



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis de la aplicación de la impresión 3D  
en el diseño de alimentos mediante extrusión  
sobre medio concentrado.**

Autor: Elvira Atucha Lizasoain

Director: Javier Calzada Funes

Co-Director: Susana Ortiz Marcos

Junio de 2026



### Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Análisis de la aplicación de la impresión 3D en el diseño de alimentos mediante extrusión sobre medio concentrado** en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025-2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

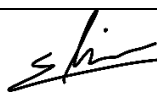
### Uso de Inteligencia Artificial<sup>1</sup>

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

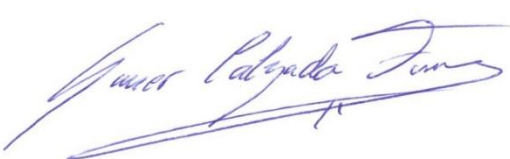

La Inteligencia Artificial ha sido empleada como herramienta de apoyo en las fases previas y de redacción del presente trabajo, en concreto para la lluvia de ideas y la exploración inicial de enfoques, la orientación bibliográfica de partida y la mejora de la redacción y el estilo (claridad, coherencia y corrección gramatical) de textos previamente elaborados por mí. En todos los casos, las propuestas generadas han sido revisadas y reelaboradas de forma crítica e independiente, siendo el contenido técnico, los resultados, el análisis y las conclusiones de elaboración íntegramente propia.



<sup>1</sup> Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Firmado (alumno): Elvira Atucha Lizasoain
Fecha:19/06/2026

**Autorización para la entrega del Proyecto**

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Javier Calzada Funes	Fdo: SUSANA ORTIZ MARCOS
Fecha: 19//16/2026	Fecha: 19-06/2026



## Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible la realización de este Trabajo de Fin de Máster.

En primer lugar, quiero agradecer de manera especial a Susana Ortiz y Javier Calzada por su dedicación, cercanía y apoyo constante a lo largo de todo el desarrollo del proyecto. Han estado siempre muy presentes, ayudándome en todo momento y brindándome su apoyo incluso más allá de lo esperado. Aprecio especialmente su disposición para impulsar y apoyar cualquier idea que se me ocurría, facilitándome todos los recursos que estaban en sus manos. Su implicación, confianza y orientación han sido fundamentales para poder avanzar y superar los retos encontrados durante este trabajo.

Asimismo, extiendo mi gratitud a mi universidad, por brindarme los recursos, el entorno académico y las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo, así como por fomentar un espacio de aprendizaje que combina el rigor técnico con la innovación aplicada.

A todos los que, de una u otra forma, han contribuido al desarrollo de este proyecto, mi más sincero reconocimiento.



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
MÁSTER DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo desarrolla una caracterización técnico-experimental de formulaciones alimentarias concentradas, validando su viabilidad para impresión 3D mediante extrusión sobre medio concentrado y ensayos de gelificación inspirados en la esferificación directa con alginato de sodio. Se diseña y valida una pieza bicomponente —base de compota de manzana gelificada y capa cremosa de cuajada estabilizada con goma xantana— y se evalúa su viabilidad técnica, sensorial, económica y ambiental, con especial atención a su aplicación en alimentación para personas con disfagia conforme al marco IDDSI.[18]

**Palabras clave:** Impresión 3D de alimentos, Fabricación aditiva, Esferificación directa, Alginato de sodio, Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Goma xantana, Disfagia.

### 1. Introducción

La fabricación aditiva ha extendido su aplicación al campo de la ingeniería alimentaria, configurando un área emergente orientada a la personalización de alimentos y la optimización de procesos productivos. La impresión 3D de alimentos por extrusión permite fabricar productos capa a capa con un control preciso de forma, textura y composición, resultando especialmente relevante en formulaciones concentradas, donde la viscosidad y el comportamiento reológico determinan la calidad del producto final.[1]

Este potencial cobra especial sentido frente a la disfagia —la dificultad para tragar—, un trastorno que afecta a entre 30 y 40 millones de europeos y al 36 % de las personas mayores de 65 años [22], y cuya prevalencia crecerá con el envejecimiento de la población. El tratamiento dietético habitual se basa en purés y triturados que, pese a ser nutricionalmente adecuados, resultan poco apetecibles e irreconocibles para el paciente, lo que reduce la ingesta, agrava el riesgo de malnutrición y deteriora su calidad de vida y su dignidad en el acto de comer. La impresión 3D de alimentos ofrece una solución directa a este problema: permite fabricar bajo demanda alimentos de textura segura y controlada —homogénea y sin grumos— con formas reconocibles y atractivas, devolviendo al paciente el placer y la autonomía de comer. Este enfoque hacia la alimentación adaptada para personas con disfagia constituye la motivación central del presente trabajo.

### 2. Definición del proyecto

El objetivo general es analizar la aplicación de la impresión 3D mediante extrusión sobre medios concentrados, identificando los factores que determinan la calidad, estabilidad y reproducibilidad del proceso. Para ello se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la influencia de los parámetros de impresión (presión, velocidad, diámetro de boquilla) sobre la precisión geométrica de formulaciones frutales concentradas.
- Determinar las condiciones óptimas de esferificación directa con alginato de sodio para obtener piezas con textura gomosa-elástica y buena integridad mecánica.

- Desarrollar y validar una formulación de cuajada con goma xantana apta para la deposición en segunda capa sobre estructuras gelificadas.
- Evaluar la viabilidad técnica, sensorial, económica y ambiental del proceso de impresión bicomponente resultante.
- Explorar la aplicabilidad de los resultados al diseño de alimentos para personas con disfagia, coherentes con las guías IDDSI.

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para la fase experimental se ha empleado la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer (véase Ilustración i), diseñada para la impresión de alimentos mediante extrusión de materiales de distinta viscosidad y dotada de dos cabezales independientes. El flujo de trabajo integró el diseño de las geometrías en Tinkercad, el laminado y la generación del código G en Simplify3D (perfil FELIX Food V1.6) y el ajuste iterativo y observacional de los parámetros de proceso.[14]



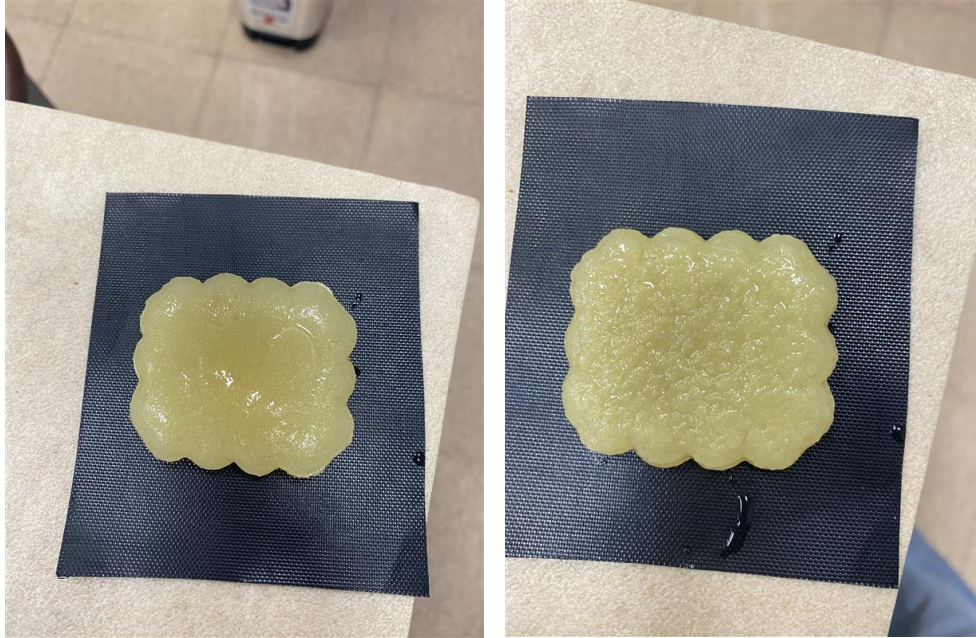
*Ilustración i – Impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.*

El desarrollo se estructuró en tres bloques experimentales: compota de manzana con goma xantana (Bloque I), compota con alginato de sodio gelificada mediante esferificación directa (Bloque II) y cuajada con goma xantana para la segunda capa (Bloque III). La esferificación directa se basa en la gelificación iónica del alginato en presencia de calcio: tras imprimir la pieza con la forma deseada, esta se sumerge en un baño de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), de modo que los iones  $\text{Ca}^{2+}$  reticulan las cadenas de alginato y forman en la superficie una membrana gelificada estable que confiere integridad estructural a la pieza [4][24]. A diferencia de la esferificación culinaria, aquí el objetivo no es producir esferas, sino dotar de cohesión y forma definida a un material que por sí solo no la mantiene. Complementariamente, se desarrolló una evaluación sensorial informal, un análisis de la huella de carbono y un análisis económico preliminar de costes unitarios.

### 4. Resultados

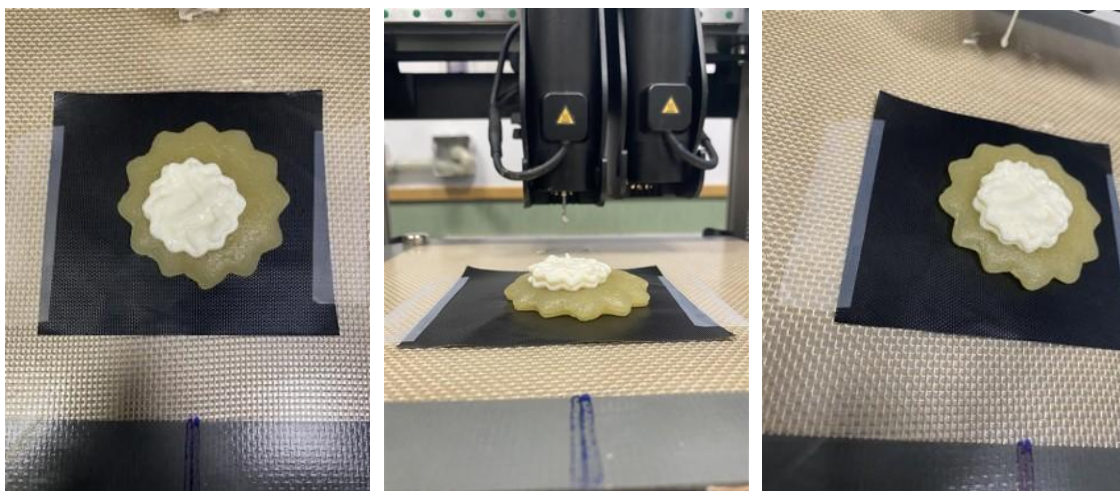
En el Bloque I se comprobó que el incremento de goma xantana y la reducción de la velocidad mejoran la estabilidad de las piezas, aunque resultan insuficientes para

mantener geometrías de bordes angulosos definidos. En el Bloque II se identificó el pH como variable dominante de la gelificación: el pH natural de la compota (3,82) es el factor clave para formar una membrana estable en presencia de calcio, siendo la combinación óptima 5 g/L de  $\text{CaCl}_2$  y 1,25 g/100 g de alginato, que da lugar a estructuras de comportamiento gomoso-elástico con buena integridad mecánica (véase Ilustración ii).



*Ilustración ii – Compota de manzana gelificada por esferificación directa con alginato de sodio.*

El Bloque III validó la fabricación de un sistema bicomponente mediante deposición secuencial, utilizando la estrella de compota gelificada como base estructural y una segunda capa de cuajada (0,3 % de goma xantana) depositada encima, con adhesión entre capas correcta y conservación de la geometría final (véase Ilustración iii).



*Ilustración iii – Pieza bicomponente final: cuajada (0,3 % xantana) sobre estrella de compota gelificada (condición de referencia).*

Desde el punto de vista ambiental, la huella de carbono estimada de la pieza bicomponente (~44 g  $\text{CO}_2\text{eq/unidad}$ ) resultó inferior a la de productos lácteos procesados

equivalentes (~60–80 g CO<sub>2</sub>eq), con la mayor contribución asociada a las materias primas (~74 %). Desde una perspectiva económica, partiendo de un coste estimado de ~0,78–1,06 € por pieza y una inversión inicial de 9.000 €, se modelizaron distintos escenarios de rentabilidad a precios de venta de 4 a 6 €/unidad. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Escenario	Precio (€/ud)	Beneficio bruto anual (€)	ROI (%)	Payback (años)
<b>Conservador (10 ud/día)</b>	4,00	6.500	72,2 %	1,4
<b>Base (10 ud/día)</b>	5,00	9.000	100,0 %	1,0
<b>Optimista (10 ud/día)</b>	6,00	11.500	127,8 %	0,8
<b>Base (20 ud/día)</b>	5,00	19.200	213,3 %	0,5

Tabla i – Escenarios de análisis de ROI y payback según precio de venta y volumen de producción.

Los resultados muestran que el sistema es económicamente viable en todos los escenarios considerados, con periodos de recuperación de la inversión comprendidos entre 0,5 y 1,4 años y retornos sobre la inversión (ROI) entre el 72,2 % y el 213,3 %. La rentabilidad resulta especialmente atractiva en aplicaciones de nutrición clínica y catering hospitalario, donde la personalización y el valor nutricional añadido justifican precios de venta más elevados.

## 5. Conclusiones

Los resultados confirman que la impresión 3D de alimentos mediante extrusión sobre medios concentrados es una tecnología viable para fabricar estructuras bicomponente con textura controlada, homogénea y sin grumos, coherentes con los niveles 5 y 6 del marco IDDSI [18]. La *imprimibilidad* depende de manera crítica del comportamiento reológico del material y del ajuste de los parámetros de proceso, mientras que el pH gobierna la gelificación con alginato. La combinación de una base elástica y una capa cremosa mejora tanto la seguridad en la deglución como la aceptabilidad sensorial, abriendo una línea de aplicación directa en alimentación adaptada para personas con disfagia que merece validación clínica sistemática.

El trabajo presenta un perfil ambiental favorable y se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), al fomentar modelos de fabricación eficientes y bajo demanda, y el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al impulsar soluciones tecnológicas avanzadas. Como limitaciones, se reconoce la ausencia de caracterización reológica instrumental y de análisis estadístico formal de reproducibilidad, identificadas como líneas prioritarias de trabajo futuro.

## 6. Referencias

[1] Sun, J. et al. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Academic Press, 2019.

[4] Ruiz-Sánchez, J. C. et al. «Impresión de biotintas con alginato: reología y aplicaciones en fabricación aditiva de alimentos», *Revista de Plásticos Modernos*, vol. 124, 2022.

[14] FELIXfood. «FELIX Food 1.6 Switch Head – Especificaciones técnicas y precio». Disponible en: <https://felixfood.nl/felix-food-1-6-switch-head>.

[18] IDDSI, «IDDSI Framework: Detailed Definitions 2.0», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://iddsi.org>.

[24] Hu, C., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., Fang, Y. "Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications." *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 578–588, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.086>

# TECHNICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF 3D FOOD PRINTING BY EXTRUSION ON CONCENTRATED MEDIA: BICOMPONENT STRUCTURES FOR DYSPHAGIA-ADAPTED FOOD

**Author:** Atucha Lizasoain, Elvira.

**Supervisor:** Calzada Funes, Javier.

**Co-Supervisor:** Ortiz Marcos, Susana.

**Collaborating Entity:** ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## ABSTRACT

This work develops a technical-experimental characterization of concentrated food formulations, validating their feasibility for 3D printing through extrusion on concentrated media and gelation tests inspired by direct spherification with sodium alginate. A bicomponent piece is designed and validated—a gelled apple-compote base and a creamy curd layer stabilized with xanthan gum—and its technical, sensory, economic, and environmental feasibility is assessed, with particular attention to its application in food for people with dysphagia in accordance with the IDDSI framework. [18]

**Keywords:** 3D Food Printing, Additive Manufacturing, Direct Spherification, Sodium Alginate, Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Xanthan Gum, Dysphagia.

## 1. Introduction

Additive manufacturing has extended its application to the field of food engineering, shaping an emerging area oriented towards food personalization and the optimization of production processes. Extrusion-based 3D food printing enables products to be manufactured layer by layer with precise control of shape, texture, and composition, and it is especially relevant for concentrated formulations, where viscosity and rheological behaviour determine the quality of the final product.[1]

This potential is particularly meaningful in the context of dysphagia—difficulty swallowing—, a disorder affecting between 30 and 40 million Europeans and 36 % of people over 65 [22], whose prevalence will increase with population ageing. The usual dietary treatment relies on purées and mashed foods that, although nutritionally adequate, are unappetising and unrecognisable to the patient, reducing intake, aggravating the risk of malnutrition, and undermining quality of life and the dignity of eating. 3D food printing offers a direct solution to this problem: it allows the on-demand manufacturing of food with safe, controlled texture—homogeneous and lump-free—in recognisable, appealing shapes, restoring the patient's pleasure and autonomy when eating. This focus on adapted food for people with dysphagia is the central motivation of this work.

## 2. Project definition

The general objective is to analyse the application of extrusion-based 3D printing on concentrated media, identifying the factors that determine the quality, stability, and

reproducibility of the process. To this end, the following specific objectives have been defined:

- To evaluate the influence of printing parameters (pressure, speed, nozzle diameter) on the geometric precision of concentrated fruit formulations.
- To determine the optimal conditions for direct spherification with sodium alginate in order to obtain pieces with a gummy-elastic texture and good mechanical integrity.
- To develop and validate a curd formulation with xanthan gum suitable for second-layer deposition on gelled structures.
- To assess the technical, sensory, economic, and environmental feasibility of the resulting bicomponent printing process.
- To explore the applicability of the results to the design of food for people with dysphagia, consistent with the IDDSI guidelines.

### 3. Description of the model/system/tool

For the experimental phase, the FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer was used (see Illustration i), specifically designed for printing food through the extrusion of materials of different viscosities and equipped with two independent printheads. The workflow integrated the design of the geometries in Tinkercad, slicing and G-code generation in Simplify3D (FELIX Food V1.6 profile), and the iterative, observational adjustment of the process parameters. [14]



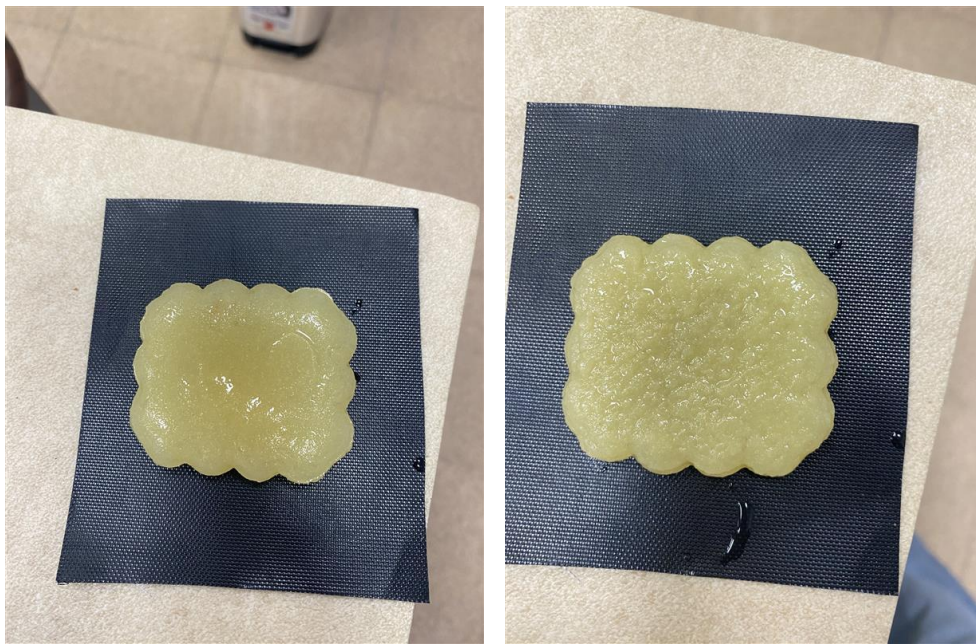
*Illustration i – FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.*

The work was structured into three experimental blocks: apple compote with xanthan gum (Block I), compote with sodium alginate gelled through direct spherification (Block II), and curd with xanthan gum for the second layer (Block III). Direct spherification relies on the ionic gelation of alginate in the presence of calcium: after the piece is printed in the desired shape, it is immersed in a calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) bath, so that  $\text{Ca}^{2+}$  ions cross-link the alginate chains and form a stable gelled membrane on the surface that gives the piece structural integrity [4][24]. Unlike culinary spherification, the goal here is not to produce spheres but to provide cohesion and a defined shape to a

material that cannot retain it on its own. Additionally, an informal sensory evaluation, a carbon-footprint analysis, and a preliminary economic analysis of unit costs were carried out.

