly introduced components, along with the modified existing elements, are presented in the following detailed engineering drawings.

Pretensioning disk:

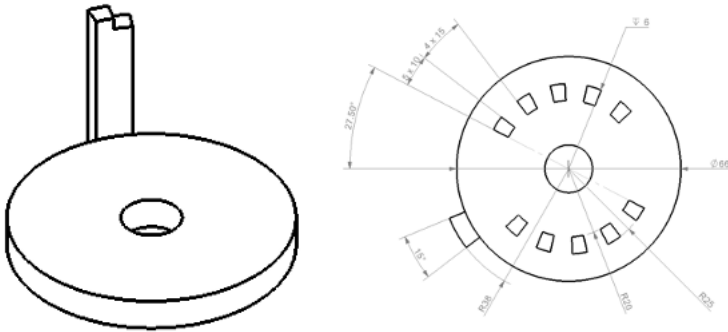


Figure 12. Pretensioning disk overview and detailed dimensions.

Base:

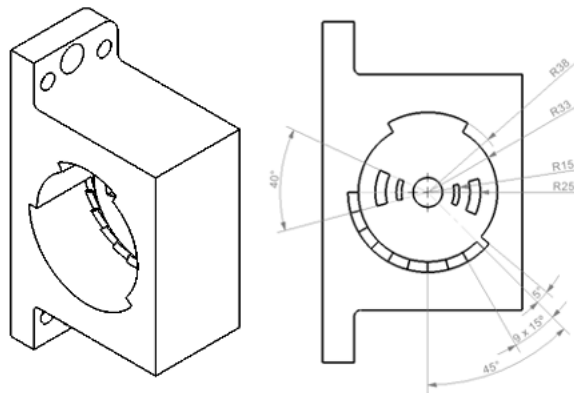


Figure 13. Base overview and detailed dimensions.

Key:

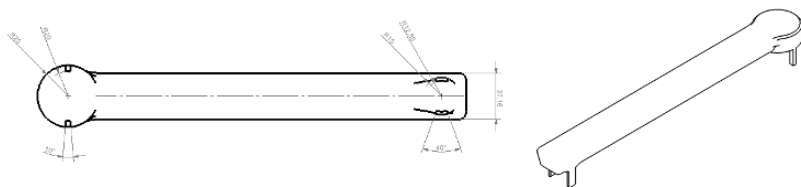


Figure 14. Key overview and detailed dimensions.

5.3. Discussions

The stress values obtained from the finite element analysis confirm that both components operate within the elastic regime of the aluminium alloy utilised. The computed safety factors are 1.65 for the Retaining pin and 2.14 for the Gasket, demonstrating adequate structural margin relative to the material yield strength. The static analysis was

performed considering the most demanding instant of the use of the device under controlled and guided operation of the device, assuming a user mass at the upper limit of the predefined admissible range. Consequently, even in the event of deviations from idealised operating conditions, the evaluated components are not expected to surpass their allowable stress limits.

The pretensioning mechanism significantly improves the functional performance of the Handsat device by compensating for variations in user mass and lever extension. By allowing controlled adjustment of torsional spring preload across multiple calibrated positions, the system delivers a more uniform torque response independent of user characteristics. This ensures that lighter users receive adequate support, while heavier users are prevented from overloading the mechanism, improving training consistency and safety.

6. Conclusion

This study confirmed that the Handsat device maintains structural integrity under all investigated operating conditions. Twenty-five loading configurations were analysed, derived from five lever extension positions and five user mass categories ranging from 40 kg to 120 kg. The most demanding scenario—maximum lever extension (position 5) combined with a 120 kg user—generated the highest internal stresses.

Finite element simulations showed that the maximum stress values recorded for the critical components far surpassed their respective material limits at 271 MPa. These localised stress peaks were examined through systematic mesh refinement and singularity convergence studies. The progressive increase in stress values with successive refinement, combined with spatial confinement of the peaks, confirmed that these values were artefacts induced by geometric singularities and mesh discretisation, rather than an indication of actual material overstress. Once adjusted for this factor, the calculated stresses

stabilised at significantly lower values, 125.68 MPa for the Gasket and 164.17 MPa for the Retaining Pin, confirming the structural soundness of the components. Accordingly, failure risk associated with these stress concentrations was dismissed as a numerical limitation rather than a physical concern.

In parallel, a new pretensioning concept was developed to ensure that the torque delivered to the user remains approximately constant regardless of lever extension or body mass. The mechanism integrates a torsional spring whose pretension level can be manually adjusted between discrete calibrated positions. This design permits control of the initial elastic reaction of the system, compensating for variations in user-induced torque. As a result, the mechanism eliminates the performance discrepancies identified in the original prototype, creating a more predictable and controlled mechanical response across all user categories, increasing the potential user population and training effectiveness.