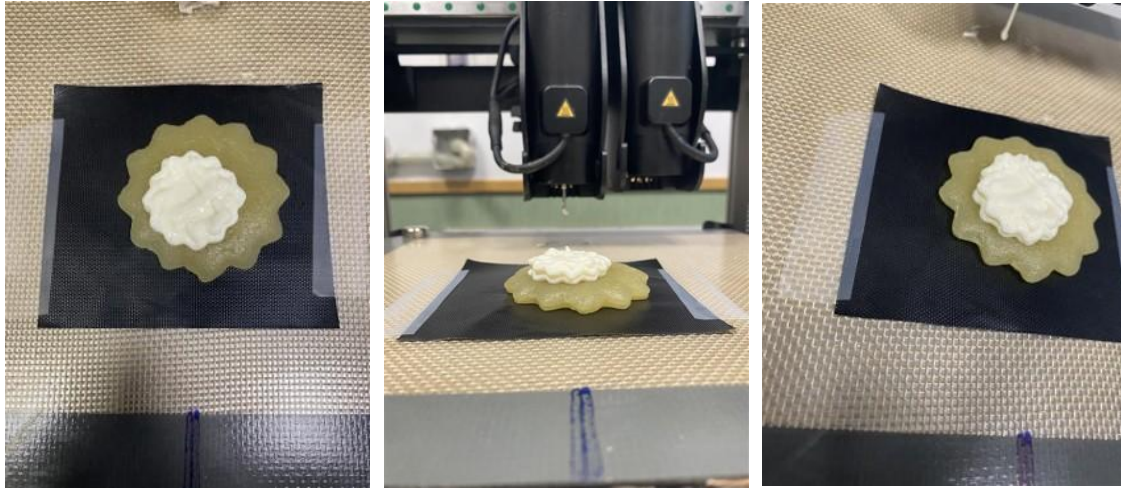
#### 4. Results

In Block I, it was found that increasing xanthan gum and reducing speed improve the stability of the printed pieces, although they are insufficient to maintain geometries with sharp, well-defined edges. In Block II, pH was identified as the dominant variable of gelation: the natural pH of the compote (3.82) is the key factor enabling the formation of a stable membrane in the presence of calcium, with the optimal combination being 5 g/L of  $\text{CaCl}_2$  and 1.25 g/100 g of alginate, which yields structures with gummy-elastic behaviour and good mechanical integrity (see Illustration ii).



*Illustration ii – Apple compote gelled by direct spherification with sodium alginate.*

Block III validated the manufacturing of a bicomponent system through sequential deposition, using the gelled compote star as the structural base and a second layer of curd (0.3 % xanthan gum) deposited on top, with correct interlayer adhesion and preservation of the final geometry (see Illustration iii).



*Illustration iii – Final bicomponent piece: curd (0.3 % xanthan) on a gelled compote star (reference condition).*

From an environmental standpoint, the estimated carbon footprint of the bicomponent piece (~44 g CO<sub>2</sub>eq/unit) was lower than that of equivalent processed dairy products (~60–80 g CO<sub>2</sub>eq), with the largest contribution associated with raw materials (~74 %). From an economic perspective, starting from an estimated cost of ~0,78–1,06 € per piece and an initial investment of 9,000 €, different profitability scenarios were modelled at selling prices of 4 to 6 €/unit. The results obtained are summarised in the following table:

Scenario	Price (€/unit)	Annual gross profit (€)	ROI (%)	Payback (years)
<b>Conservative (10 units/day)</b>	4,00	6.500	72,2 %	1,4
<b>Base (10 units/day)</b>	5,00	9.000	100,0 %	1,0
<b>Optimistic (10 units/day)</b>	6,00	11.500	127,8 %	0,8
<b>Base (20 units/day)</b>	5,00	19.200	213,3 %	0,5

*Table i – ROI and payback analysis scenarios by selling price and production volume.*

The results show that the system is economically viable in all the scenarios considered, with investment payback periods ranging from 0.5 to 1.4 years and returns on investment (ROI) between 72.2 % and 213.3 %. Profitability is particularly attractive in clinical-nutrition and hospital-catering applications, where personalization and added nutritional value justify higher selling prices.

## 5. Conclusions

The results confirm that extrusion-based 3D food printing on concentrated media is a viable technology for manufacturing bicomponent structures with controlled,

homogeneous, lump-free texture, consistent with levels 5 and 6 of the IDDSI framework [18]. Printability depends critically on the rheological behaviour of the material and the adjustment of the process parameters, while pH governs gelation with alginate. The combination of an elastic base and a creamy layer improves both swallowing safety and sensory acceptability, opening a line of direct application in adapted food for people with dysphagia that warrants systematic clinical validation.

The work presents a favourable environmental profile and is aligned with the Sustainable Development Goals, in particular SDG 12 (Responsible Consumption and Production), by promoting efficient, on-demand manufacturing models, and SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), by driving advanced technological solutions. As limitations, the absence of instrumental rheological characterization and of formal statistical analysis of reproducibility is acknowledged, both identified as priority lines of future work.

## 6. References

[1] Sun, J. et al. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Academic Press, 2019.

[4] Ruiz-Sánchez, J. C. et al. «Printing of alginate bioinks: rheology and applications in additive manufacturing of food», *Revista de Plásticos Modernos*, vol. 124, 2022.

[14] FELIXfood. «FELIX Food 1.6 Switch Head – Technical specifications and price». Available at: <https://felixfood.nl/felix-food-1-6-switch-head>.

[18] IDDSI, «IDDSI Framework: Detailed Definitions 2.0», 2019. [Online]. Available at: <https://iddsi.org>.

[24] Hu, C., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., Fang, Y. "Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications." *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 578–588, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.086>

## *Índice de la memoria.*

1.	Introducción.....	6
2.	Estado de la cuestión .....	9
3.	Motivación.....	11
3.1.	Motivación técnica .....	11
3.2.	La disfagia como oportunidad de aplicación.....	11
3.3.	Objetivos del proyecto .....	13
4.	Metodología del trabajo.....	14
5.	Recursos empleados .....	17
5.1.	Equipamiento.....	17
5.2.	Software.....	17
5.3.	Materiales de ensayo.....	17
6.	Desarrollo experimental .....	19
6.1.	Fundamento teórico.....	19
6.1.1.	Preparación geométrica: geometría de galleta en <i>Simplify3D</i> .....	19
6.1.2.	Ensayo E-X-01: 49 g compota / 1 g goma xantana .....	22
6.1.3.	Ensayo E-X-02: 4 g de goma xantana / 46 g compota .....	25
6.2.	Bloque II: Esferificación directa con alginato de sodio .....	28
6.2.1.	Fundamento teórico.....	28
6.2.2.	Diseño experimental.....	29
6.2.3.	Ensayo previo: primera impresión con fallo de software .....	29
6.2.4.	Resultados detallados por ensayo .....	30
6.2.5.	Preparación geométrica: geometría de estrella en <i>Simplify3D</i> .....	34
6.2.6.	Ensayos con geometría de estrella.....	37
6.2.7.	Análisis comparativo de variables y resumen .....	38
6.2.8.	Ensayo con leche como baño de calcio .....	39
6.3.	Ensayo exploratorio: esferificación directa con zumo de melocotón.....	40
6.3.1.	Motivación y planteamiento .....	40
6.3.2.	Resultados .....	40
6.4.	Bloque III: Impresión de cuajada con goma xantana sobre estructura gelificada 41	
6.4.1.	Fundamento y planteamiento .....	41
6.4.2.	Optimización de la formulación de cuajada .....	41
6.4.3.	Preparación geométrica: estrella de cuajada en <i>Simplify3D</i> .....	42
6.4.4.	Ensayos de geometría y tamaño .....	45
6.4.5.	Primera impresión combinada: cuajada sobre compota en galleta .....	47
6.4.6.	Ensayo combinado final: cuajada sobre estrella gelificada .....	48
6.5.	Análisis de fidelidad dimensional .....	49

6.5.1.	Metodología .....	49
6.6.	Evaluación sensorial de la pieza bicomponente .....	50
6.7.	Seguridad alimentaria e higiene del proceso .....	51
6.7.1.	Marco normativo aplicable.....	51
6.7.2.	Puntos críticos de control higiénico .....	51
6.8.	Análisis medioambiental y alineación con los ODS .....	52
6.8.1.	Huella de carbono estimada .....	52
6.8.2.	Alineación con los ODS .....	53
6.9.	Estudio de viabilidad económica .....	55
6.9.1.	Análisis de incidencias técnicas .....	56
6.9.2.	Parámetros de proceso ( <i>Simplify3D</i> ) .....	57
6.9.3.	Tiempos de impresión medidos experimentalmente .....	58
6.9.4.	Costes de materias primas .....	59
6.9.5.	Coste energético de la impresión.....	61
6.9.6.	Amortización del equipo .....	61
6.9.7.	Resumen de costes por pieza.....	62
6.9.8.	Escenario con <i>Fresubin 2kcal Crème</i> como segunda capa.....	62
6.9.9.	Análisis de escalabilidad .....	63
6.9.10.	Análisis de viabilidad comercial: ingresos, ROI y payback .....	65
6.9.11.	ROI y período de payback.....	67
7.	Conclusiones y trabajos futuros.....	69
7.1.	Conclusiones .....	69
7.2.	Limitaciones del estudio .....	70
7.3.	Trabajos futuros .....	71
Bibliografía		73

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Principales modalidades de impresión 3D de alimentos y clasificación de tecnologías de deposición. Fuente: [1].	7
<b>Figura 2:</b> Esquema y montaje experimental de un sistema de extrusión coaxial utilizado en impresión 3D de alimentos. Se muestra la sección de la boquilla con flujo colateral de $\text{CaCl}_2$ para la gelificación del material. Fuente: [1].	15
<b>Figura 3:</b> Principales mecanismos de extrusión en la impresión 3D de alimentos: (A) por jeringa, (B) por aire comprimido y (C) por tornillo sinfín. Fuente:[1].	15
<b>Figura 4:</b> Impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer empleada en los ensayos experimentales. Fuente: [14].	16
<b>Figura 5:</b> Modelo CAD de la galleta de compota	20
<b>Figura 6:</b> Previsualización de capas de la galleta de compota	21
<b>Figura 7:</b> Previsualización superior de la galleta de compota	21
<b>Figura 8:</b> Mezcla de compota con goma xantana	22
<b>Figura 9:</b> Modelo CAD de la geometría flor-pétalo en Simplify3D. La geometría flor_petalo_pequeno cargada sobre la cama de impresión antes del proceso de laminado.	23
<b>Figura 10:</b> Laminado de la geometría flor-pétalo, vista superior. Se distinguen el perímetro exterior (azul) y la extrusión interna (verde). Dimensiones: $26,00 \times 35,99$ mm; peso estimado: 1,50 g; tiempo estimado: 1 min.	23
<b>Figura 11:</b> Laminado de la geometría flor-pétalo, vista frontal. Disposición de las dos capas de deposición sobre la cama de impresión.	24
<b>Figura 12:</b> Resultado del Ensayo E-X-01	24
<b>Figura 13 :</b> Comparativa de formulación y resultado de impresión de Ensayo E-X-02	25
<b>Figura 14:</b> Efecto de la superficie y método de deposición de Ensayo E-X-02	26
<b>Figura 15:</b> Vista frontal de la impresión sobre film negro (izquierda) y vista superior de la galleta sin film negro(derecha).	26
<b>Figura 16:</b> Vista frontal de la pieza de compota con alginato en geometría de galleta.	27
<b>Figura 17:</b> Comparativa de las dos caras de la compota gelificada.	27
<b>Figura 18:</b> Prueba preliminar de esferificación directa.	28
<b>Figura 19:</b> Ensayo previo interrumpido por fallo de software.	29
<b>Figura 20:</b> Ensayo 1: pieza recién impresa; en el baño de $\text{CaCl}_2$ ; descompuesta. La baja concentración de alginato y el pH ácido impidieron la gelificación.	30
<b>Figura 21:</b> Ensayo 2: pieza recién impresa; sumergida en 5 g/L $\text{CaCl}_2$ ; descompuesta. El incremento de calcio no compensó el efecto inhibitorio del pH 2,5.	31
<b>Figura 22:</b> Ensayo 3: pieza recién impresa (izquierda); en el baño separada del film (derecha). Primera gelificación exitosa con pH natural de la compota.	31
<b>Figura 23:</b> Ensayo 4: pieza en el baño (izquierda); deshecha tras varios minutos (derecha). El mayor alginato no compensó el pH 2,5.	32

<b>Figura 24:</b> Ensayo 5: pieza recién impresa (izquierda); en el baño separada del film (derecha). Gelificación correcta pero pieza muy frágil.....	32
<b>Figura 25:</b> Ensayo 6 — estado inicial. Pieza recién impresa con separación de fases inicial (izquierda); recién sumergida sin endurecimiento (derecha). .....	33
<b>Figura 26:</b> Ensayo 6 — resultado. Desintegración parcial al separar del film (izquierda); pieza completamente rota (derecha). El pH 2,5 impidió la formación de membrana estable. ....	33
<b>Figura 27:</b> Ensayo 7 (interrumpido por fallo de software). Los bordes presentan membrana gelificada parcial. La baja concentración de calcio (1 g/L) fue el factor limitante.....	34
<b>Figura 28:</b> Vista general del modelo de estrella de compota en Simplify3D (modo render).....	35
<b>Figura 29:</b> Vista frontal con previsualización de capas — estrella de compota. ....	36
<b>Figura 30:</b> Vista desde arriba con previsualización de capas — estrella de compota. ....	36
<b>Figura 31:</b> Primera estrella impresa: vista superior (izquierda); vista frontal (centro); pieza sumergida en el baño de CaCl <sub>2</sub> (derecha).....	37
<b>Figura 32:</b> Estrella tras la esféricación directa, separada del film (izquierda).....	37
<b>Figura 33:</b> Izquierda: comparación compota original vs. compota con alginato (mayor brillo). Derecha: pieza gelificada en leche vs. compota original.....	39
<b>Figura 34:</b> Esféricación directa de zumo de melocotón. ....	40
<b>Figura 35:</b> Cuajada con goma xantana (500 g + 1,5 g xantana) recién preparada en batidora. ....	41
<b>Figura 36:</b> Vista general del modelo de estrella de cuajada en Simplify3D (modo render). ....	43
<b>Figura 37:</b> Vista frontal con previsualización de capas — estrella de cuajada (49 × 49 mm). ....	43
<b>Figura 38:</b> Vista superior con previsualización de capas — estrella de cuajada.....	44
<b>Figura 39:</b> Vista lateral de la estrella de cuajada en Simplify3D. ....	44
<b>Figura 40:</b> Ensayos de geometría de cuajada. ....	45
<b>Figura 41:</b> Cuajada con 500 g + 1,5 g de goma xantana (0,3% m/m) impresa en forma de estrella .....	46
<b>Figura 42:</b> Medición de altura y base de compota .....	47
<b>Figura 43:</b> Primera impresión combinada: cuajada sobre compota gelificada en galleta. ....	47
<b>Figura 44:</b> Pieza bicomponente final: cuajada (0,3% xantana) sobre estrella de compota gelificada (condición de referencia). ....	48

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> <i>Formulación base y variables del diseño experimental de esferificación directa.</i> .....	29
<b>Tabla 2:</b> <i>Resumen de la matriz de ensayos de esferificación directa. ★ = condición de referencia.</i> .....	38
<b>Tabla 3:</b> <i>Evaluación sensorial informal de las distintas condiciones de la compota con alginato.</i> .....	39
<b>Tabla 4:</b> <i>Parámetros de impresión de la formulación de cuajada con goma xantana.</i> .....	42
<b>Tabla 5:</b> <i>Análisis dimensional comparativo de las piezas impresas.</i> .....	49
<b>Tabla 6:</b> <i>Evaluación sensorial informal. Escala hedónica 1–5.</i> .....	50
<b>Tabla 7:</b> <i>Puntos críticos de control higiénico del proceso de impresión 3D de alimentos.</i> .....	51
<b>Tabla 8:</b> <i>Estimación de la huella de carbono por unidad de producto. Potencia nominal FELIX Food 1.6: 250 W. Factor eléctrico mix español 2024 según REE [19].</i> .....	52
<b>Tabla 9:</b> <i>Alineación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.</i> .....	53
<b>Tabla 10:</b> <i>Parámetros de impresión extraídos de Simplify3D (perfil FELIX Food VI.6).</i> .....	57
<b>Tabla 11:</b> <i>Tiempos de impresión medidos experimentalmente.</i> .....	58
<b>Tabla 12:</b> <i>Precio por gramo de cada ingrediente, calculado a partir de los precios de adquisición reales en laboratorio.</i> .....	59
<b>Tabla 13:</b> <i>Coste de materia prima por pieza bicomponente (compota gelificada + cuajada con xantana). No incluye mano de obra, energía ni amortización del equipo.</i> .....	60
<b>Tabla 14:</b> <i>Coste energético de la impresión calculado con datos reales (potencia nominal 250 W; tiempos medidos experimentalmente).</i> .....	61
<b>Tabla 15:</b> <i>Resumen de costes directos por pieza bicomponente (estrella). No incluye mano de obra ni costes indirectos de laboratorio.</i> .....	62
<b>Tabla 16:</b> <i>Comparativa de costes entre la formulación actual (cuajada) y el escenario con Fresubin 2kcal Crème. * Incluye materia prima y amortización; sin mano de obra.</i> .....	62
<b>Tabla 17:</b> <i>Estimación de la evolución del coste unitario en función del volumen de producción.</i> .....	63
<b>Tabla 18:</b> <i>Análisis de escenarios: ingresos, costes, beneficio y rentabilidad anuales.</i> .....	66
<b>Tabla 19:</b> <i>ROI y período de payback por escenario.</i> .....	67

# 1. Introducción

El avance de las tecnologías de fabricación aditiva ha permitido extender su aplicación al campo de la ingeniería alimentaria, configurando un área emergente de investigación orientada a la personalización de alimentos y la optimización de procesos productivos. La impresión tridimensional de alimentos, y en particular la basada en extrusión por jeringa o pistón posibilita la fabricación de productos alimentarios capa a capa con un control preciso de forma, textura y composición. Esta técnica resulta especialmente relevante en formulaciones concentradas, donde la viscosidad, la plasticidad y el comportamiento reológico determinan en gran medida la calidad del producto final.

El principio de funcionamiento de la impresión 3D de alimentos por extrusión comparte fundamentos con las impresoras de filamento plástico: un modelo CAD tridimensional es "diseñado por capas" por un software específico (como *Simplify3D*) que genera las trayectorias de deposición capa a capa, y el material alimentario es extruido a través de una boquilla de precisión sobre una superficie receptora. La diferencia esencial reside en que el material de trabajo no es un polímero termoplástico sino un alimento con comportamiento reológico complejo —pseudoplástico, viscoelástico o gelificable— que debe reunir condiciones de fluidez durante la extrusión y de cohesión estructural inmediatamente tras el depósito.

En las últimas décadas, la fabricación aditiva ha experimentado un crecimiento exponencial, extendiendo su aplicación desde sectores industriales tradicionales —como la automoción o la aeroespacial— hacia ámbitos emergentes como la biomedicina y la ingeniería alimentaria. Esta evolución responde a la creciente necesidad de sistemas productivos más flexibles, sostenibles y orientados a la personalización.

En el sector alimentario, esta tendencia adquiere especial relevancia en un contexto marcado por desafíos globales como aquellos derivados del envejecimiento de la población, la necesidad de dietas personalizadas y la reducción del desperdicio alimentario. La impresión 3D de alimentos permite abordar estos retos mediante la fabricación bajo demanda de productos adaptados tanto en composición como en textura, abriendo nuevas posibilidades en ámbitos como la nutrición clínica, la alta gastronomía o la alimentación funcional.

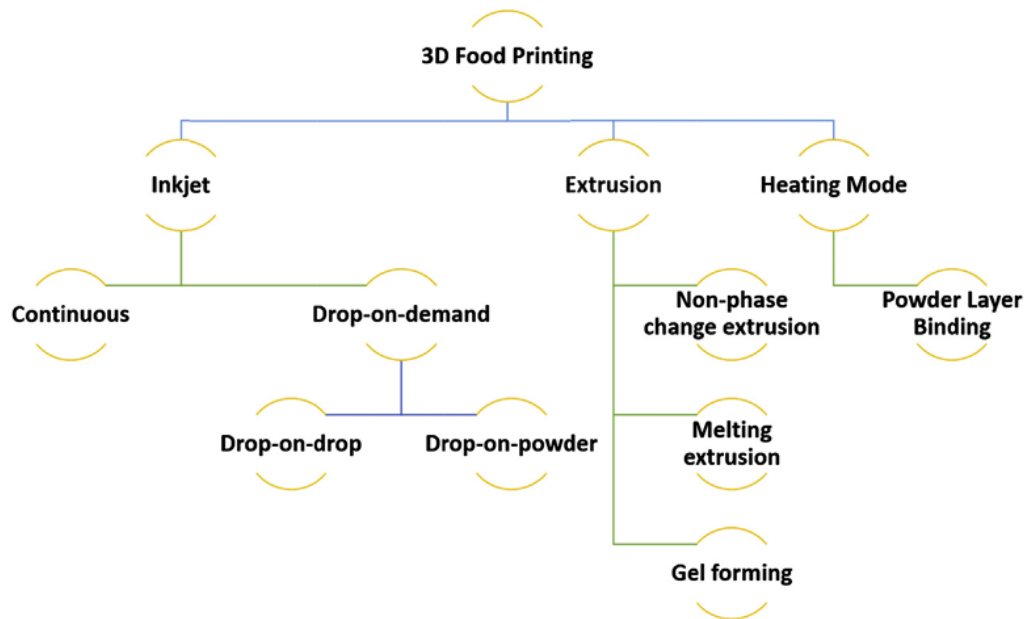
A diferencia de los procesos convencionales de transformación alimentaria, la fabricación aditiva introduce un cambio de paradigma: el alimento deja de ser producido en masa para convertirse en un producto diseñado digitalmente, cuya estructura, composición y propiedades sensoriales pueden controlarse con precisión. Esta capacidad convierte a la impresión 3D en una herramienta estratégica para el desarrollo de soluciones innovadoras en alimentación personalizada.

A pesar de su elevado potencial, la impresión 3D de alimentos presenta todavía importantes limitaciones que dificultan su implantación generalizada. Entre ellas destacan

la variabilidad en el comportamiento de los materiales alimentarios, la baja reproducibilidad del proceso, la limitada velocidad de fabricación y la necesidad de formulaciones altamente específicas para cada aplicación. Estas restricciones evidencian que, si bien la tecnología ha avanzado significativamente, su consolidación requiere todavía un mayor desarrollo experimental y metodológico.

En este contexto, resulta especialmente relevante profundizar en el estudio de formulaciones sencillas y accesibles, así como en la comprensión de la relación entre propiedades del material y parámetros de proceso, aspectos que constituyen el núcleo del presente trabajo.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar de forma experimental la impresión 3D de alimentos mediante extrusión sobre medios concentrados, abordando la relación entre las propiedades de los materiales imprimibles y los parámetros operativos del proceso. Para ello se emplea la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head, disponible en el laboratorio de la ETSI-ICAI, con capacidad para procesar pastas, geles y emulsiones de media-elevada densidad.



**Figura 1:** Principales modalidades de impresión 3D de alimentos y clasificación de tecnologías de deposición. Fuente: [1].

El proyecto establece un marco experimental y metodológico que permite evaluar de manera cuantitativa la capacidad de ser fabricado correctamente mediante tecnología de fabricación aditiva, estabilidad y reproducibilidad de diferentes formulaciones alimentarias, contribuyendo al desarrollo de criterios técnicos aplicables tanto en

investigación como en la industria alimentaria y en contextos clínicos especializados como la alimentación para personas con disfagia.

## 2. Estado de la cuestión

La impresión 3D de alimentos se fundamenta en la deposición controlada de material comestible a través de una boquilla, siguiendo trayectorias definidas mediante un modelo CAD. El principal desafío reside en lograr que el material fluya adecuadamente durante la extrusión y mantenga su forma tras el depósito. Este comportamiento depende fundamentalmente de la reología, la composición y la temperatura del material.

En la bibliografía disponible sobre los fundamentos del proceso destaca la obra *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications* [1], donde se analizan las principales tecnologías de impresión empleadas en el ámbito alimentario y los factores que condicionan la precisión geométrica y la calidad del producto. Los primeros estudios sistemáticos establecieron que los materiales con comportamiento pseudoplástico y módulo elástico ( $G'$ ) superior al módulo viscoso ( $G''$ ) presentan mayor capacidad de auto-soporte, rango que corresponde aproximadamente a viscosidades comprendidas entre  $10^2$  y  $10^4$  Pa·s.

En los últimos años la investigación se ha diversificado hacia el estudio de matrices específicas. Rahman et al. [2] analizaron geles de agar y *konjac*, estableciendo que las formulaciones con comportamiento *shear thinning* y viscosidades en el rango mencionado son óptimas para la extrusión estable. Chen et al. [3] introdujeron proteínas vegetales en matrices frutales, logrando mejorar la cohesión y la fidelidad geométrica, y demostrando la influencia directa de la composición y la estructura molecular sobre la extruibilidad.

El comportamiento del alginato de sodio ha sido ampliamente estudiado [4][24]: la relación manurónico/gulurónico y la concentración de  $Ca^{2+}$  determinan la formación de redes gelificadas capaces de mantener la forma del producto. Los trabajos sobre sistemas basados en almidón [5][6] ampliaron este conocimiento, estableciendo correlaciones entre el grado de gelatinización, la proporción de amilosa y la calidad de impresión. En el caso de formulaciones de patata, Jantrawut et al. [7] demostraron que la proporción sólido/líquido y el tamaño de boquilla condicionan la geometría y precisión de las piezas impresas, proponiendo modelos de correlación entre los parámetros reológicos ( $K$  y  $n$ , donde  $K$  es el índice de consistencia (Pa·s), que cuantifica la resistencia del fluido a la deformación, y  $n$  es el índice de comportamiento al flujo, adimensional, que indica si el material es pseudoplástico ( $n < 1$ , habitual en alimentos), newtoniano ( $n = 1$ ) o dilatante ( $n > 1$ ), según el modelo de la Ley de Potencia) y la fidelidad dimensional.

En las matrices frutales concentradas, Molina-Montero et al. [8] estudiaron geles de albaricoque con diferentes contenidos de pulpa, observando que las formulaciones con un 70% de sólidos presentaban mayor módulo elástico y menor colapso estructural. En

este contexto, el módulo elástico hace referencia al módulo de almacenamiento  $G'$ , obtenido mediante reología oscilatoria de pequeña amplitud, que cuantifica la componente elástica del material; no debe confundirse con el módulo de Young  $E$ , propio de sólidos elásticos lineales. Por otro lado, el chocolate ha sido objeto de múltiples investigaciones recientes [9][10][11]. En general, las revisiones recientes [12] recopilan los avances más significativos en la impresión de alimentos y su proyección hacia sistemas con estímulos externos —temperatura, humedad, pH, luz UV o campos magnéticos— (impresión 4D), situando la tecnología en un contexto de transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y personalizados.

A pesar de los avances recogidos en la literatura, persisten diversas lagunas en el estudio de la impresión 3D de alimentos. En particular, existe una falta de estudios experimentales centrados en formulaciones concentradas de base sencilla, como matrices frutales comerciales, así como en la validación de procesos de fabricación multicapa sin control térmico complejo. Asimismo, la mayoría de los trabajos analizan las propiedades reológicas de forma aislada, sin integrar de manera sistemática su efecto en el comportamiento real durante la deposición.

Estas limitaciones ponen de manifiesto la necesidad de enfoques experimentales que conecten directamente la formulación, el proceso de impresión y el resultado final, aspecto que constituye el eje central del presente trabajo.

## **3. Motivación**

### **3.1. Motivación técnica**

El presente proyecto responde a la necesidad de profundizar en la relación entre las propiedades reológicas de los materiales alimentarios y su comportamiento durante la impresión 3D. Si bien la investigación científica ha avanzado notablemente, todavía existen limitaciones en la aplicación práctica a medios concentrados, donde pequeñas variaciones en composición o temperatura pueden comprometer la calidad del producto. Cabe precisar que en este trabajo no se realiza una caracterización reológica instrumental completa, sino que los parámetros de formulación se ajustaron de forma iterativa y observacional durante los propios ensayos de impresión.

La elección de la compota de manzana como material base para los primeros ensayos no fue arbitraria. Inicialmente se planteó como una formulación frutal concentrada de comportamiento reológico conocido, de bajo coste y fácilmente disponible para tantear las capacidades de la impresora. Sin embargo, durante los primeros ensayos con goma xantana, la observación de la textura resultante —gomosa, homogénea, ni sólida ni líquida— coincidió con una serie de contenidos que aparecían en el entorno digital sobre alimentación para personas con disfagia. Esa confluencia fue el detonante que orientó el trabajo hacia una aplicación con verdadero impacto social. Este potencial impacto social en colectivos vulnerables con disfagia constituye la motivación central de este trabajo y se describe en detalle en la introducción.

A pesar del creciente interés en la impresión 3D de alimentos, gran parte de los estudios existentes se centran en matrices bien caracterizadas o en condiciones altamente controladas, alejadas de entornos experimentales sencillos y accesibles. Existe, por tanto, un vacío en la literatura en relación con el uso de formulaciones concentradas de base común y bajo coste, así como en la validación experimental de sistemas multicapa con propiedades texturales diferenciadas.

Este trabajo se sitúa precisamente en esa intersección, explorando un enfoque experimental accesible que permita comprender de forma práctica las limitaciones y oportunidades reales de la tecnología.

### **3.2. La disfagia como oportunidad de aplicación**

La disfagia —dificultad en la deglución— constituye uno de los problemas fisiológicos y de calidad de vida más prevalentes entre la población mayor y entre pacientes con determinadas patologías neurológicas o degenerativas. Según datos de la Fundació de Recerca en Gastroenterologia (FUREGA), la disfagia afecta a entre 30 y 40 millones de europeos, y el 36% de la población mayor de 65 años presenta algún grado de disfunción deglutoria. Las proyecciones demográficas del Eurostat prevén que el

número de personas mayores de 80 años se duplicará en Europa hacia el año 2100, lo que anticipa un incremento significativo de la prevalencia (FUREGA, 2022; Eurostat, 2023).

El impacto clínico y económico es igualmente relevante: un paciente con disfagia que desarrolla malnutrición asociada permanece entre 2,7 y 5,7 días más hospitalizado que un paciente bien nutrido, con un sobrecoste estimado de entre 1.037 y 3.335 euros por estancia [13]. Este sobrecoste se explica por la confluencia de varios factores: la mayor duración del ingreso, la necesidad de soporte nutricional especializado —enteral o parenteral—, el mayor riesgo de complicaciones graves como la neumonía aspirativa, y los costes adicionales asociados a dietas de textura modificada. Más allá del coste económico, la disfagia tiene consecuencias graves sobre la calidad de vida: ansiedad, aislamiento social y pérdida de autoestima. El 36% de los pacientes hospitalizados con disfagia refiere haber sufrido episodios de ansiedad y pánico asociados al acto de comer, y un porcentaje equivalente evita comer acompañado para no mostrar sus dificultades.

El tratamiento dietético convencional se basa en purés, triturados y alimentos de textura modificada, que, si bien aportan los nutrientes necesarios, presentan problemas evidentes de *apetecibilidad*, reconocimiento del alimento y experiencia sensorial. Los pacientes no ven en su plato lo que esperan comer; comen de forma distinta al resto, lo que incrementa el aislamiento y, en muchos casos, reduce la adherencia al seguimiento terapéutico.

En este contexto, la impresión 3D de alimentos emerge como una solución genuinamente disruptiva. Al permitir fabricar alimentos de textura controlada —ni líquida ni sólida, homogénea y sin grumos— con formas reconocibles y atractivas, la tecnología puede devolver al paciente con disfagia la dignidad del acto de comer. Proyectos pioneros como NutriAlth3D (Fundación Althaia, Manresa) han demostrado que es posible imprimir platos completos —incluyendo una galleta María, una lasaña de verduras, un *suquet* de *peix*— con textura segura y aspecto apetecible, obteniendo reacciones muy positivas en los primeros ensayos con pacientes reales. El investigador principal, el Dr. Bartomeu Ayala, describe la primera prueba con residentes: "los participantes volvían a comer; algunos comían por primera vez algunos de los alimentos ofrecidos; querían comer así cada día" [20].

La comunidad científica internacional ha reconocido el potencial de esta aplicación. Un equipo de la Universidad del Oeste de Inglaterra (UWE Bristol), liderado por el Dr. Alexandros Stratakos, ha desarrollado el primer alimento multingrediente impreso en 3D específicamente diseñado para personas con disfagia, utilizando tecnología de extrusión y combinaciones novedosas de espesantes y agentes gelificantes de grado alimentario [21]. El equipo destaca que sus alimentos "requieren menos masticación y tienen una estructura especialmente formulada que brinda un mayor control de la comida a la persona con disfagia", con un riesgo significativamente menor de que las partículas queden atascadas en la garganta.

La pieza bicomponente desarrollada en el presente TFM consiste en una base gomosa-elástica de compota de manzana con alginato de sodio, gelificada

superficialmente mediante intercambio catiónico con iones  $\text{Ca}^{2+}$  en baño de  $\text{CaCl}_2$  — técnica inspirada en la esferificación directa culinaria, donde el objetivo no es producir esferas sino obtener una membrana gelificada estable que confiera integridad estructural a la pieza impresa—, cubierta por una capa cremosa de cuajada estabilizada con goma xantana. El conjunto presenta características de textura coherentes con los niveles 5 y 6 del marco IDDSI (*International Dysphagia Diet Standardisation Initiative*) [18], que establecen los criterios internacionales para alimentos de textura modificada seguros para personas con disfagia.

Como extensión clínica del trabajo, se evaluó en el análisis económico la viabilidad de sustituir la cuajada por *Fresubin 2 Kcal Crème* (Fresenius Kabi), un suplemento nutricional oral hipercalórico de textura cremosa específicamente formulado para pacientes con disfagia y requerimientos nutricionales aumentados [15]. Esta sustitución añadiría valor clínico al producto sin modificar sustancialmente el proceso de fabricación.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la impresión 3D de alimentos mediante extrusión es técnicamente viable para producir estructuras bicomponente con textura controlada, abriendo una línea de aplicación directa en alimentación adaptada para personas con disfagia que merece validación clínica sistemática.

### 3.3. Objetivos del proyecto

El objetivo general es analizar la aplicación de la impresión 3D mediante extrusión sobre medios concentrados, identificando los factores que determinan la calidad, estabilidad y reproducibilidad del proceso. Los objetivos específicos son:

- Evaluar la influencia de los parámetros de impresión (presión, velocidad, diámetro de boquilla) sobre la precisión geométrica de formulaciones frutales concentradas.
- Determinar las condiciones óptimas de esferificación directa con alginato de sodio para obtener piezas con textura gomosa-elástica y buena integridad mecánica.
- Desarrollar y validar una formulación de cuajada con goma xantana apta para la deposición en segunda capa sobre estructuras gelificadas.
- Evaluar la viabilidad técnica, sensorial, económica y ambiental del proceso de impresión bicomponente resultante.
- Explorar la aplicabilidad de los resultados al diseño de alimentos para personas con disfagia, coherentes con las guías IDDSI.
- Proponer criterios de formulación y operación que optimicen la calidad de impresión en medios concentrados.

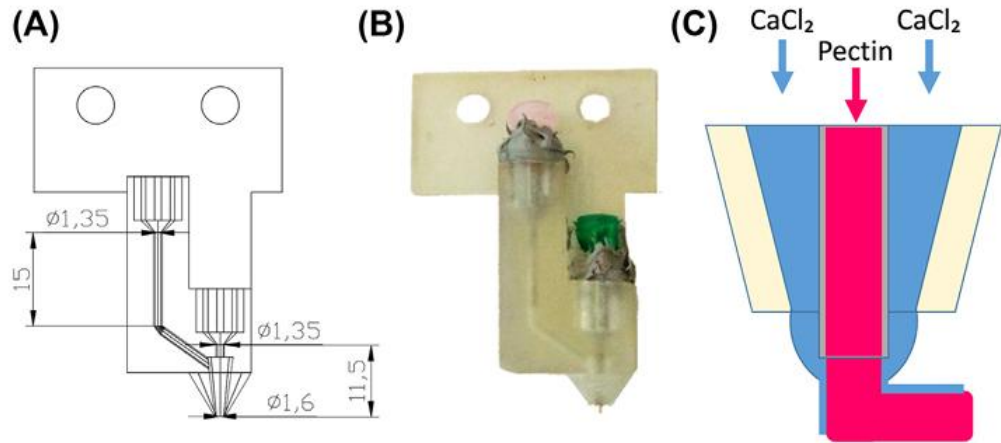
## 4. Metodología del trabajo

El desarrollo del proyecto se estructura en cinco fases consecutivas, diseñadas para avanzar de la revisión teórica hacia el trabajo experimental y el análisis de resultados.

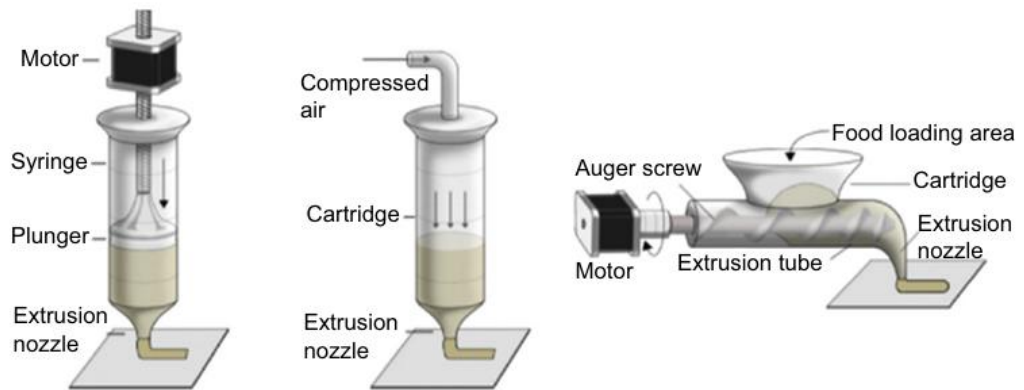
Fase 1 — Revisión bibliográfica y diseño experimental: revisión exhaustiva sobre impresión 3D de alimentos, propiedades reológicas de materiales concentrados e hidrocoloides, y aplicaciones clínicas en alimentación para disfagia. Identificación de formulaciones candidatas y diseño de la matriz experimental.

Fase 2 — Preparación y optimización de formulaciones: selección y ajuste de las formulaciones de compota de manzana con goma xantana (Bloque I), compota con alginato de sodio para su gelificación basada en el procedimiento de esferificación directa (Bloque II) y cuajada con goma xantana (Bloque III). Dada la ausencia de caracterización reológica instrumental (fuera del alcance del trabajo), la adecuación reológica de cada formulación se abordó de forma empírica: en lugar de medir  $G'$ ,  $G''$  y la viscosidad con un reómetro, el comportamiento del material se evaluó directamente durante la extrusión, observando su fluidez en boquilla, la capacidad de retener la forma tras la deposición y la presencia o ausencia de grumos. A partir de esas observaciones, las concentraciones de hidrocoloide (goma xantana o alginato) y las proporciones de mezcla se ajustaron de manera iterativa hasta obtener formulaciones con una consistencia coherente con el rango de *imprimibilidad* descrito en la bibliografía ( $10^2$ – $10^4$  Pa·s,  $G' > G''$  [2]). La ausencia de caracterización reológica instrumental queda reconocida como limitación del trabajo y se identifica como línea prioritaria de trabajo futuro.

Fase 3 — Se realizaron los ensayos de impresión empleando la impresora 3D del laboratorio de ICAI, con control de temperatura, presión y velocidad. Se analizará la fidelidad dimensional, la adherencia entre capas y la homogeneidad del material depositado.