The pretensioning mechanism demonstrates considerable potential but is still at a conceptual stage and has not yet undergone detailed structural, fatigue, or experimental validation. To advance the design, future work should focus on dynamic simulations to evaluate the device's response during movement, experimental testing to confirm performance under real conditions, and design optimization to improve manufacturability, durability, and ease of adjustment. Overall, this study confirms that the Handsat device is structurally reliable, and the redesigned pretensioning system represents a significant step toward delivering consistent, adaptable support. With further testing and refinement, the device has strong potential to become a versatile and dependable training aid for handstand practice across a wide range of users.

References

- [1] Sönnnerlind, H. (2015, June 3). *Singularities in Finite Element Models: Dealing with Red Spots*. COMSOL.
- [2] Rosenthal Tejerina, A.A. (2025). *Disseny, Construcció i assaig d'un ancoratge de fricció*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/84ba6f5b-bb11-44a4-aa50-02c2ec4c8568/content>
- [3] Aluminum AlSi10Mg data sheet. (No data). *Xometry pro*.
<https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/08/Aluminium-1706-1.pdf>
- [4] Dassault Systèmes. (2024). *Remote load (rigid connection)*. In SolidWorks documentation. [https://help.solidworks.com/2024/english/solidworks/cworks/c_Remote_Load_\(Rigid_Connection\).htm](https://help.solidworks.com/2024/english/solidworks/cworks/c_Remote_Load_(Rigid_Connection).htm)
- [5] Wilson. R. J. (1980). *Constant force spring powered exercising apparatus*. (U.S. Patent 4,208,049). United States Patent and Trademark Office.
- [6] Mathews. C. W & Braun. D. J.(2023). *Design of a Variable Stiffness Spring with Human-Selectable Stiffness*.
<https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10161305>
- [7] Welker. H. R. (1998). *Adjustable height load bearing support structure*.(U.S. Patent 5,722,331). United States Patent and Trademark Office.
- [8] Zhang, B., Ren, P., Wang, Z., & Ma, H. (2023). Research on the spring creep based on the load simulator of the double torsion spring steering gear. *Materials*, 16(10), 3763. <https://doi.org/10.3390/ma16103763>

Prototipos de (re)articulación creativa. Fotografía y dibujo en los procesos de proyecto del 'EG-Lab'

Andrea Parga

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny

Resumen

Los modos de proyección y las técnicas de expresión gráfica condicionan qué se puede pensar y qué se puede ver. Por tanto, es posible explorar las etapas iniciales del ejercicio compendio de la asignatura EG, el 'Proyecto en grupo', en busca de constatar que la representación no sólo comunica, sino que también produce. El objetivo de la propuesta es comprobar cómo el dibujo a mano, vinculado a la fotografía, resulta un intermediario conceptual complejo, que actúa no solo como recurso para plasmar resultados, sino como instrumento que promueve el propósito del proyecto. Con ello, desde las diferentes posibilidades que ofrecen los procesos de diseño, se intenta revisar y reformular la intervención práctica de las competencias visuales en aplicación futura al trabajo con prototipos de (re)articulación creativa del 'EG-Lab'.

Palabras clave: procesos de proyecto, (re)articulación creativa, croquis/guion cognitivo, fotografía, dibujo, representación, diseño y pensamiento gráfico.

Abstract

The modes of projection and techniques of graphic expression condition what can be thought and what can be seen. Therefore, it is possible to explore the initial stages of the EG course's core exercise, the 'Group Project,' to demonstrate that representation not only communicates but also produces. The aim of this proposal is to examine how hand drawing, linked to photography, becomes a complex conceptual intermediary, acting not only as a resource for capturing results but also as an instrument that promotes the project's purpose. Through the various possibilities offered by design processes, this study seeks to review and reformulate the practical application

of visual skills for future work with prototypes of creative (re)articulation in the 'EG-Lab.'

Keywords: project processes, creative (re)articulation, cognitive prototypes, photography, drawing, representation, design and graphic thinking.