**Figura 2:** Esquema y montaje experimental de un sistema de extrusión coaxial utilizado en impresión 3D de alimentos. Se muestra la sección de la boquilla con flujo colateral de  $\text{CaCl}_2$  para la gelificación del material. Fuente: [1].



**Figura 3:** Principales mecanismos de extrusión en la impresión 3D de alimentos: (A) por jeringa, (B) por aire comprimido y (C) por tornillo sinfín. Fuente:[1].

Para la fase experimental, se ha empleado la impresora **FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer**, diseñada específicamente para la impresión de alimentos mediante extrusión de materiales de distinta viscosidad (véase Figura 4).

Los parámetros de proceso se establecieron a partir del perfil FELIX Food V1.6 en *Simplify3D* y se ajustaron iterativamente en función de los resultados experimentales obtenidos. Para el diseño de las geometrías se utilizó Tinkercad (modelo CAD) y *Simplify3D* como software de laminado o *slicing*, proceso mediante el cual el modelo CAD se secciona en capas horizontales y se genera el código G de control de la impresora.

Las visualizaciones de capas y la previsualización del proceso se presentan junto a cada ensayo en el apartado de resultados.



*Figura 4: Impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer empleada en los ensayos experimentales. Fuente: [14].*

Fase 4 — Análisis y discusión de resultados: interpretación integrada de los resultados, comparación con la literatura y extracción de conclusiones.

Fase 5 — Redacción de la memoria: elaboración de la memoria final del TFM.

En conjunto, la planificación estimada contempló un primer mes dedicado a la revisión bibliográfica y diseño experimental, un segundo mes centrado en la preparación y caracterización de las formulaciones, un tercer mes destinado a los ensayos de impresión y recogida de resultados, y un último mes para el análisis, discusión y redacción. La duración total aproximada del trabajo fue de cuatro meses.

## 5. Recursos empleados

### 5.1. Equipamiento

El trabajo experimental se desarrolló íntegramente en el laboratorio de impresión 3D de la ETSI-ICAI. El equipo principal fue la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer, diseñada específicamente para la impresión de alimentos mediante extrusión con jeringas de distinta viscosidad. Su precio público ronda los 8.500 € (IVA no incluido) y dispone de dos cabezales independientes, lo que permite la deposición de dos formulaciones distintas en una misma pieza. La potencia nominal del equipo es de 250 W. La impresora trabaja con jeringas RVS de acero inoxidable, compatibles con materiales alimentarios de viscosidad media-alta, y acepta boquillas intercambiables de distinto diámetro (0,8–2,0 mm).

Adicionalmente se emplearon:

- Balanza analítica (resolución 0,0001 g, error máximo  $\pm 0,0002$  g)
- Batidora de varillas para la preparación de formulaciones
- Recipientes de acero inoxidable para el baño de gelificación
- Film de polietileno de grado alimentario como superficie de impresión
- Calibre digital (resolución  $\pm 0,1$  mm) para el análisis dimensional
- Equipo de frío para conservación de materiales y piezas a 2–4 °C

### 5.2. Software

Para el diseño CAD de las geometrías se utilizó Tinkercad (Autodesk), herramienta de modelado 3D en línea. El procesado de los archivos de laminado se realizó con *Simplify3D* (perfil FELIX Food V1.6 - Single - V0.02), que genera el código G para el control de la impresora. El análisis de datos y la elaboración de tablas se realizaron con Microsoft Excel.

### 5.3. Materiales de ensayo

Los materiales de ensayo empleados fueron:

- Compota de manzana comercial (El Corte Inglés, matriz frutal concentrada de alto contenido en pulpa ~70%); consultado mayo 2026
- Alginato de sodio de grado alimentario (Sosa Ingredients, precio 27,99 €/400 g); consultado mayo 2026

- Cloruro cálcico alimentario (precio 9,99 €/500 g) [Proveedor: Amazon/Panreac]; consultado mayo 2026
- Goma xantana de grado alimentario (precio 17,90 €/500 g) [Proveedor: Amazon/Sosa Ingredients]; consultado mayo 2026
- Cuajada comercial entera (El Corte Inglés, 4 × 125 g, 1,25 €) ; consultado mayo 2026
- *Fresubin* 2kcal Crème como suplemento nutricional de referencia clínica para disfagia (Fresenius Kabi, 57,60 €/24 × 125 mL) ; consultado mayo 2026. Fuente:[15]

## 6. Desarrollo experimental

El presente apartado recoge la totalidad de los ensayos de impresión 3D de alimentos realizados en el laboratorio de la ETSI-ICAI. Los experimentos se estructuran en tres bloques principales:

- impresión directa de formulaciones de compota de manzana estabilizadas con goma xantana (Bloque I),
- gelificación inspirada en el proceso de esferificación directa con alginato de sodio (Bloque II), y
- deposición de cuajada con goma xantana como segunda capa sobre estructuras gelificadas. Esta técnica de gelificación superficial por intercambio catiónico, está inspirada en la esferificación directa culinaria; el objetivo es obtener una membrana gelificada estable en la pieza impresa, no producir esferas (Bloque III).
- Adicionalmente se presentan ensayos exploratorios con zumo de melocotón.

**Nota sobre la preparación geométrica:** antes de cada bloque que introduce una nueva geometría se incluye un subapartado específico de preparación geométrica, que documenta el diseño del modelo CAD, la configuración del proceso en *Simplify3D* y la verificación de la previsualización de capas. Esta preparación es parte integral del proceso de fabricación aditiva, pues permite anticipar y corregir problemas de *imprimibilidad* antes de consumir material y tiempo de laboratorio.

### 6.1. Fundamento teórico

La compota de manzana presenta comportamiento pseudoplástico. Su módulo elástico ( $G'$ ) resulta generalmente inferior al módulo viscoso ( $G''$ ), comprometiendo el auto-soporte de las piezas impresas. Para corregir este déficit se recurre a la goma xantana, un polisacárido exopolimérico con marcado comportamiento shear-thinning capaz de invertir la relación  $G'/G''$  incluso a bajas concentraciones. Según Rahman et al. [2], las formulaciones óptimas para extrusión estable presentan viscosidades entre  $10^2$  y  $10^4$  Pa·s con  $G' > G''$ , rango que la goma xantana permite alcanzar en matrices frutales concentradas con sólidos superiores al 60–70% [8].

#### 6.1.1. Preparación geométrica: geometría de galleta en *Simplify3D*

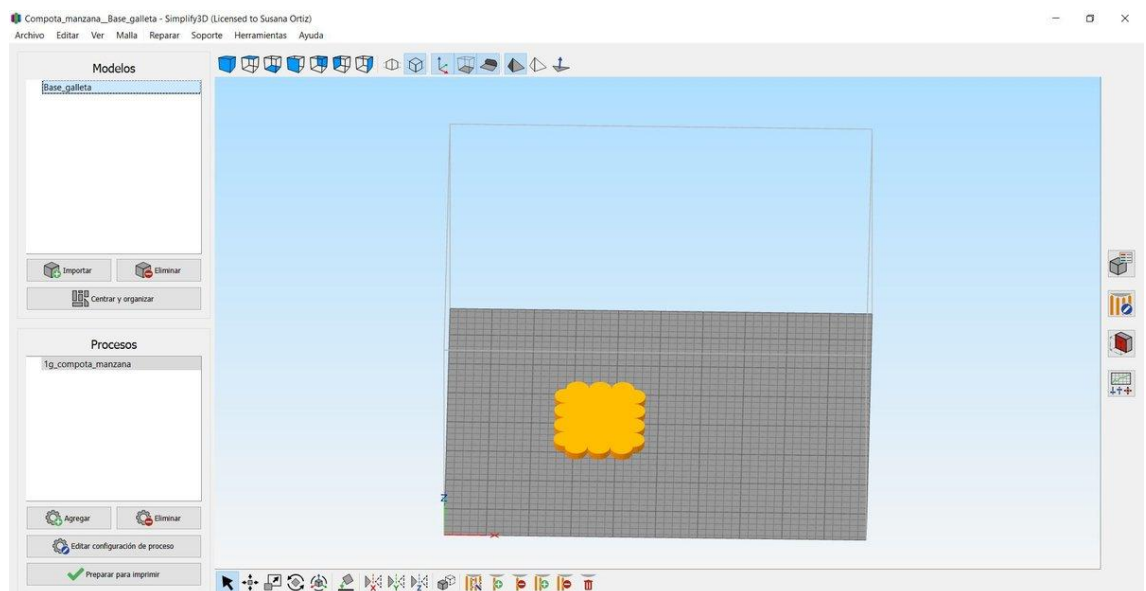
La denominada "geometría de galleta" es la forma de referencia empleada en los primeros ensayos: un contorno redondeado con lóbulos suaves, de dimensiones  $53,64 \times 61,87$  mm, diseñada en Tinkercad. Se eligió precisamente por su tolerancia a la deformación y la ausencia de bordes angulosos, lo que la convierte en una geometría adecuada para tantear el comportamiento del material sin exigirle alta rigidez.

Antes de comenzar los ensayos de impresión de compota, se diseñó y configuró la geometría de galleta en *Simplify3D*. Esta etapa de preparación es previa a la ejecución de cualquier ensayo y permite verificar que la trayectoria de deposición, el número de perímetros, el porcentaje de relleno y la altura de capa son coherentes con las propiedades reológicas esperadas del material.

**Modelo CAD:** la geometría de galleta (*Base\_galleta*) se diseñó en Tinkercad como una forma de contorno curvo y continuo, con lóbulos suaves y sin ángulos agudos, con dimensiones de 53,64 × 61,87 mm. Esta forma fue elegida en el primer bloque por su tolerancia a la deformación: al carecer de bordes angulosos, no exige alta rigidez del material para mantener la fidelidad geométrica durante la impresión. (Véase Figura 5)

**Configuración en *Simplify3D* (proceso 1g\_compota\_manzana):** perfil FELIX Food V1.6 - Single - V0.02. Dos perímetros; relleno rectilíneo al 40%; dos capas sólidas superior e inferior; altura de capa 2,0 mm; boquilla 1,5 mm; velocidad de perímetro exterior 450 mm/min (75%); velocidad de movimiento 300 mm/min. La previsualización de capas muestra el perímetro exterior en azul, el perímetro interior en cian y el relleno sólido en verde, confirmando cobertura completa de la sección sin zonas vacías en los lóbulos. (Véanse Figuras 6 y 7)

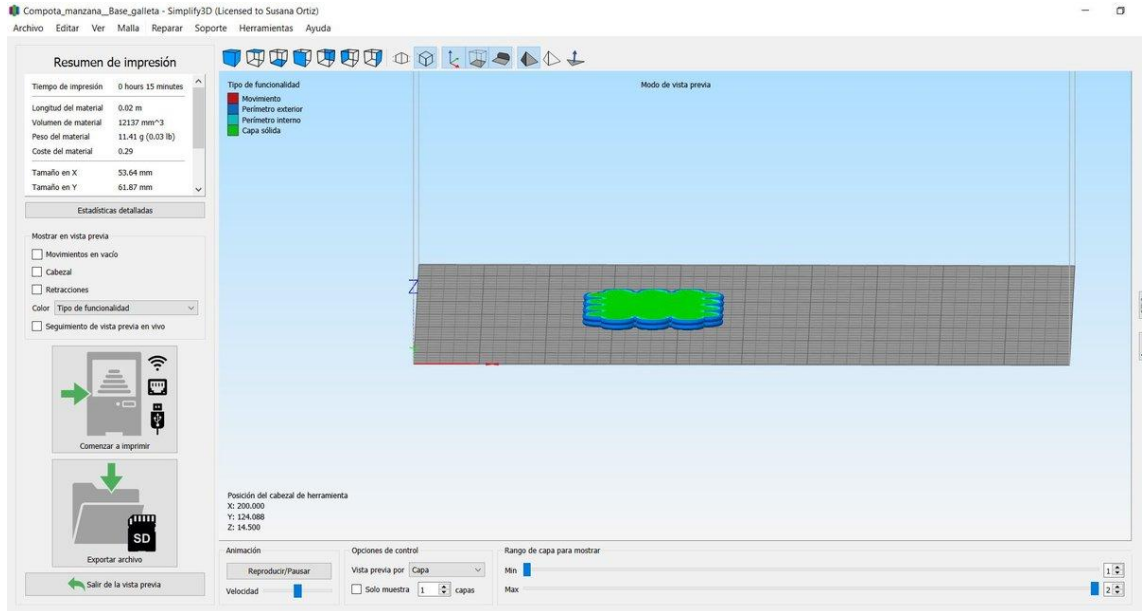
**Parámetros de proceso extraídos del resumen de *Simplify3D*:** tiempo estimado de impresión 15 min; volumen de material 12.137 mm<sup>3</sup>; peso estimado 11,41 g; longitud de material 0,02 m.



**Figura 5:** Modelo CAD de la galleta de compota

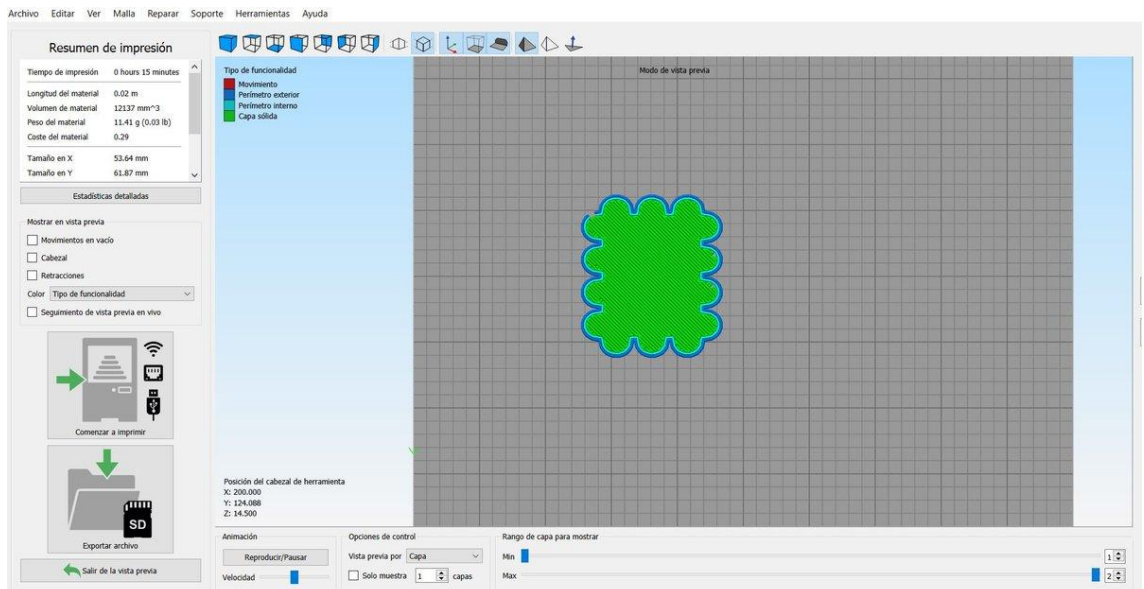
Se muestra la geometría de la pieza diseñada en *Simplify3D* para los ensayos iniciales de impresión. El modelo corresponde a la estructura *Base\_galleta*, asociada al

proceso `lg_compota_manzana`, con unas dimensiones de  $53,64 \times 61,87$  mm. La configuración se emplea como punto de partida para evaluar la *imprimibilidad* en geometrías de bordes suaves.



*Figura 6: Previsualización de capas de la galleta de compota*

Se presenta la simulación del proceso de laminado en vista frontal, donde se distinguen los elementos de deposición: perímetro exterior (azul), perímetro interior (cian) y capas sólidas (verde). La configuración permite verificar la continuidad del recorrido y la correcta cobertura de la geometría antes de la impresión, con un tiempo estimado de 15 minutos y un peso aproximado de 11,41 g.



*Figura 7: Previsualización superior de la galleta de compota*

Se muestra la vista superior de la simulación de laminado, donde se observa el patrón de relleno rectilíneo uniforme y la cobertura completa de los lóbulos mediante doble perímetro. Esta configuración asegura la continuidad del material y contribuye a la estabilidad estructural de la pieza durante la impresión.

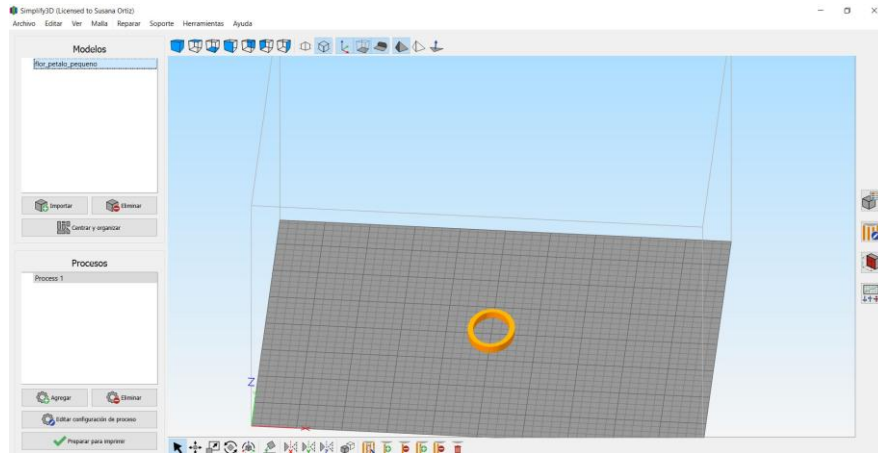
### 6.1.2. Ensayo E-X-01: 49 g compota / 1 g goma xantana



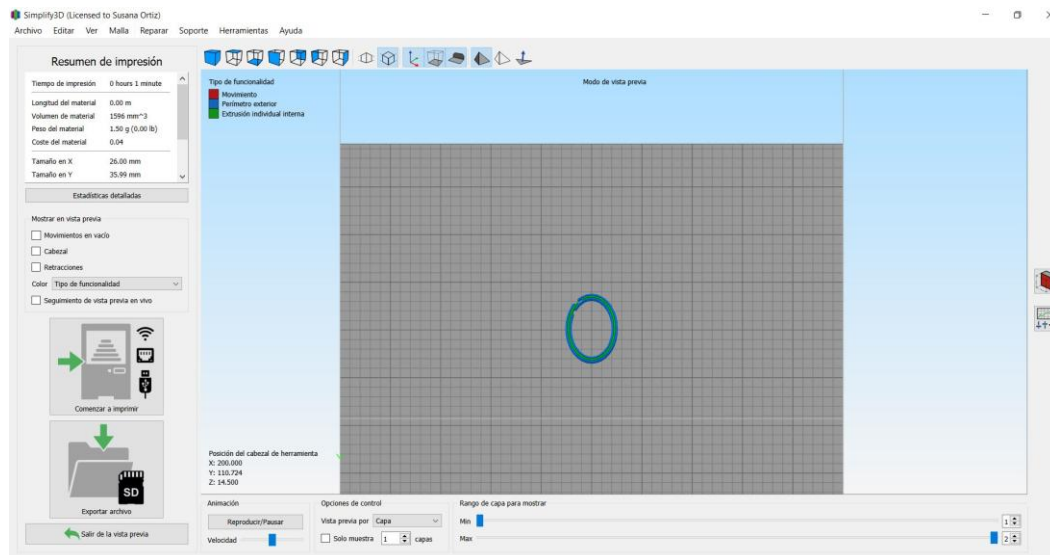
*Figura 8: Mezcla de compota con goma xantana*

Se muestra la mezcla de 49 g de compota y 1 g de goma xantana (2% m/m) antes de su carga en la jeringa. La formulación presenta una consistencia fluida con presencia de grumos debido a la hidratación incompleta de la xantana, lo que condiciona negativamente la homogeneidad durante la extrusión.