1. Contexto

La propuesta de vínculo entre prototipo e imagen es una invitación a repensar la enseñanza del proyecto de diseño no solo como elaboración formal, sino como etapas de interacción entre modos de pensar, representar y construir. En esta línea, se ha considerado estudiar un ejercicio que incorpore la relación entre fotografía y dibujo desde el inicio de su planteamiento. La idea de afianzar el pensamiento gráfico está presente en atención a la práctica con prototipos desde las múltiples posibilidades que brindan los proyectos de diseño en sus fases de proceso. Para ello, se presentan las tres vías de aplicación didáctica emprendidas en la asignatura de Expresión Gráfica (EG) del plan de estudio de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE), UPC:

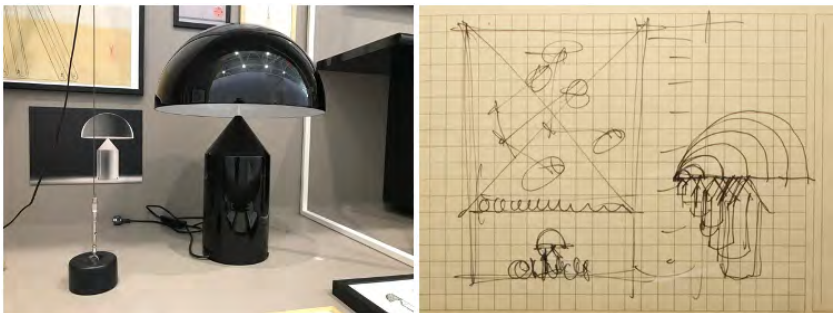


Figura 1. ADI Design Museum Milán, Junio 2025. Fotos: Andrea Parga. EEBE, UPC.

En primer lugar, al enfoque introductorio e integrador del actual ‘Proyecto en grupo’ de EG, para los alumnos de primer curso, y su posible continuidad en el espacio EG-Lab.

En segundo lugar, en contribución con el avance del Chatbot para la asignatura EG, en el marco del proyecto de innovación docente que se desarrolla en el *Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny* (DEGD), UPC.

En tercer lugar, a la base pedagógica de los Trabajos Finales de Estudio (TFE), de los Trabajos Finales de Máster (TFM) y de las tesis doctorales; con la aspiración de transferencia de conocimientos y de interconexión entre la producción del Grado, del Máster de Formación de Profesorado de Secundaria y del Doctorado en Diseño, UPC.

Por tanto, en este contexto y a partir de la propuesta del EG_Lab en la *VII Jornada de Recerca en Enginyeria Gràfica i Disseny* (04 de febrero de 2025) para la creación de prototipos con tecnologías activas, se ha planteado un primer paso operativo aplicado a la asignatura EG (Q1-Cuatrimestre de otoño curso 2025’26) en los grupos de mañana M52, M71, M31 (profesora Andrea Parga). Con esta prueba, se ha querido prestar atención al ‘Proyecto en grupo’ como actividad de compendio del curso, con la intención de perfilarla como el primer vínculo a las prácticas programadas en el EG_Lab. Para ello se han implementado algunas pautas sobre los requerimientos para precisar su planteamiento, seguimiento y ejecución.

De este modo y en conocimiento de la actual guía docente, con última revisión y modificación a principios de octubre del año en curso (02.10.2025), se presentan los datos generales para la asignatura y las premisas específicas sobre la actividad:

GUÍA DOCENTE

820003 - EG - Expresión Gráfica

Unidad responsable: Escuela de Ingeniería de Barcelona Este, EEBE

Unidad que imparte: 717 - DEGD - Departamento de Ingeniería Gráfica y de Diseño

Créditos ECTS:6.0

REALIZACIÓN DE UN PROYECTO EN GRUPO

Etapas de la actividad:

- *Idea y planteamiento.*
- *Planificación.*
- *Elaboración de croquis, dimensionado.*
- *Ejecución de piezas y de sus planos (SolidWorks).*
- *Integración de las partes y planos de conjunto (SolidWorks).*
- *Animación y presentación.*

Competencias relacionadas:

CEB-05. Capacidad de visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica, tanto por métodos tradicionales de geometría métrica y geometría descriptiva, como mediante las aplicaciones de diseño asistido por ordenador.

07 AAT N1. APRENDIZAJE AUTÓNOMO - Nivel 1: Llevar a cabo tareas encomendadas en el tiempo previsto, trabajando con las fuentes de información indicadas, de acuerdo con las pautas marcadas por el profesorado.

Horas: 45h (actividades dirigidas 15h, aprendizaje autónomo 30h).

Evaluación:15%

El desarrollo del ‘Proyecto en grupo’ propone la elección de un objeto/ mecanismo para ser estudiado formal y funcionalmente, tanto en su totalidad como en la articulación de sus partes a través de la práctica del modelado por ordenador. Con la idea de completar el ejercicio se ha trabajado, desde el antecedente, por la reflexión sobre los criterios del inicio del proceso. Esto, en atención a una práctica que ayude a pensar la representación no únicamente como vehículo pasivo sino como parte constitutiva del pensamiento creativo: lo que se dibuja, cómo se dibuja, cómo se ve... atendiendo a que influye sobre lo que se puede concebir.

Con la puesta en marcha del ‘Proyecto en grupo’ se ha buscado generar la documentación gráfica necesaria para la preparación de prototipos de (re)articulación creativa partiendo del estudio y reconocimiento de las características básicas de las partes de objetos/ mecanismos seleccionados entre elementos ya conocidos; esto, con la variación de incorporar un progreso a su diseño a fin de actualizar su eficiencia de sostenibilidad. Por tanto, como novedad, se recurre a la inclusión de una mejora que responda a los objetivos ODS 2030 con énfasis en el desarrollo de las dos fases iniciales de la práctica:

- La atención a la secuencia fotográfica como herramienta de comunicación entre etapas del estudio y en garantía de avanzar en las iteraciones de los modelos.
- El cuidado por el conjunto de dibujos a mano previos a su incorporación al entorno digital como instrumento de observación y reflexión.

Así pues, la voluntad se ha centrado en entender y estudiar el desenvolvimiento de la primera etapa del ‘Proyecto en grupo’ con el objetivo de analizar la interacción entre la fotografía y el dibujo a mano como productores de material cognitivo; capaz de fundamentar una práctica de reconocimiento de relaciones entre las partes a través de

la observación, la imagen, la representación gráfica manual y su posterior avance digital.

2. Preguntas de investigación

¿Cuál sería la premisa del 'Proyecto' de expresión gráfica a reforzar que nos permitiera volver sobre los pasos dados por el diseñador original y aproximarnos con un nuevo proceso al diseño del objeto/mecanismo?

¿Cómo una secuencia de imágenes puede ser un recurso eficaz de trabajo en cuanto a punto de encuentro e intercambio entre lo existente y su posible (re)articulación?

¿Cuál sería la relación entre el dibujo a mano inicial, el desarrollo de las etapas del proyecto y los resultados del diseño?

¿Cómo la fotografía y el dibujo pueden ser herramientas de estudio útiles para avanzar en el desarrollo del prototipo?

3. Objetivos



Figura 2. ADI Design Museum Milán, Junio 2025. Fotos: Andrea Parga.
EEBE, UPC.

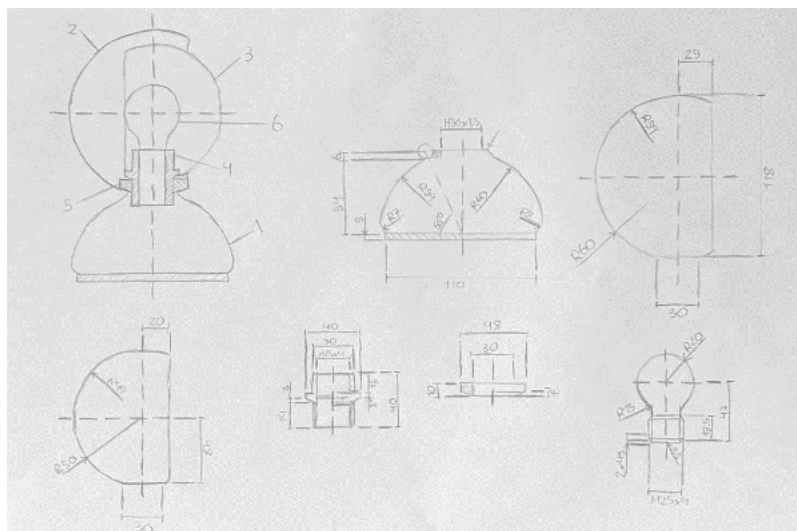


Figura 3. Croquis, objeto/mecanismo. Alumnos Marc Josep Portillo Ordoñez y Eduardo Villar Martín. M52, EG 2025, EEBE, UPC.

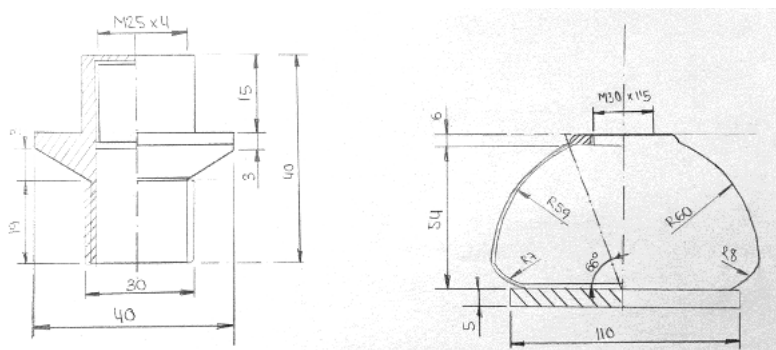


Figura 4. Croquis, objeto/mecanismo. Alumnos Marc Josep Portillo Ordoñez y Eduardo Villar Martín. M52, EG 2025, EEBE, UPC.