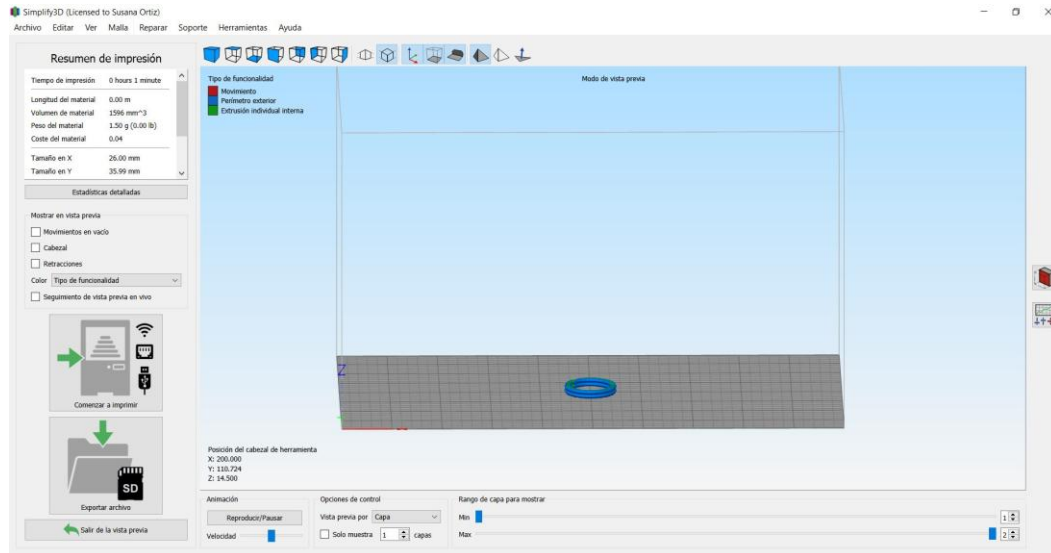
La geometría de ensayo fue un pétalo floral (300 mm/min, 80% relleno). Se observaron burbujas de aire en el cordón extruido. La solución adoptada consistió en introducir un fino bastón metálico a un lado del émbolo de goma de la jeringa al cerrarla, generando un pequeño hueco por el que escapaba el aire atrapado antes del sellado definitivo. Este procedimiento resultó eficaz para reducir la porosidad en los ensayos posteriores. La formulación al 2% resultó excesivamente fluida para mantener la forma.



*Figura 9: Modelo CAD de la geometría flor-pétalo en Simplify3D. La geometría flor\_pétalo\_pequeno cargada sobre la cama de impresión antes del proceso de laminado.*



*Figura 10: Laminado de la geometría flor-pétalo, vista superior. Se distinguen el perímetro exterior (azul) y la extrusión interna (verde). Dimensiones: 26,00 × 35,99 mm; peso estimado: 1,50 g; tiempo estimado: 1 min.*



*Figura 11: Laminado de la geometría flor-pétalo, vista frontal. Disposición de las dos capas de deposición sobre la cama de impresión.*



*Figura 12: Resultado del Ensayo E-X-01*

La pieza obtenida presenta una deposición discontinua del material, lo que evidencia la presencia de burbujas en la mezcla y una viscosidad insuficiente para mantener la geometría definida del pétalo. Este comportamiento confirma la necesidad de mejorar tanto la homogeneidad de la formulación como sus propiedades reológicas para asegurar la estabilidad durante la impresión.

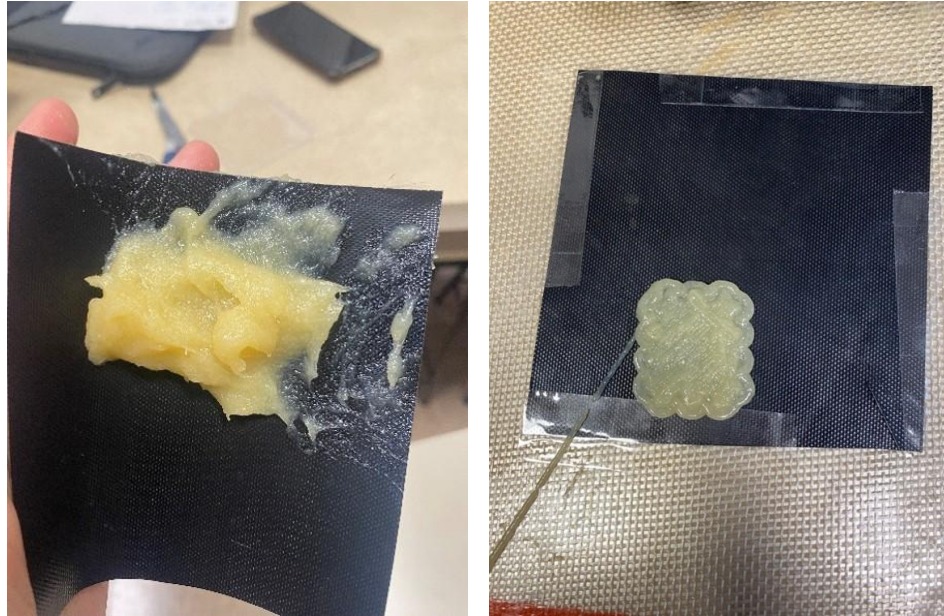
### 6.1.3. Ensayo E-X-02: 4 g de goma xantana / 46 g compota



**Figura 13** : Comparativa de formulación y resultado de impresión de Ensayo E-X-02

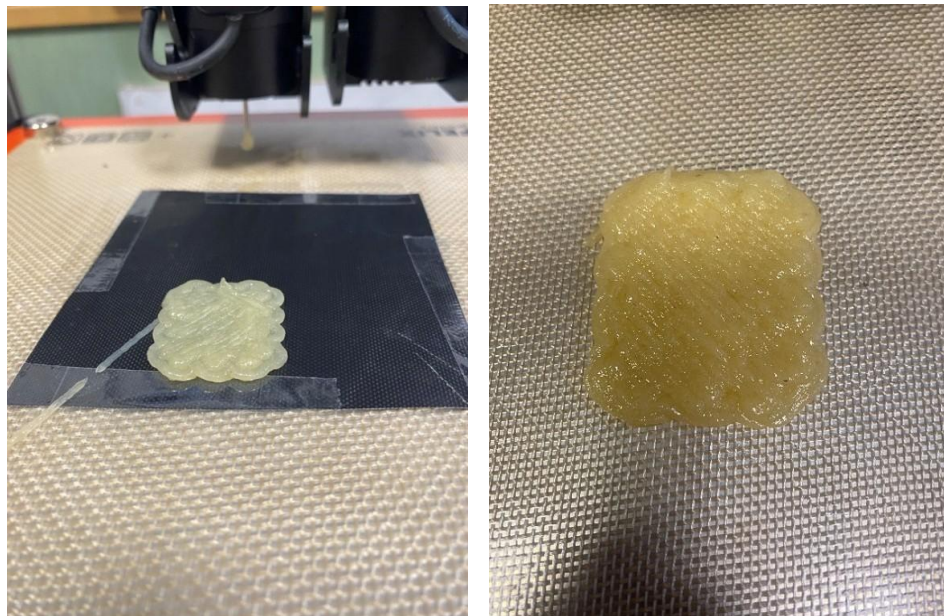
A la izquierda se muestra la mezcla de 4 g de goma xantana y 46 g de compota (~8% m/m), con una textura más densa y cohesiva que la formulación anterior. A la derecha se observa el resultado de la impresión en geometría de galleta, donde se aprecia una mejora en la definición del contorno, indicativa de un comportamiento reológico más adecuado para la deposición.

La velocidad se redujo a 420 mm/min (70% del nominal) y se pasó a geometría de galleta. La deposición directa sobre film negro a velocidad reducida dio resultados notablemente mejores.

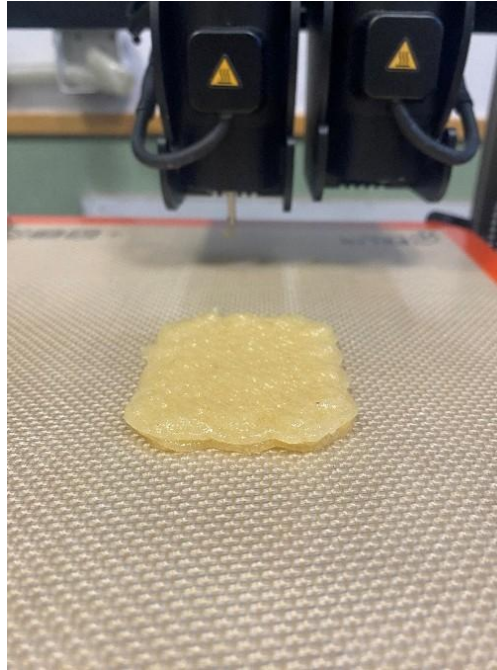


**Figura 14:** Efecto de la superficie y método de deposición de Ensayo E-X-02

A la izquierda se muestra la adhesión excesiva de la pieza al film negro tras un intento de transferencia manual, lo que provoca deformaciones en la geometría. A la derecha se observa la impresión directa sobre el film negro a 420 mm/min, donde se obtiene una forma estable y mejor definida, evidenciando la importancia de evitar manipulaciones intermedias en el proceso.

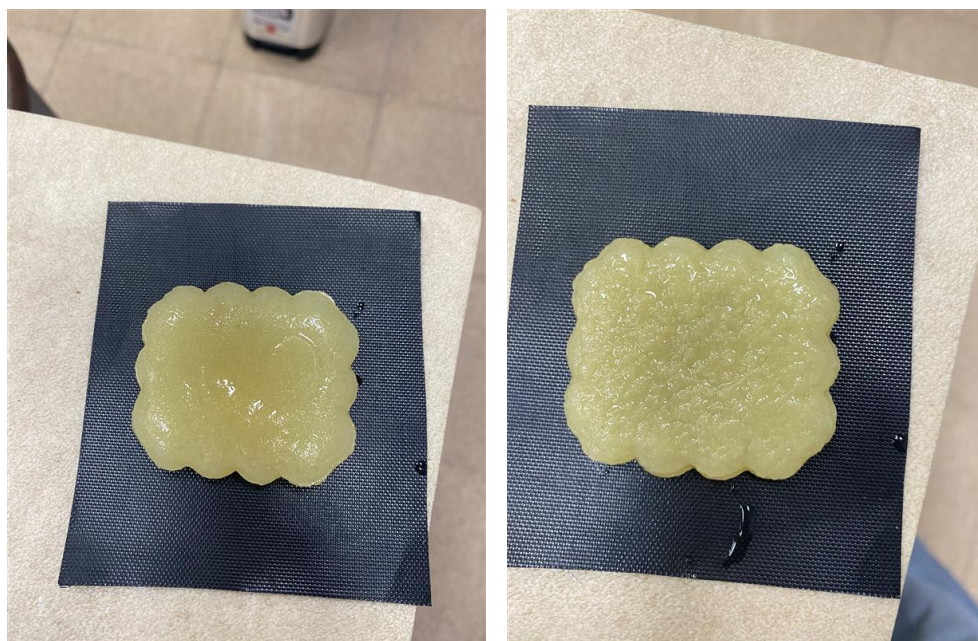


**Figura 15:** Vista frontal de la impresión sobre film negro (izquierda) y vista superior de la galleta sin film negro(derecha).



*Figura 16: Vista frontal de la pieza de compota con alginato en geometría de galleta.*

Se muestra la pieza en condición de referencia antes del proceso de esferificación directa (5 g/L de CaCl<sub>2</sub>, pH 3,82 y 1,25 g/100 g de alginato). La estructura presenta una altura aproximada de 1 cm y una superficie superior rugosa, resultado del patrón de deposición durante la impresión y del proceso de gelificación.



*Figura 17: Comparativa de las dos caras de la compota gelificada.*

Se observan las dos caras de la compota gelificada, una lisa en la parte inferior y otra rugosa en la superior. Esto indica una diferencia de acabado superficial causada por

el contacto con la base y el proceso de deposición. Esto es importante porque determina la estabilidad del apoyo y la calidad estética del producto.

Tras refrigeración, las piezas con xantana incrementaron notablemente su consistencia, atribuible al aumento de capacidad de retención hídrica en frío [2]. La consistencia seguía siendo insuficiente para bordes angulosos precisos, motivando la estrategia de esferificación directa.

**Conclusión del bloque I:** el incremento de goma xantana y la reducción de velocidad mejoran la *imprimibilidad* en geometrías suaves. Los bordes angulosos requieren mayor rigidez mecánica, lo que motiva el Bloque II.

## 6.2. Bloque II: Esferificación directa con alginato de sodio

### 6.2.1. Fundamento teórico

La esferificación directa con alginato de sodio se basa en la gelificación iónica del alginato en presencia de  $\text{Ca}^{2+}$ . La compota con alginato se imprime en la forma deseada y se sumerge en el baño de  $\text{CaCl}_2$  para inducir la gelificación exterior [4][24]. A pH inferior a 3,5, la protonación de los grupos carboxilato del alginato inhibe la coordinación iónica con el calcio [4][24]. El pH natural de la compota (3,82), se sitúa por encima del umbral crítico, lo que permite el proceso sin ajuste de pH.

Pruebas preliminares de extrusión directa en el baño de calcio confirmaron la necesidad de imprimir la forma previamente (Figura 18).



**Figura 18:** Prueba preliminar de esferificación directa.

Se observa la formación de estructuras tipo fideo durante la extrusión, tanto dentro como fuera del baño. Esto muestra una falta de control en la geometría durante la esferificación directa. Esto es importante porque limita la capacidad de obtener formas definidas y reproducibles.

### 6.2.2. Diseño experimental

*Tabla 1: Formulación base y variables del diseño experimental de esferificación directa.*

Componente	Cantidad / Rango
Compota de manzana	200 g
Alginato de sodio	0,65 g/100 g   1,25 g/100 g
Agua para baño CaCl <sub>2</sub>	250 mL
CaCl <sub>2</sub> en baño	1 g/L   5 g/L
pH de la mezcla	2,5   3,82

### 6.2.3. Ensayo previo: primera impresión con fallo de software



*Figura 19: Ensayo previo interrumpido por fallo de software.*

Se observan piezas incompletas con inicio de gelificación en los bordes y elementos separados del film. Esto indica una interrupción del proceso que impide una esferificación completa y homogénea. Esto es importante porque afecta la integridad estructural y la calidad final del producto.

La gelificación parcial de los bordes confirmó la viabilidad del proceso y permitió ajustar el software antes de los ensayos sistemáticos.

#### 6.2.4. Resultados detallados por ensayo

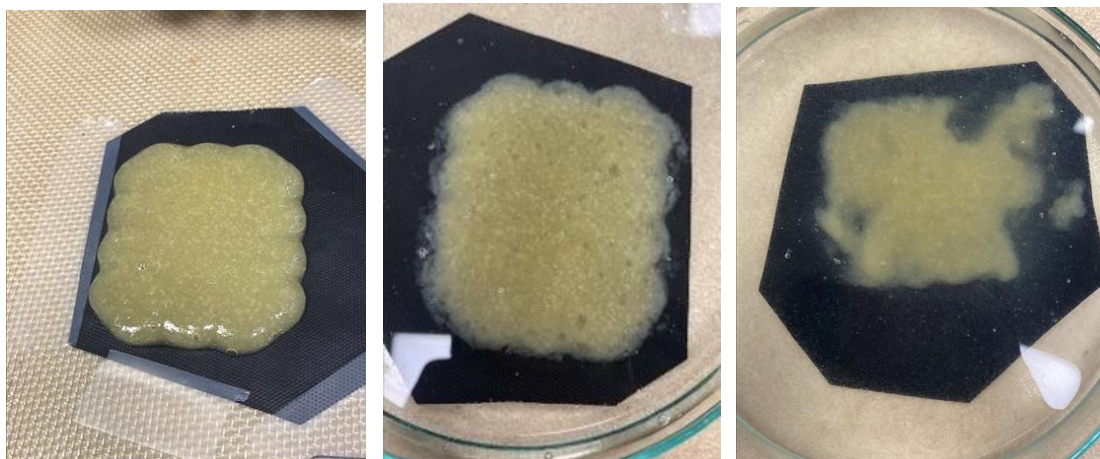
*Ensayo 1 —  $\text{CaCl}_2$ : 1 g/L | pH: 2,5 | NaAlg: 0,65 g/100 g*



*Figura 20: Ensayo 1: pieza recién impresa; en el baño de  $\text{CaCl}_2$ ; descompuesta. La baja concentración de alginato y el pH ácido impidieron la gelificación.*

La combinación de baja concentración de alginato y pH 2,5 inhibió completamente la coordinación iónica alginato- $\text{Ca}^{2+}$ . La pieza se descompuso sin llegar a gelificar.

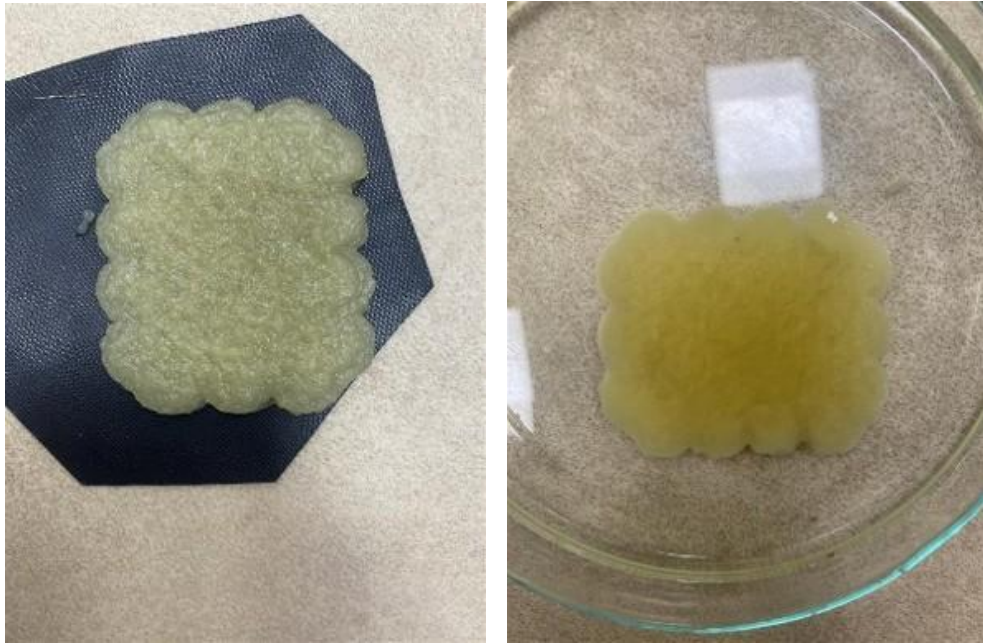
*Ensayo 2 —  $\text{CaCl}_2$ : 5 g/L | pH: 2,5 | NaAlg: 0,65 g/100 g*



**Figura 21:** *Ensayo 2: pieza recién impresa; sumergida en 5 g/L CaCl<sub>2</sub>; descompuesta. El incremento de calcio no compensó el efecto inhibitorio del pH 2,5.*

La mezcla extruida presentó consistencia muy líquida y descomposición inmediata, confirmando que el pH domina sobre la concentración de calcio.

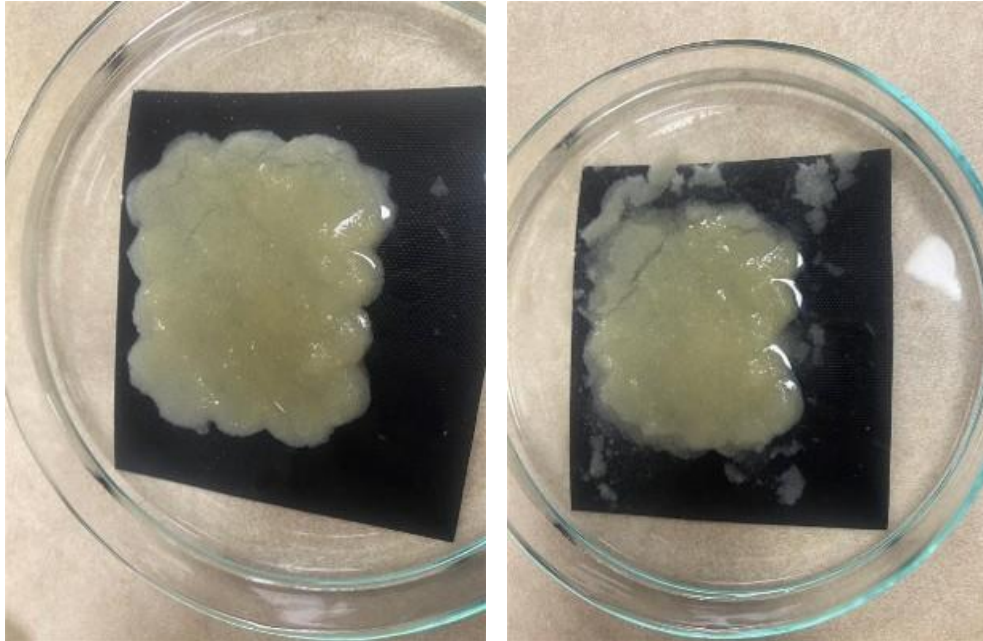
*Ensayo 3 — CaCl<sub>2</sub>: 1 g/L | pH: 3,82 | NaAlg: 0,65 g/100 g*



**Figura 22:** *Ensayo 3: pieza recién impresa (izquierda); en el baño separada del film (derecha). Primera gelificación exitosa con pH natural de la compota.*

Al trabajar con pH 3,82, la gelificación fue posible por primera vez. La pieza fue frágil, pero mejoró con refrigeración.