Los modos de proyección, las técnicas de expresión gráfica condicionan qué se puede pensar y qué se puede ver. Por tanto, es

posible trabajar en busca de constatar que la representación no sólo comunica, sino que también produce.

El objetivo de la propuesta es comprobar cómo el dibujo a mano vinculado a la fotografía resulta un intermediario conceptual complejo en el procedimiento del diseño, que actúa no solo como medio para plasmar resultados, sino como instrumento que promueve la idea del proyecto.

4. Contenido



Figura 5. ADI Design Museum Milán, Junio 2025. Fotos: Andrea Parga. EEBE, UPC.

En acuerdo al propósito de profundizar en los modos de representación ‘en relación’, se plantea volver sobre el ‘Proyecto en grupo’. Esta actividad permitirá examinar la aproximación en expresión gráfica sobre objetos/mecanismos a partir de la experiencia de los estudiantes como usuarios y como diseñadores. Desde la innovación docente se continua en la línea de tomar conciencia sobre las metodologías de diseño, los lenguajes del proceso creativo, la convivencia entre ‘lo analógico y lo digital’ y el papel de su vinculación en el diseño. Por consiguiente, el contenido se centra en la reflexión sobre la transferencia cualitativa y compleja del ‘material de proyecto’ inicial al entorno digital que le dará continuidad en su desarrollo.

- Se profundiza en los fundamentos sobre cómo una expresión visual combinada y coherente impulsa el progreso del diseño; al mismo tiempo que refuerza el contenido del estudio y el paso de sus etapas.
- Se acoplan recursos gráficos y producción fotográfica de manera que se establecen múltiples relaciones lógicas que facilitan el entendimiento, la comunicación visual y el avance entre pruebas del proceso del proyecto.
- Se reconocen y componen los elementos de la unidad visual: las fotografías, las representaciones técnicas manuales, el orden, las escalas y los detalles.
- Se apoya la creación y variaciones de las narrativas visuales, sus cruces y sus intenciones como bases del pensamiento gráfico del proceder en cada caso.
- Se incentiva la continuidad de la práctica con herramientas digitales; la exploración con SolidWorks completa el estudio del objeto/mecanismo seleccionado.

5. Metodología



Figura 6. DHub Disseny Hub Barcelona, Abril 2025. Foto: Andrea Parga. EEBE, UPC.

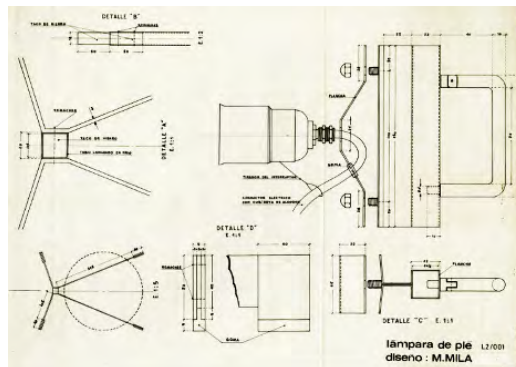


Figura 7. DHub Disseny Hub Barcelona, Archivo, Octubre 2025. EG, EEBE, UPC.

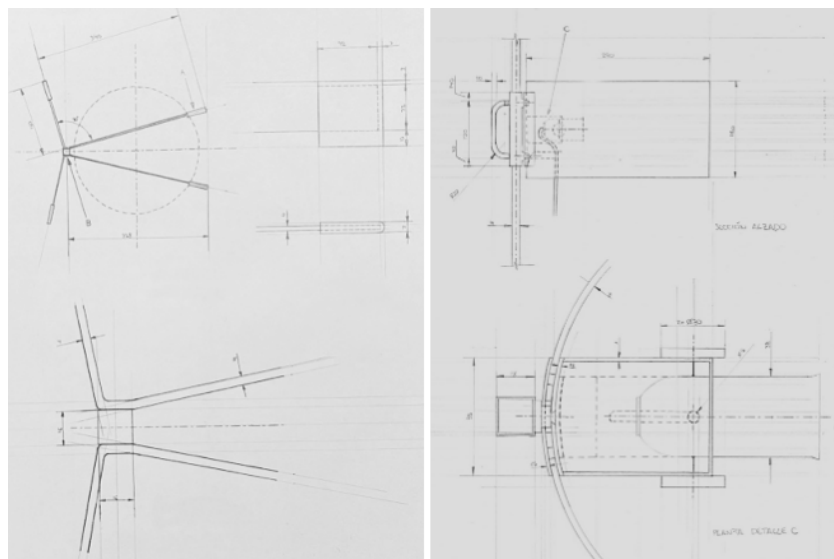


Figura 8. Croquis, objeto/mecanismo. Alumnas Candela Osberger Serrano y Ainhoa Jurado Pié. M52, EG 2025, EEBE, UPC.