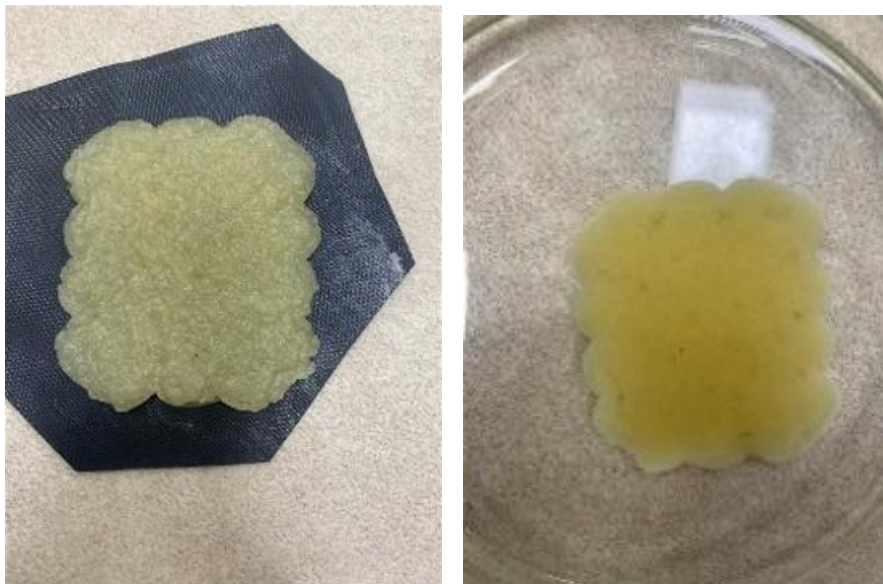
*Ensayo 4 — CaCl<sub>2</sub>: 1 g/L | pH: 2,5 | NaAlg: 1,25 g/100 g*



**Figura 23:** Ensayo 4: pieza en el baño (izquierda); deshecha tras varios minutos (derecha). El mayor alginato no compensó el pH 2,5.

El pH ácido continuó inhibiendo la gelificación pese al mayor alginato, confirmando que el pH domina sobre la concentración del polisacárido.

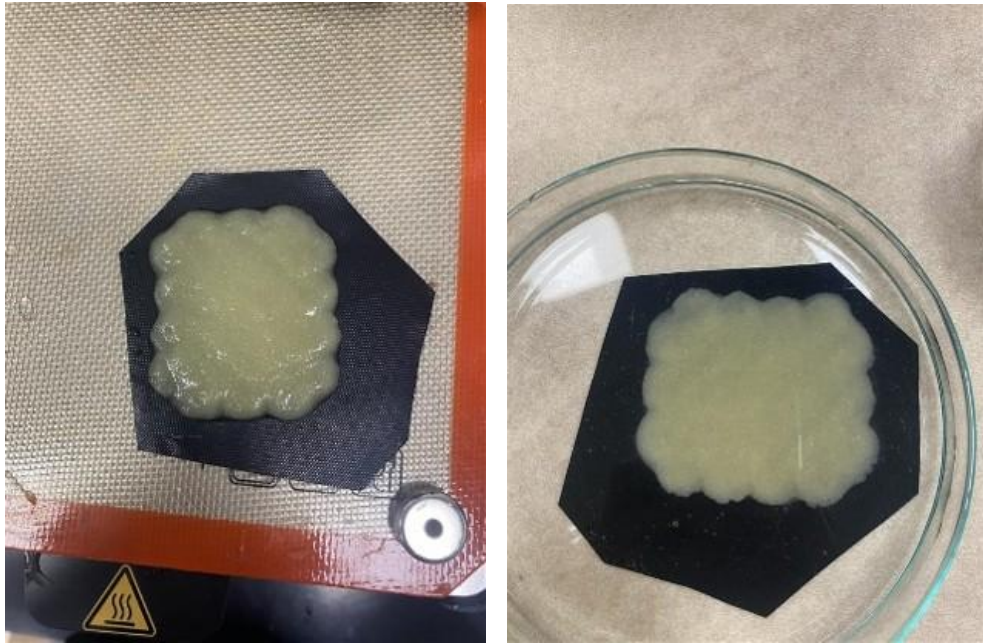
*Ensayo 5 —  $\text{CaCl}_2$ : 5 g/L | pH: 3,82 | NaAlg: 0,65 g/100 g*



**Figura 24:** Ensayo 5: pieza recién impresa (izquierda); en el baño separada del film (derecha). Gelificación correcta, pero pieza muy frágil.

La gelificación fue correcta pero la pieza careció de textura gomosa objetivo. La menor concentración de alginato compromete la integridad mecánica final.

*Ensayo 6 —  $\text{CaCl}_2$ : 5 g/L | pH: 2,5 | NaAlg: 1,25 g/100 g*



**Figura 25:** *Ensayo 6 — estado inicial. Pieza recién impresa con separación de fases inicial (izquierda); recién sumergida sin endurecimiento (derecha).*



**Figura 26:** *Ensayo 6 — resultado. Desintegración parcial al separar del film (izquierda); pieza completamente rota (derecha). El pH 2,5 impidió la formación de membrana estable.*

La mezcla presentó separación de fases inicial. El incremento de alginato no compensó el pH ácido: la pieza se rompió al retirarla del film.

*Ensayo 7 —  $\text{CaCl}_2$ : 1 g/L | pH: 3,82 | NaAlg: 1,25 g/100 g*



**Figura 27:** *Ensayo 7 (interrumpido por fallo de software). Los bordes presentan membrana gelificada parcial. La baja concentración de calcio (1 g/L) fue el factor limitante.*

La baja concentración de calcio fue el factor limitante: la pieza fue más frágil que el ensayo de referencia.

*Ensayo 8 (Referencia) —  $\text{CaCl}_2$ : 5 g/L | pH: 3,82 | NaAlg: 1,25 g/100 g*

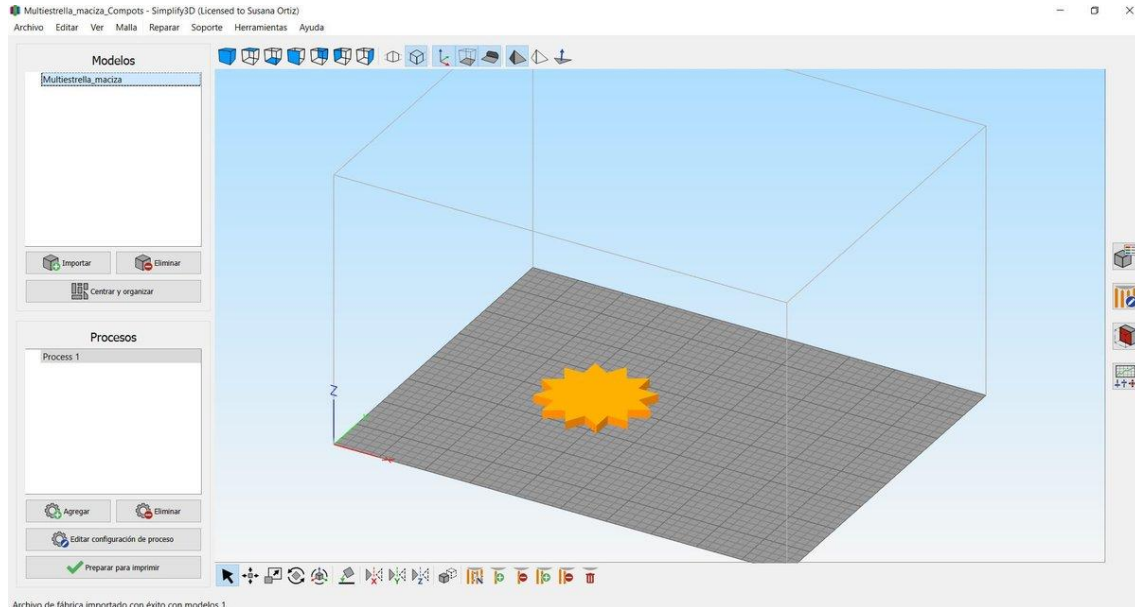
El ensayo de referencia combina las condiciones óptimas: pH natural (3,82), mayor concentración de calcio (5 g/L) y de alginato (1,25 g/100 g). La Figura 17 muestra los resultados: pieza gomosa, elástica y con buena integridad mecánica. Esta es la formulación de referencia para el Bloque III.

### **6.2.5. Preparación geométrica: geometría de estrella en *Simplify3D***

Una vez validada la condición de referencia en geometría de galleta, se diseñó y configuró en *Simplify3D* la nueva geometría de estrella de diez puntas antes de ejecutar los ensayos con esta forma. Este paso previo fue esencial, ya que la estrella supone un reto mayor en términos de fidelidad dimensional: las puntas angulosas requieren que la trayectoria de deposición genere perímetros bien cerrados en los vértices, algo que debe verificarse en la previsualización de capas antes de imprimir con material real.

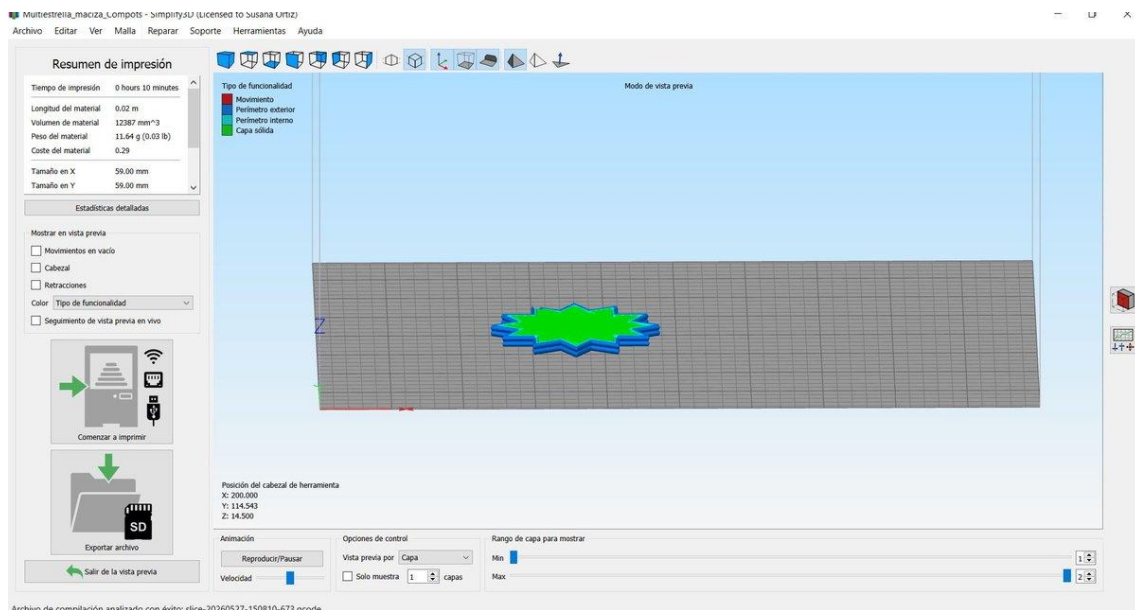
**Modelo CAD:** la geometría Multiestrella\_maciza (59 × 59 mm) fue diseñada en Tinkercad como una estrella maciza de diez puntas, con ángulos internos agudos que permiten evaluar la capacidad de la formulación para reproducir bordes precisos. (Véase la Figura 28)

**Configuración en Simplify3D:** el mismo perfil FELIX Food V1.6 utilizado en el Bloque I. Parámetros de resumen: tiempo estimado 10 min; volumen 12.387 mm<sup>3</sup>; peso estimado 11,64 g; dimensiones 59 × 59 mm. La previsualización (Figuras 29 y 30) confirma que el doble perímetro cubre las puntas sin zonas de extrusión incompleta.



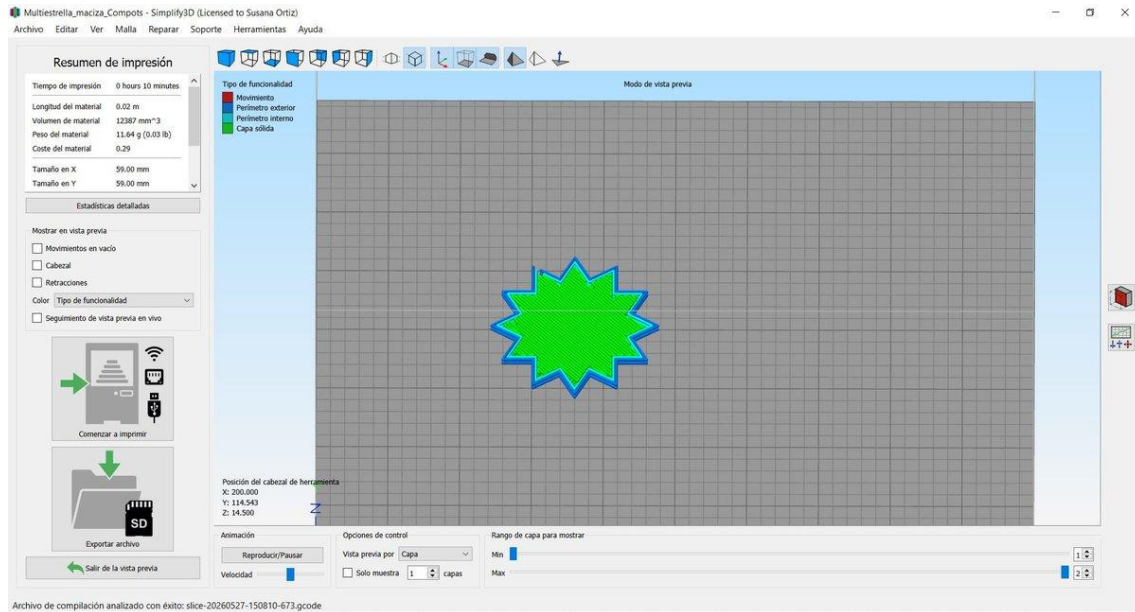
**Figura 28:** Vista general del modelo de estrella de compota en Simplify3D (modo render).

Se observa el modelo de una estrella de compota visualizado en modo render en el software *Simplify3D*. Esto indica la configuración geométrica y los parámetros básicos antes de su fabricación. Esto es importante porque permite prever el resultado final y optimizar el proceso de impresión.



**Figura 29:** Vista frontal con previsualización de capas — estrella de compota.

Se observa la vista frontal de la estrella con la previsualización de capas y el perímetro exterior recorriendo los vértices. Esto indica un trazado preciso del contorno y un control adecuado de la geometría en la impresión. Esto es importante porque asegura la definición de las puntas y la calidad final de la pieza.



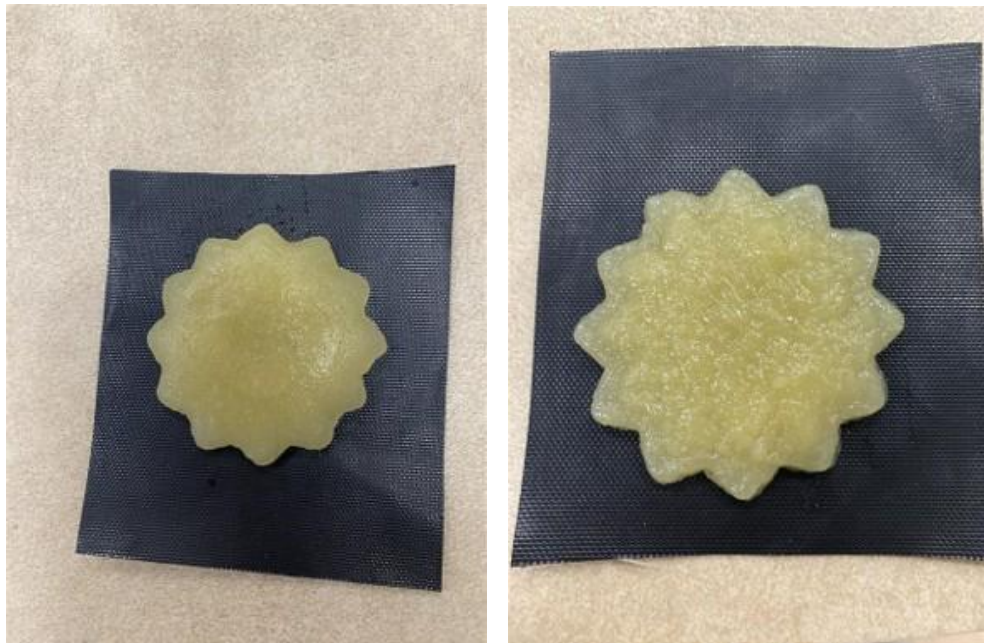
**Figura 30:** Vista desde arriba con previsualización de capas — estrella de compota.

Se observa la vista superior de la estrella con un patrón de relleno rectilíneo orientado diagonalmente y doble perímetro en las puntas. Esto indica una cobertura completa de la geometría y una estrategia de relleno uniforme. Esto es importante porque mejora la estabilidad estructural y la definición de las zonas más críticas.

### 6.2.6. Ensayos con geometría de estrella



*Figura 31: Primera estrella impresa: vista superior (izquierda); vista frontal (centro); pieza sumergida en el baño de  $\text{CaCl}_2$  (derecha).*



*Figura 32: Estrella tras la esferificación directa, separada del film (izquierda).*

Las puntas se conservan con buena fidelidad respecto a la forma original impresa (derecha). Se observa una ligera retracción dimensional (~5–10%) en las puntas atribuible a la pérdida de agua superficial durante la gelificación.

### 6.2.7. Análisis comparativo de variables y resumen

*Tabla 2: Resumen de la matriz de ensayos de esferificación directa. ★ = condición de referencia.*

Ens.	CaCl <sub>2</sub> (g/L)	pH	NaAlg (g/100g)	Resultado resumido
1	1	2,5	0,65	Descomposición total. Sin gelificación.
2	5	2,5	0,65	Colapso de capas. Descomposición inmediata.
3	1	3,82	0,65	Gelificación parcial. Pieza frágil. Mejora con frío.
4	1	2,5	1,25	Sin gelificación. Pieza no se desprende del film.
5	5	3,82	0,65	Gelificación correcta, pero pieza muy frágil.
6	5	2,5	1,25	Separación de fases. Sin gelificación. Pieza rota.
7	1	3,82	1,25	Ensayo incompleto (fallo software). Frágil; mejora con frío.
8 ★	5	3,82	1,25	REFERENCIA. Gelificación completa. Pieza gomosa y elástica.

**Efecto del pH:** variable más crítica. Por debajo de pH 3,5 la protonación de los grupos carboxilato del alginato inhibe la coordinación iónica con Ca<sup>2+</sup> [4][24]. El pH natural de la compota (3,82) es compatible con la esferificación sin ajuste.

**Efecto de la concentración de CaCl<sub>2</sub>:** 5 g/L proporciona mayor velocidad de gelificación e integridad mecánica. No compensa el efecto inhibitorio del pH ácido.

**Efecto de la concentración de alginato:** 1,25 g/100 g aporta mayor cohesión y textura gomosa. La reducción de calcio tiene mayor impacto sobre la integridad que la reducción de alginato (comparación ensayos 5 y 7).