En el marco del ‘Proyecto en grupo’ se ha enfatizado en la elaboración de las láminas de reconocimiento inicial consideradas como unidades visuales, como puesta en común que promueve la observación y facilita el estudio y la comparación. Se ha apuntado a generar un tablero compuesto por partes, una matriz de análisis que se caracteriza por visibilizar numerosas combinaciones presentadas a la vez.

Se han pedido, como inicio de la práctica, las fotografías del objeto/mecanismo real junto a un primer conjunto de croquis. Para este planteamiento se ha recomendado seguir los criterios técnicos de las vistas diédricas en garantía de un orden primigenio. Se ha apelado a ejecutar foto y dibujo a mano del objeto/mecanismo completo y por piezas; para lo que sea sugerido la condición de que los elementos

siempre se han de mostrar en igualdad de escala; en relación, afianzando concordancias y alineaciones.

Entre los tipos y variantes de modelos a trabajar se ha recomendado hacer elección del elemento entre objetos cotidianos probados en su diseño original; esto en acuerdo a experimentar con la creación de 'prototipos de optimización' derivados de los referentes iniciales. Las fuentes de material aconsejadas para comenzar fueron las colecciones del:

- Disseny Hub Barcelona
- ADI Design Museum

El ejercicio ha supuesto el abordar el diseño a través del avance entre escalas y del intercambio entre las disciplinas visuales de la fotografía y el dibujo a mano. Con el seguimiento de este grupo de pautas más específicas en el inicio del proyecto se intenta proporcionar habilidades y métodos interdisciplinarios para representar, modelar, diseñar y fabricar objetos/mecanismos y sistemas utilizando estrategias conceptuales para la innovación, independientemente de la tecnología.

La actividad iniciada como prueba en el proyecto de la asignatura EG de grado, tiene mira directa en su extensión de aplicación en cuatro vías que le darían soporte y continuidad en la práctica; dos en grado, dos en postgrado:

1. Grado

- EG-Lab como nuevo espacio de apoyo al autoaprendizaje de la asignatura EG.
- Soporte a las propuestas de Trabajo Finales de Estudios (TFE). Actualmente está en curso el ejercicio del alumno Raúl Rios Ballarín, en dirección y co-dirección respectivamente de los profesores Òscar Farrerons y Andrea Parga, para el estudio teórico

y práctico en la evolución de diseños de iluminación premiados, y nueva propuesta de diseño que incluya ODS de la Agenda 2030. Alineado al análisis de sostenibilidad y de las implicaciones éticas de obligación a considerar en el TFE, EEBE.

2. Postgrado

- Propuestas TFM. Máster universitario en Formación del Profesorado de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanza de Idiomas, FIB. En posibilidad de elaborar un proyecto original en el que el estudiante deba aplicar las competencias adquiridas; en atención al diseño de una innovación, de una mejora que, eventualmente, pueda ejecutarse para evaluar su impacto.
- Propuestas Doctorado en Diseño, UPC.

6. Resultados

En cuanto al guion cognitivo, entre fotografías y dibujos, se ha conseguido:

- Estimular la creatividad, el pensamiento abstracto, las relaciones y la iteración.
- Proporcionar una introducción gráfica a los aspectos del proceso.
- Promover las habilidades para una comunicación visual más efectiva.
- Adquirir experiencia en la aplicación de los fundamentos del dibujo a mano.
- Aplicar principios básicos de comparación entre imágenes como recurso de exploración.



Figura 9. ADI Design Museum Milán, Junio 2025. Fotos: Andrea Parga. EEBE, UPC.

En cuanto al pensamiento gráfico y las tecnologías del diseño se ha consolidado:

- Desarrollar familiaridad con el proceso de diseño, la observación crítica y la traducción de conceptos de diseño a la realidad física y digital.
- Utilizar instrumentos y técnicas tradicionales y contemporáneas.
- Reconocer las herramientas, técnicas y tecnologías de diseño atribuidas, por caso, en una diversidad de proyectos en un entorno de estudio.

- Explorar conceptos relacionados con la forma, la función, los materiales, los recursos gráficos y los entornos físicos a través de ejercicios basados en proyectos.

7. Discusión



Figura 10. ADI Design Museum Milán, Junio 2025. Fotos: Andrea Parga. EEBE, UPC.

En consideración al diseño como una sucesión de pasos entre el inicio del proyecto y el producto acabado, se ha encaminado la reflexión sobre los resultados de la flexibilidad de una solución continua; intentado superar el ámbito donde sólo es posible estimar el producto terminado como final. Esto, debido a que ese ‘último’ estado es ‘sólo’ el resultado y el punto de llegada (de pausa) de un largo recorrido que se puede reemprender en cualquier momento. La puesta en valor y la búsqueda de precisión del ‘Proyecto en grupo’ de la asignatura EG ha

apuntado a una esencia del diseño que reside en el proceso de descubrir un problema compartido por muchas personas e intentar solucionarlo por etapas, poderlo retomar en cualquier momento y reanudar su evolución. Igualmente, por la naturaleza de exploración del planteamiento, se entiende que producir algo nuevo desde cero es creativo, pero que la iniciativa de convertir lo habitual, lo ya probado, en nuevo desconocido también es un acto de creación.

El hecho de ver, fotografiar, dibujar a mano para (re)articular partes en un prototipo iterativo ha activado la conciencia sobre problemas comunes. Plantear productos cotidianos como tema del proyecto es un método apropiado para reexaminar las competencias visuales y el concepto de diseño a través de sus etapas. El seguimiento de la serie de procedimientos, donde se entrelazan observación, diseño, tecnología, hábitos y estética, resulta una completa práctica didáctica; vinculada a la relación entre el dibujo a mano inicial, el desarrollo de las etapas del proyecto y los resultados del diseño. Por tanto, el avanzar sobre secuencias de imágenes puede ser un recurso eficaz de trabajo en cuanto a punto de encuentro e intercambio entre lo existente y su nueva solución, aproximándonos a:

- Propuestas de trabajo interdisciplinario que favorecen el desarrollo de la interacción en el ámbito científico-tecnológico.
- Diseños e incorporación de recursos técnicos y didácticos que propician la mejora de la satisfacción del estudiantado y de sus resultados académicos.

8. Conclusiones

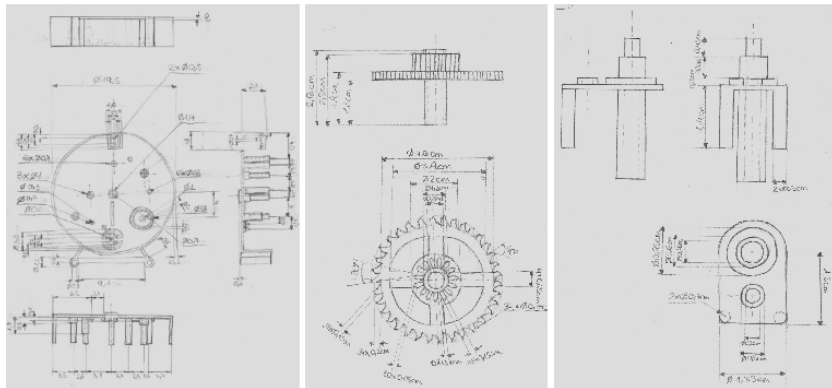


Figura 11. Secuencia, serie primera, selección de croquis de aproximación al estudio del objeto/mecanismo. Alumna Laia González Riera. M71, EG 2025, EEBC, UPC.

Procesos: Se ha comprobado la consideración del dibujo a mano como mediador conceptual, no solo como recurso para plasmar resultados, sino como herramienta que promueve las intenciones del (re)diseño. Se ha podido constatar un camino de nueva ejecución en el que la representación no es neutral, ni tampoco solo instrumental, sino un ámbito complejo donde se entrelaza la experiencia previa de cada uno de los integrantes del grupo, la observación, la creatividad, la geometría, la técnica aplicada y el hacer de la construcción cultural.

(Re)articulación: Se ha logrado reconocer que entre el dibujo y la configuración del objeto/mecanismo hay una etapa caracterizada por la indeterminación, la reinterpretación y la mediación técnica. El volver a articular o unir algo que se ha separado para su estudio, permite pensar sobre los pasos dados por el autor de origen, así como reconocer su diseño de un nuevo modo. La interpretación del dibujo en su progreso a la materialización del elemento lleva al debate la idea

de que el dibujo solo transmite instrucciones; ya que la práctica ha probado la complejidad y diversidad de este procedimiento. Los procesos previos para la elaboración de prototipos de estas características han habilitado rehacer conexiones y el regresar a poner en común partes disociadas de un todo inicial en favor de una mejora.