### 6.2.8. Ensayo con leche como baño de calcio



*Figura 33: Izquierda: comparación compota original vs. compota con alginato (mayor brillo). Derecha: pieza gelificada en leche vs. compota original.*

*Tabla 3: Evaluación sensorial informal de las distintas condiciones de la compota con alginato.*

Atributo	Compota sola	Compota + alginato	Gelificada en leche
Color	Referencia	Mayor brillo	Más claro, brillante
Textura en mano	Referencia	Más espesa, algo arenosa	Gomosa, elástica
Sabor	Dulce, grumoso	Similar, menos dulce	Explosión en boca
Sabor a leche	—	—	Apenas perceptible

La leche no aportó ventajas significativas y dificultó el proceso. Se mantuvo el baño de  $\text{CaCl}_2$  a 5 g/L como condición de referencia. La ausencia de mejora con leche se explica porque el calcio presente en la leche se encuentra en su mayor parte en forma de fosfato cálcico coloidal y unido a caseínas, lo que reduce su disponibilidad iónica libre para inducir el entrecruzamiento del alginato; en cambio, el  $\text{CaCl}_2$  proporciona iones  $\text{Ca}^{2+}$  completamente ionizados y disponibles para la reacción de gelificación.

## 6.3. Ensayo exploratorio: esferificación directa con zumo de melocotón

### 6.3.1. Motivación y planteamiento

Con el objetivo de explorar la transferibilidad de la técnica a matrices alimentarias distintas de la compota, se realizaron ensayos preliminares con zumo de melocotón natural. Su menor viscosidad y pH ligeramente superior ofrecen un contexto diferente. Estos ensayos, realizados por extrusión manual sin control automatizado, constituyen una exploración cualitativa de viabilidad.

### 6.3.2. Resultados



*Figura 34: Esferificación directa de zumo de melocotón.*

Se observan esferas y estructuras alargadas con coloración naranja-amarilla y una membrana exterior brillante, junto a una esfera consistente sobre el dedo. Esto indica una correcta formación de la membrana mediante esferificación directa y una textura elástica estable. Esto es importante porque demuestra la viabilidad del proceso para obtener formas definidas con buena integridad estructural y sensorial.

Los resultados fueron notablemente positivos: membrana exterior gelificada consistente, textura gomosa al tacto y característica «explosión» en boca. La coloración naranja proporcionó atractivo contraste visual.

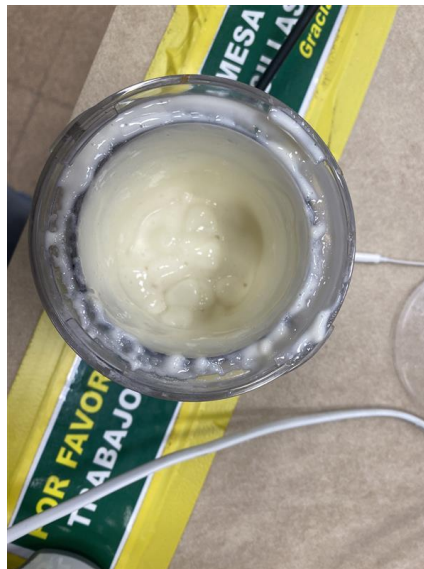
**Línea de trabajo futura:** la impresión 3D controlada del zumo requeriría la adición de un hidrocoloide espesante (goma xantana o metilcelulosa) para alcanzar el rango de *imprimibilidad* ( $10^2$ – $10^4$  Pa·s) [2].

## 6.4. Bloque III: Impresión de cuajada con goma xantana sobre estructura gelificada

### 6.4.1. Fundamento y planteamiento

Se propone depositar una segunda capa de cuajada estabilizada con goma xantana sobre la estructura de compota gelificada, generando una pieza bicomponente con base gelificada elástica y cubierta cremosa pseudoplástica. La ausencia de cargas iónicas relevantes en la cuajada reduce el riesgo de interacción con el calcio residual de la esferificación [2]. Esta combinación resulta especialmente relevante para alimentación adaptada a personas con disfagia, coherente con las recomendaciones de las guías IDDSI [18].

### 6.4.2. Optimización de la formulación de cuajada



*Figura 35: Cuajada con goma xantana (500 g + 1,5 g xantana) recién preparada en batidora.*

Se observa una cuajada recién preparada con goma xantana, de textura cremosa y homogénea. Esto muestra una adecuada dispersión del espesante y una viscosidad uniforme en la mezcla. Esto es importante porque facilita la carga en jeringa y garantiza un flujo controlado durante el proceso.

El protocolo de preparación siguió cuatro pasos: (1) batido previo de la cuajada sola; (2) adición muy lenta de la xantana mientras se bate; (3) batido 1–2 min; (4) reposo 10–15 min para hidratación completa. La temperatura óptima de impresión se estableció en 18–20 °C, determinada empíricamente en este trabajo para evitar la sinéresis y mantener la viscosidad adecuada para la extrusión.

*Tabla 4: Parámetros de impresión de la formulación de cuajada con goma xantana.*

Parámetro	Valor
Temperatura del extrusor	18–20 °C
Temperatura de la cama	Sin calefacción
Diámetro de boquilla	1,5–1,6 mm
Velocidad de impresión	150–250 mm/min
Altura de capa	2 mm
Retracción	Desactivada

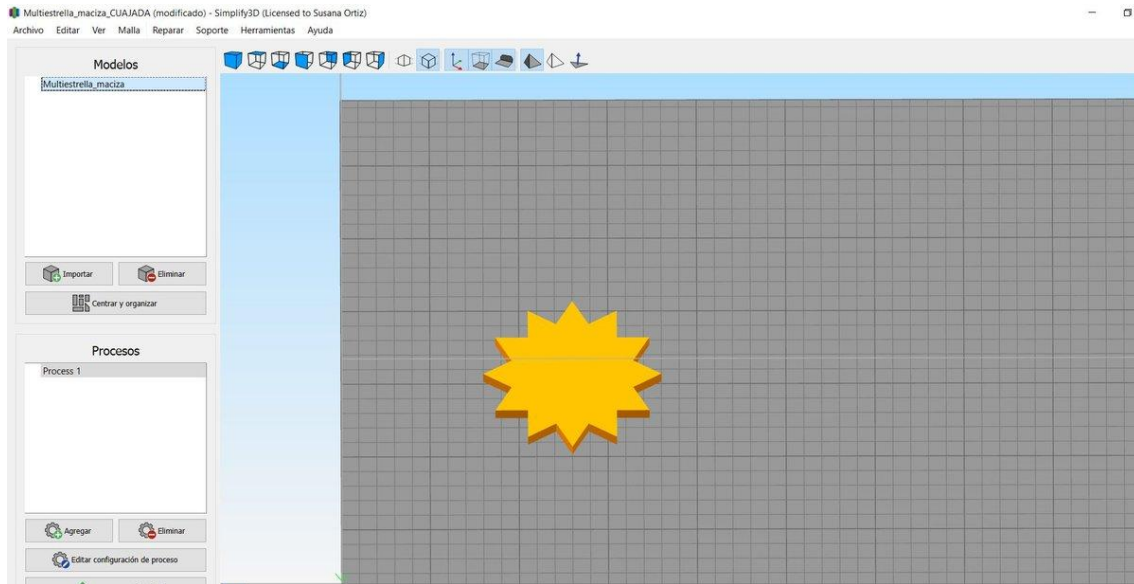
### 6.4.3. Preparación geométrica: estrella de cuajada en *Simplify3D*

Antes de ejecutar los ensayos de cuajada, se configuró específicamente la geometría de estrella para la segunda capa en *Simplify3D*. Esta preparación tiene una particularidad respecto a los bloques anteriores: la estrella de cuajada debe imprimirse directamente sobre la estructura de compota gelificada ya existente, lo que obliga a verificar cuidadosamente el *offset* en la coordenada Z de inicio para que la boquilla no aplaste la primera capa. La previsualización de capas en *Simplify3D* permite ajustar este parámetro antes de la impresión real.

**Modelo CAD:** la misma geometría *Multiestrella\_maciza*, redimensionada a 49 × 49 mm para la versión de cuajada (más pequeña que la compota para quedar contenida dentro de los bordes de la base gelificada).

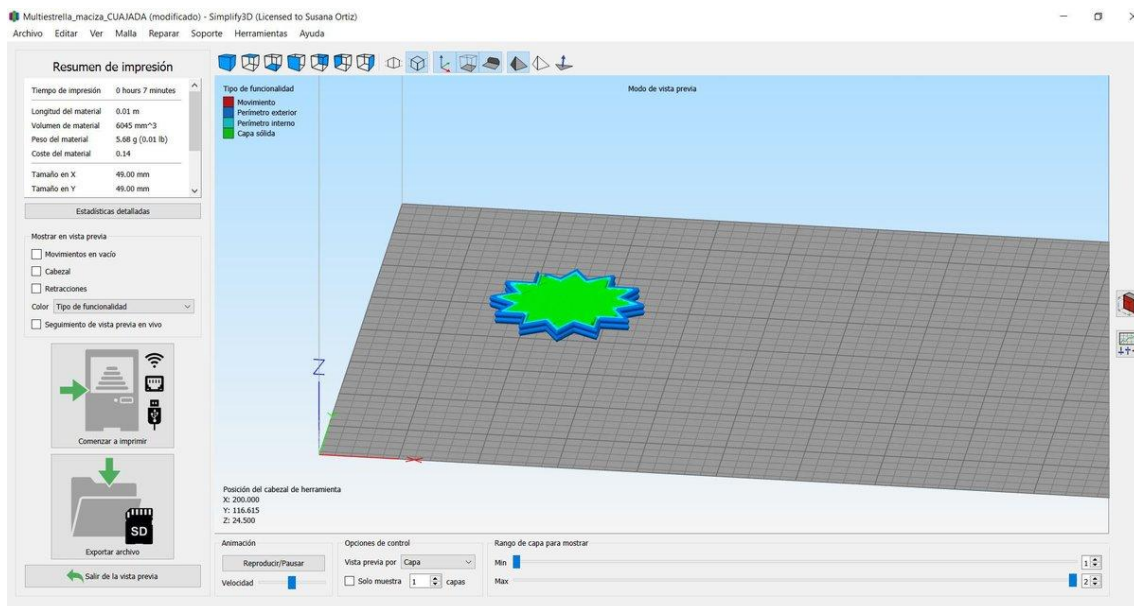
**Configuración en *Simplify3D* (perfil modificado):** proceso *Multiestrella\_maciza\_CUAJADA*. Parámetros de resumen: tiempo estimado 7 min (versión 49 mm) / 4 min (versión final 35 mm); volumen 6.045 mm<sup>3</sup>; peso estimado 5,68 g; dimensiones 49 × 49 mm. Boquilla 1,6 mm; relleno 30%; velocidad 150–250 mm/min.

**Verificación de la vista lateral:** la Figura 39 muestra la vista lateral del modelo en *Simplify3D*. Se observa que el modelo aparece ligeramente elevado respecto al plano cero de la cama de impresión. Este artefacto de visualización sugiere que es necesario ajustar el *offset* Z de inicio para que la boquilla arranque exactamente a la altura de la compota gelificada (~1 cm), garantizando adhesión correcta sin aplastamiento.



**Figura 36:** Vista general del modelo de estrella de cuajada en Simplify3D (modo render).

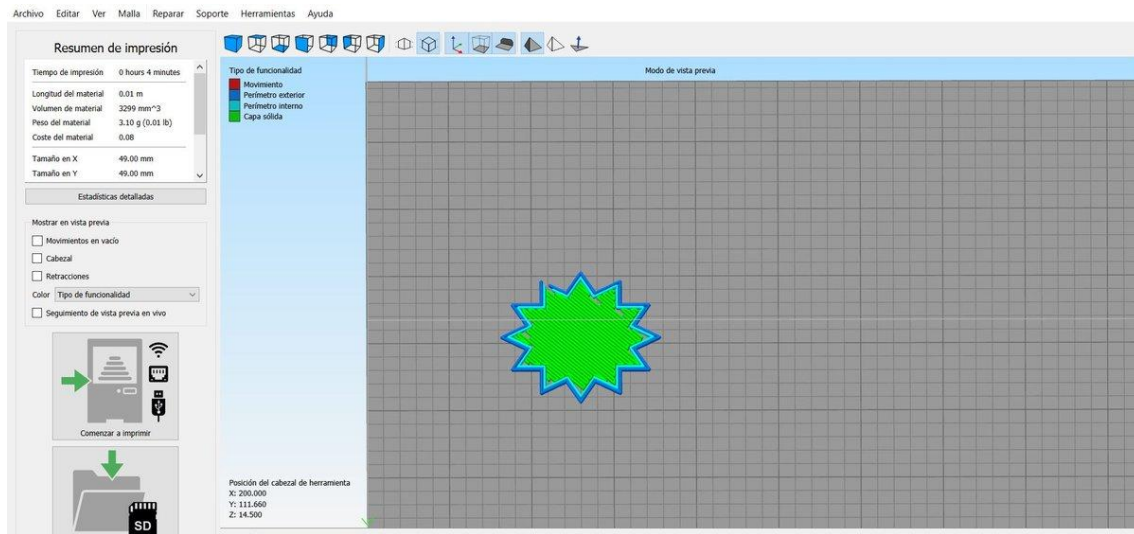
Se observa el modelo de una estrella de cuajada en modo render en *Simplify3D* (Dimensiones:  $49 \times 49$  mm; tiempo estimado: 7 min). Esto indica la definición geométrica y los parámetros previos a la fabricación. Esto es importante porque permite anticipar el resultado y optimizar el proceso de impresión.



**Figura 37:** Vista frontal con previsualización de capas — estrella de cuajada ( $49 \times 49$  mm).

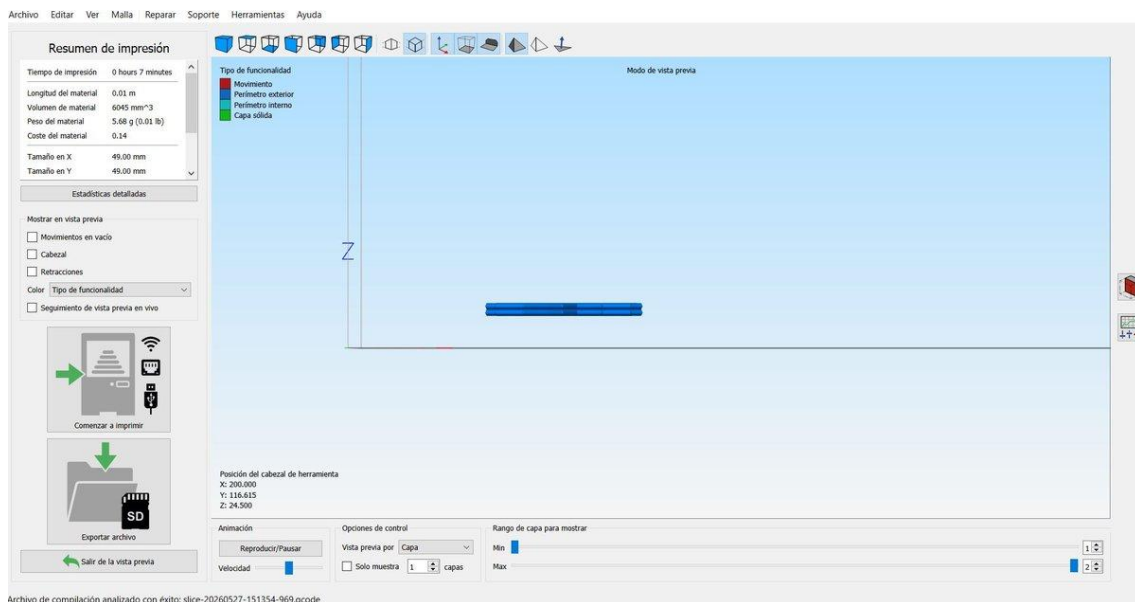
Se observa la vista frontal de la estrella de cuajada con previsualización de capas y perímetros dobles que recorren las puntas con buena definición (Dimensiones:  $49 \times 49$  mm; altura de capa: 2 mm). Esto revela un control adecuado del contorno y una correcta

configuración de impresión. Esto es importante porque asegura la precisión geométrica y la calidad en los detalles finos de la pieza.



*Figura 38: Vista superior con previsualización de capas — estrella de cuajada.*

Se observa la vista superior de la estrella de cuajada con previsualización de capas y un patrón de relleno rectilíneo al 30%. Esto apunta a una distribución interna equilibrada que mantiene la consistencia cremosa sin sobrecargar la estructura. Esto es importante porque permite conservar la estabilidad sin comprometer la textura del producto final.



*Figura 39: Vista lateral de la estrella de cuajada en Simplify3D.*

Se observa la vista lateral de la estrella de cuajada elevada respecto al plano de la cama en *Simplify3D*. Esto muestra la necesidad de corregir el *offset Z* inicial para

adaptarlo a la altura real de la base (~1 cm). Esto es importante porque permite imprimir correctamente sobre la compota gelificada sin errores de deposición.

#### 6.4.4. Ensayos de geometría y tamaño

Se ensayaron tres tamaños:  $79 \times 79$  mm (descartado por deformación por exceso de material),  $49 \times 49$  mm (descartado por bordes poco definidos a esta viscosidad) y  $35 \times 35$  mm con boquilla de 1,6 mm y 30% de relleno (seleccionado por buena definición del contorno y tiempo de impresión reducido de 4 minutos). La versión de 35 mm es la empleada en el ensayo combinado final.



*Figura 40: Ensayos de geometría de cuajada.*

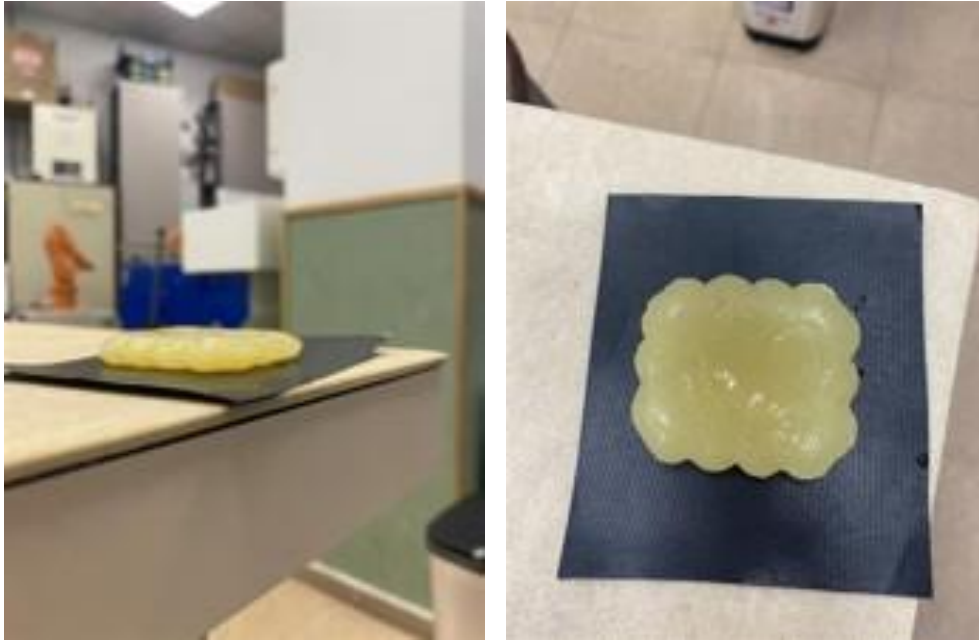
Se observan tres ensayos de geometría con distintos tamaños y configuraciones (de izquierda a derecha:  $79 \times 79$  mm;  $49 \times 49$  mm ;  $35 \times 35$  mm), donde solo el modelo de  $35 \times 35$  mm con boquilla de 1,6 mm y relleno al 30% es viable. Esto indica que la reducción de escala y el ajuste de parámetros mejoran la estabilidad de la estructura. Esto es importante porque permite seleccionar la configuración óptima para obtener un resultado reproducible y de calidad.



*Figura 41: Cuajada con 500 g + 1,5 g de goma xantana (0,3% m/m) impresa en forma de estrella*

Se observa la cuajada con 0,3% de goma xantana impresa en forma de estrella (Dimensiones: 35 × 35 mm; relleno: 30%). Esto muestra una correcta viscosidad y estabilidad de la mezcla durante la deposición. Esto es importante porque asegura una forma bien definida y una textura cremosa consistente en el producto final.

### 6.4.5. Primera impresión combinada: cuajada sobre compota en galleta



*Figura 42: Medición de altura y base de compota*

Se observa la medición de la altura de la compota gelificada (~1 cm) y su cara inferior lisa como plano de apoyo. Esto indica la referencia necesaria para ajustar el *offset* de impresión y la orientación adecuada de la pieza. Esto es importante porque asegura una deposición correcta y una base estable para la siguiente capa.