Croquis/guion cognitivo: Se ha conseguido que los estudiantes prosperen el planteamiento de productos comunes del día a día abordando las necesidades específicas de los usuarios, proponiendo vías de diseño, creando croquis a diferentes niveles de desarrollo, dibujos manuales más definidos, matrices de ensayo entre trazos y recortes de fotos; así como, prototipos de trabajo inicial en papel. La relación entre el objeto/mecanismo y las interacciones para su reconocimiento han progresado a través del análisis del material documental, de la elaboración de bosquejos y modelos, de las pruebas de cambio y de los logros por etapas. Se ha propiciado una exploración didáctica del diseño y del proceso de creación de productos, sobre los dibujos a mano del estudio de la forma, la función, la materialización de los elementos existentes y, a su vez, de la reflexión sobre los pasos iniciales de representación manual que vertebran la evolución del modelo.

Fotografía: Se ha profundizado sobre cómo la correspondencia entre la imagen y la expresión gráfica condiciona el modo de imaginar el objeto/mecanismo. El planteamiento de guiones gráficos a partir de la combinatoria entre la fotografía y dibujo evidenció cómo la práctica tiende a una forma de ver que no es neutra. La atención llevada a la generación de matrices visuales ha facilitado la comprensión de las etapas y a las posibilidades de superarlas por los distintos diseñadores de cada grupo durante el avance de la mejora; ejercicio conjunto que derivó en la variedad de modos proceder en cuanto a la interpretación de las características de los objetos de estudio y los puntos de inicio para el cambio.

Dibujo manual: Se ha consolidado la experiencia de ver con la intención de discurrir entre bocetos en papel, de entender como una secuencia de trazos pueden ser base de un primer prototipo, finalizando en acciones que confirman que la propuesta del objeto/mecanismo no es anterior a su representación, sino que se produce a través de ella. La reflexión sobre la mediación del dibujo a mano en el proceso del proyecto frente a otras formas de representación trasciende en el sentido de que su incorporación no reconoce solo lo notable, sino que vislumbra lo que aún no ha sido pensado. Por tanto, en el vínculo entre representación, diseño y pensamiento gráfico, el dibujo manual se logra posicionar como herramienta cognitiva, no solo útil para expresar, para comunicar según códigos normativos, sino para pensar.

Referencias

- Das M., & Yang M. (2022). *Assessing Early Stage Design Sketches and Reflections on Prototyping*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Desarrollo de Capacidades Creativas. D-Lab Workshops. (s. f.). Recuperado 02 de noviembre de 2024. <https://d-lab.mit.edu/>
- Design & Thinking. (2012). Recuperado 15 de agosto de 2025. <https://designthinkingmovie.com/>
- Evans, R. (2005). *La superficie desarrollada. Una indagación en la breve vida de una técnica de dibujo del siglo XVIII*. Traducciones. Girona: Colección Pre-textos de Arquitectura. [Translations from Drawing to Building and Other Essays. London: Architectural Association, 1997]
- Olmedo, N., Farrerons, Ó., Lapaz, J.L., & Bermúdez, F. (2016). Influencia de las TIC en el aprendizaje de la Ingeniería Gráfica. *VII International Conference on Intercultural Education*.
- Yang, M., & Epstein, D. (2005). *A study of prototypes, design activity, and design outcome*. Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier.

Archivos documentales

Disseny Hub Barcelona. Barcelona, España (Julio 2025)

<https://arxius.museudeldisseny.cat/museu-del-disseny-de-barcelona-3>

ADI Design Museum, Archivio del compasso d'oro. Milán, Italia. (Junio 2025)

<https://www.adidesignmuseum.org/compasso-doro/archivio-del-compasso-doro/>

El Departament d'Enginyeria Gràfica i de Disseny (DEGD) de la Universitat Politècnica de Catalunya fa anys que s'esforça per millorar la recerca que porta a terme. És una recerca que va més enllà de l'àmbit acadèmic, i que es relaciona amb institucions privades i públiques d'arreu del territori català, però també de fora de les nostres fronteres. Aquest llibre n'és un petit reflex, ja que es publiquen les ponències presentades a la **VIII Jornada de Recerca DEGD**, que es va celebrar a inici de febrer de 2026.

El professorat del DEGD, a més de les seves tasques acadèmiques i docents, participa i impulsa la recerca de la UPC, una universitat que es posiciona cada vegada més amunt en els principals rànquings. I com podreu veure en aquest llibre, el nostre departament col·labora en la seva mesura al posicionament global de la UPC.

La recerca que els/les investigadors/es porten a terme també influeix en la millora de la docència de grau i de màster, que s'imparteix a l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT), a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE), a l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG), a l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa (EPSEM) i a l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels (EETAC).



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Departament d'Enginyeria Gràfica
i de Disseny

OmniaScience

Monographs

ISBN 978-84-129686-6-8



9 788412 968668 >