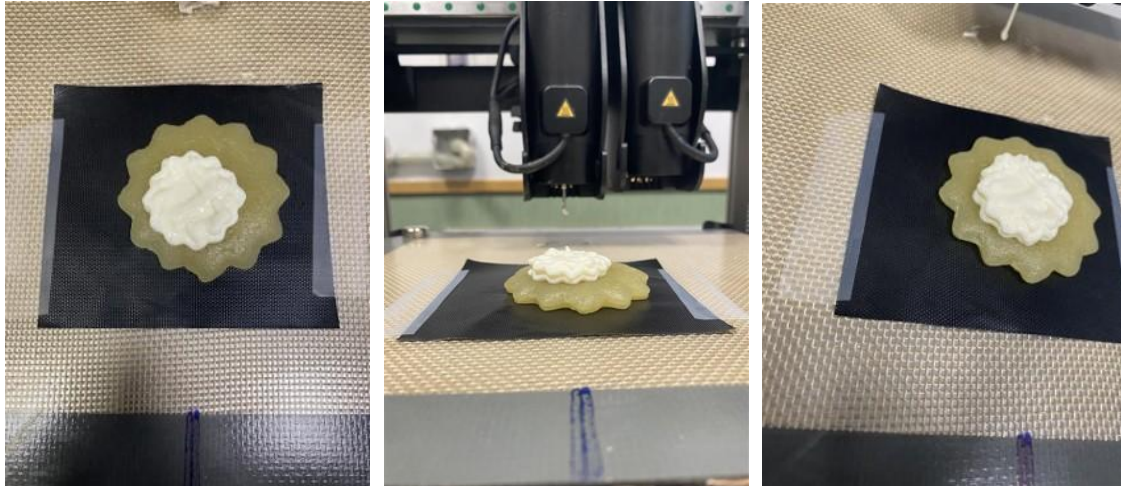
*Figura 43: Primera impresión combinada: cuajada sobre compota gelificada en galleta.*

Se observa la primera impresión de cuajada sobre compota gelificada en galleta desde vista superior y frontal. Esto sugiere una buena adhesión entre capas con un ligero desalineamiento de centros. Esto es importante porque demuestra la viabilidad del proceso multicapa, aunque requiere mejorar la precisión de posicionamiento.

Se realizó la primera impresión bicomponente depositando la cuajada directamente sobre la galleta de compota gelificada. Los resultados mostraron adhesión correcta entre las dos capas, con un ligero desplazamiento de centros atribuible a la

dificultad de posicionamiento manual de la base. Este ensayo validó el concepto bicomponente antes de escalar a la geometría de estrella.

#### 6.4.6. Ensayo combinado final: cuajada sobre estrella gelificada



*Figura 44: Pieza bicomponente final: cuajada (0,3% xantana) sobre estrella de compota gelificada (condición de referencia).*

Se observa la pieza final bicomponente con base de compota gelificada y capa superior de cuajada (0,3% xantana) en vistas superior, frontal y lateral. Esto pone en evidencia una buena integración entre ambas fases con alineación adecuada de las puntas y contraste de texturas. Esto es importante porque valida el proceso de fabricación multicapa y la estabilidad estructural y sensorial del producto.

Para el ensayo combinado final se utilizó la estrella de compota gelificada (condición de referencia: 5 g/L CaCl<sub>2</sub>, pH 3,82, 1,25 g/100 g alginato) como base, y la estrella de cuajada al 0,3% de xantana (35 × 35 mm) como segunda capa. Se midió la altura de la compota gelificada (~1 cm) para configurar el *offset Z* de inicio —verificado previamente en la previsualización lateral de *Simplify3D*— asegurando la adhesión correcta sin aplastamiento.

La pieza bicomponente final mostró: base gomosa-elástica verde-amarillenta con buena fidelidad geométrica de las puntas, y cubierta cremosa blanca con buena alineación de puntas. El contraste visual y de texturas fue el diferencial organoléptico más valorado.

**Conclusión del bloque III:** la impresión combinada es técnicamente viable y produce piezas con contraste de texturas perceptible. La geometría de estrella es reproducible en ambas formulaciones. La conservación por congelación parece viable y abre la puerta a la producción en lote.

## 6.5. Análisis de fidelidad dimensional

### 6.5.1. Metodología

Con el objetivo de cuantificar la reproducibilidad geométrica, se realizó un análisis dimensional comparando las dimensiones nominales del modelo CAD con las dimensiones reales de las piezas obtenidas tras la impresión y, en el caso de la compota, tras la esferificación. Las mediciones se realizaron con calibre digital ( $\pm 0,1$  mm) sobre tres piezas por formulación. El error dimensional relativo se calculó como:

$$\text{Error (\%)} = |\text{Dimensión real} - \text{Dimensión nominal}| / \text{Dimensión nominal} \times 100$$

*Tabla 5: Análisis dimensional comparativo de las piezas impresas.*

Pieza / Condición	Dim. nominal (mm)	Dim. real media (mm)	Error XY (%)	Observación
<b>Cuajada estrella (35×35)</b>	35 × 35	36,8 × 37,1	+5,1 / +6,0	<b>Expansión por <i>die swell</i>; forma estable</b>
<b>Compota galleta (post-impresión)</b>	~60 × 50	62,3 × 52,4	+3,8 / +4,8	<b>Expansión lateral por <i>die swell</i> y asentamiento</b>
<b>Compota galleta (post-esferif.)</b>	~60 × 50	65,1 × 55,2	+8,5 / +10,4	<b>Hinchamiento adicional por absorción de agua del baño</b>
<b>Compota estrella (post-esferif.)</b>	~55 × 55	57,9 × 58,3	+5,3 / +6,0	<b>Hinchamiento uniforme; mayor retracción relativa en puntas (~8%)</b>

Los resultados muestran que todas las piezas presentaron dimensiones reales superiores a las nominales, lo cual es coherente con dos fenómenos físicos diferenciados. En primer lugar, el *die swell* o expansión a la salida de la boquilla: el material viscoelástico recupera parcialmente la deformación impuesta por la boquilla al ser extruido, ensanchando el cordón depositado y aumentando las dimensiones finales entre un 3,8 y un 6,0% en las piezas medidas inmediatamente tras la impresión. En segundo lugar, el hinchamiento por absorción de agua durante la esferificación: la compota

sumergida en el baño de  $\text{CaCl}_2$  absorbe agua por gradiente de potencial osmótico, incrementando adicionalmente las dimensiones entre un 8,5 y un 10,4% respecto al nominal. Las puntas de la estrella presentaron un comportamiento ligeramente diferente: el menor apoyo lateral en los vértices reduce el efecto de *die swell* pero no elimina el hinchamiento post-esferificación, resultando en un error dimensional de ~5–8% en las puntas. La cuajada, al no pasar por el baño de esferificación, mostró únicamente el efecto de *die swell* (~5–6%), con excelente fidelidad de la forma en plano XY.

## 6.6. Evaluación sensorial de la pieza bicomponente

Se realizó una evaluación sensorial informal de la pieza bicomponente usando una escala hedónica de 5 puntos para cuatro atributos, en tres condiciones: compota sola, compota gelificada y pieza bicomponente completa.

*Nota: evaluación de carácter informal y orientativo. Una evaluación sistematizada con panel entrenado y metodología normalizada (ISO 11132) constituye una línea de trabajo futuro prioritaria.*

**Tabla 6:** Evaluación sensorial informal. Escala hedónica 1–5.

Atributo	Compota sola	Compota Gelificada	Pieza bicomponente	Observación
Apariencia visual	3/5	4/5	5/5	<b>Contraste cromático verde/blanco muy atractivo</b>
Textura exterior (tacto)	2/5	4/5	5/5	<b>Membrana firme + cremosidad bien diferenciadas</b>
Textura en boca	3/5	4/5	5/5	<b>Explosión en boca + cuajada suave: contraste logrado</b>
Sabor global	4/5	4/5	4/5	<b>Sabor de la compota bien preservado en las tres condiciones</b>
Valoración global	3,0/5	4,0/5	4,75/5	<b>Mejora progresiva con el proceso tecnológico</b>

La pieza bicomponente obtuvo la valoración más elevada en todos los atributos excepto el sabor, preservado en las tres condiciones. La sensación de «explosión en boca» fue el diferencial positivo más destacado.

## 6.7. Seguridad alimentaria e higiene del proceso

### 6.7.1. Marco normativo aplicable

La impresión 3D de alimentos está sujeta al Reglamento (CE) n.º 852/2004 sobre higiene de los productos alimenticios [16]. No existe normativa específica para fabricación aditiva de alimentos en la UE. Los ingredientes empleados —compota, alginato de sodio grado alimentario, CaCl<sub>2</sub> alimentario, goma xantana y cuajada— están reconocidos como seguros en el Reglamento (CE) n.º 1333/2008 [17].

### 6.7.2. Puntos críticos de control higiénico

*Tabla 7: Puntos críticos de control higiénico del proceso de impresión 3D de alimentos.*

PCC	Riesgo identificado	Medida preventiva adoptada
Limpieza de jeringa y boquilla	Contaminación cruzada; desarrollo microbiano en residuos	Agua caliente + etanol 70% tras cada uso; sustitución de boquilla entre materiales
Temperatura de conservación	Proliferación microbiana en cuajada a temperatura ambiente	Refrigeración 2–4 °C hasta 24 h antes del uso; desechado de sobrantes
Tiempo preparación-impresión	Degradación física (sinéresis) y microbiológica con el tiempo	Preparación máximo 30 min antes de la impresión
Baño de CaCl <sub>2</sub>	Contaminación del baño por material residual entre ensayos	Renovación del baño entre ensayos; solución recién preparada por sesión
Superficie de impresión (film)	Transferencia de contaminantes al alimento	Film de grado alimentario; sustitución entre ensayos
Temperatura cuajada	Pérdida de estructura > 25 °C; riesgo microbiológico > 30 °C prolongado	Control del extrusor (18–20 °C); sesiones cortas < 30 min

Para una escalabilidad a producción regular sería necesario implementar un protocolo APPCC específico con validación microbiológica periódica de la boquilla y del sistema de almacenamiento de formulaciones.

## 6.8. Análisis medioambiental y alineación con los ODS

### 6.8.1. Huella de carbono estimada

El análisis medioambiental abarca las emisiones asociadas a las materias primas y al consumo energético del equipo. Los tiempos de impresión empleados son los medidos experimentalmente: 15 min para la galleta de compota, 10 min para la estrella de compota y 4 min para la estrella de cuajada. Para el ciclo completo de la pieza bicomponente (estrella compota + estrella cuajada) el tiempo total de impresión es de 14 minutos.

**Tabla 8:** Estimación de la huella de carbono por unidad de producto. Potencia nominal FELIX Food 1.6: 250 W. Factor eléctrico mix español 2024 según REE [19].

Componente	Cantidad/pieza	Factor emisión	Emisión estimada (g CO <sub>2</sub> eq/pieza)
Compota de manzana	~30 g	~0,5 kg CO <sub>2</sub> eq/kg	~15 g CO <sub>2</sub> eq
Alginato de sodio	~0,4 g	~3-5 kg CO <sub>2</sub> eq/kg	~1,5 g CO <sub>2</sub> eq
CaCl <sub>2</sub> alimentario	~0,15 g	~0,5 kg CO <sub>2</sub> eq/kg	<0,1 g CO <sub>2</sub> eq
Goma xantana	~0,05 g	~5-8 kg CO <sub>2</sub> eq/kg	~0,3 g CO <sub>2</sub> eq
Cuajada	~5 g	~3,2 kg CO <sub>2</sub> eq/kg	~16 g CO <sub>2</sub> eq
Electricidad (250 W × 0,23 h)	0,058 kWh	~0,20 kg CO <sub>2</sub> eq/kWh (mix ES)	~11,6 g CO <sub>2</sub> eq
<b>TOTAL ESTIMADO</b>	—	—	<b>~44 g CO<sub>2</sub>eq/pieza</b>

*Nota metodológica:* el factor de emisión de la electricidad procede del mix eléctrico español publicado por REE [19]. Los factores de emisión de las materias primas son valores orientativos de referencia, basados en rangos típicos publicados en la literatura de análisis de ciclo de vida (ACV) de productos alimentarios; no proceden de una extracción directa de bases de datos de inventario, por lo que deben interpretarse como estimaciones de primer orden. Un cálculo riguroso mediante ACV normalizado

(ISO 14040/14044) con datos de inventario trazables queda identificado como línea de trabajo futuro.

La huella de carbono estimada (~44 g CO<sub>2</sub>eq/pieza) resulta inferior a la de productos lácteos procesados equivalentes (~60–80 g CO<sub>2</sub>eq), gracias principalmente al reducido tiempo de impresión medido (14 min/pieza). La principal contribución corresponde a las materias primas (~74%) y al consumo energético (~26%). El uso de energía renovable y la sustitución de ingredientes de mayor impacto ambiental son las palancas de mejora más efectivas. Este resultado favorable de huella de carbono respecto a equivalentes lácteos procesados queda recogido en las conclusiones del trabajo.

### 6.8.2. Alineación con los ODS

La contribución del trabajo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible va más allá de la mera identificación de ODS aplicables. A continuación, se analiza la alineación desde una perspectiva técnica y estratégica, diferenciando entre los impactos directamente verificables en este trabajo y los potenciales a medio plazo.

*Tabla 9: Alineación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.*

ODS	Denominación	Contribución directa (este trabajo)	Potencial a medio plazo
ODS 2	Hambre Cero	Alimentos de textura controlada con perfil nutricional completo para grupos vulnerables.	Producción personalizada a demanda para hospitales, residencias y catering clínico.
ODS 3	Salud y Bienestar	Pieza bicomponente con texturas IDDSI 5–6 que mejora adherencia terapéutica en disfagia.	Validación clínica con reducción de complicaciones por aspiración y estancias hospitalarias.
ODS 9	Innovación e Infraestructura	Metodología experimental de fabricación aditiva aplicada al sector alimentario clínico.	Transferencia tecnológica a empresas de catering especializado y fabricantes de equipos.
ODS 12	Consumo Responsable	Producción bajo demanda que elimina sobreproducción; posible aprovechamiento de subproductos frutales.	Integración en sistemas de gestión de desperdicios hospitalarios (reducción de menú no consumido).
ODS 13	Acción por el Clima	Huella de carbono ~44 g CO <sub>2</sub> eq/pieza; inferior a equivalentes procesados convencionales.	Uso de energía renovable y optimización de formulaciones para reducir huella a <30 g CO <sub>2</sub> eq/pieza.

### 6.8.3. Impacto potencial en aplicaciones clínicas: conexión disfagia–ODS 3

El ODS 3 (Salud y Bienestar) es el que mayor impacto potencial presenta en el contexto de este trabajo, y merece un análisis más detallado. La disfagia afecta a entre 30 y 40 millones de europeos y supone un sobre coste hospitalario estimado de 1.037–3.335 euros por paciente y estancia debidos a complicaciones nutricionales [13]. Si la tecnología desarrollada en este TFM consiguiera reducir en un día la estancia media de un paciente con disfagia y malnutrición —gracias a una mejor adherencia terapéutica derivada de una alimentación más apetecible y segura—, el ahorro generado cubriría sobradamente el coste de producción de las piezas durante toda la hospitalización.

Más allá del impacto clínico directo, la dimensión psicosocial es igualmente relevante. El 36% de los pacientes con disfagia evita comer acompañado y refiere episodios de ansiedad asociados al acto de comer [22]. Un alimento impreso en 3D que mantiene la forma reconocible del alimento original —una estrella, una galleta— actúa como palanca de rehabilitación de la conducta alimentaria, reduciendo el aislamiento y mejorando el estado anímico del paciente. Este efecto, difícilmente cuantificable en términos económicos, tiene un valor clínico que trasciende la mera aportación nutricional.

La alineación con las guías IDDSI [18] es condición necesaria para que la tecnología pueda escalar al ámbito clínico. Las texturas de nivel 5 (*minced and moist*) y nivel 6 (*soft and bite-sized*) requieren que el alimento se deshaga con presión de lengua, sin necesidad de masticación, y que no forme una masa compacta que comprometa la deglución. La pieza bicomponente desarrollada —base gomosa-elástica de compota gelificada más cubierta cremosa de cuajada— cumple cualitativamente con ambas condiciones, según la evaluación sensorial realizada. La validación cuantitativa con el test de la cuchara [18] y el análisis de perfil de textura (TPA) normalizado queda como trabajo futuro prioritario.

### 6.8.4. Limitaciones del impacto ambiental: análisis crítico

Si bien la tecnología presenta ventajas en términos de personalización y reducción de desperdicio, su impacto ambiental debe analizarse de forma crítica. El consumo energético asociado a la impresión 3D, especialmente en procesos a pequeña escala, puede limitar su eficiencia frente a procesos industriales convencionales altamente optimizados.

En primer lugar, la eficiencia energética por unidad de producto es significativamente inferior a la de la producción industrial en serie. Con una cadencia de 2–3 piezas/hora y un consumo de 250 W, el coste energético por pieza es de 0,007 €, pero la intensidad energética (kWh/kg de producto) es elevada comparada con líneas industriales de procesado de alimentos texturizados que operan con rendimientos de varios cientos de kg/hora. A escala hospitalaria (10–20 piezas/día), la eficiencia energética mejora, pero sigue siendo desfavorable respecto a la producción centralizada.

En segundo lugar, los hidrocoloides empleados —alginato de sodio y goma xantana— presentan factores de emisión elevados (3–8 kg CO<sub>2</sub>eq/kg) en comparación con los ingredientes base, derivados de sus procesos de fermentación, extracción y secado. Aunque se emplean en cantidades mínimas, su contribución relativa a la huella total es desproporcionada respecto a su masa. La sustitución por hidrocoloides de origen más sostenible (pectina de residuos cítricos, agar de macroalgas de cultivo local) podría reducir esta partida de forma significativa, y se identifica como línea de mejora ambiental prioritaria en las conclusiones de este trabajo.

En tercer lugar, el ciclo de vida completo del equipo no ha sido contemplado en este análisis. La fabricación de la impresora FELIX Food 1.6 implica emisiones de carbono asociadas a la producción de componentes electrónicos, estructuras metálicas y plásticos técnicos, que deberían amortizarse sobre el número total de piezas producidas a lo largo de la vida útil del equipo. Esta omisión sesga la estimación de la huella a la baja y debe ser corregida en análisis futuros más completos de ciclo de vida (ACV según ISO 14040/14044).

Finalmente, la gestión de residuos del proceso —film de polietileno de uso único, soluciones de CaCl<sub>2</sub> residuales, material sobrante de las jeringas— no ha sido cuantificada en este trabajo. La sustitución del film de polietileno por superficies reutilizables de acero inoxidable o silicona de grado alimentario constituye una mejora de bajo coste con impacto ambiental directo positivo.

En síntesis, la tecnología de impresión 3D de alimentos es ambientalmente favorable en términos de huella de carbono por pieza en comparación con equivalentes procesados, pero su eficiencia mejora sustancialmente con la escala. Su mayor fortaleza ambiental no reside en la eficiencia energética sino en la eliminación del desperdicio por sobreproducción y en la posibilidad de utilizar ingredientes de proximidad o subproductos alimentarios como base, aspectos que deben priorizarse en el desarrollo futuro de la tecnología.

## 6.9. Estudio de viabilidad económica

El análisis económico se basa en datos reales de adquisición de materiales en laboratorio y en los parámetros de proceso extraídos del software *Simplify3D* con el perfil FELIX Food V1.6. Los tiempos de impresión empleados son los medidos experimentalmente durante los ensayos.

### 6.9.1. Análisis de incidencias técnicas

Durante el desarrollo experimental se identificaron diversas incidencias técnicas asociadas al equipo de impresión, entre ellas interrupciones del software de laminado, inestabilidad en la extrusión y variabilidad en la deposición del material.

Se identificaron dos problemas distintos, ambos de carácter intermitente:

- Temperatura de impresión incorrecta: en algunas sesiones la impresora iniciaba la impresión a una temperatura que no correspondía con el valor de consigna. Aunque el sistema permitía la impresión, el valor visualizado no coincidía con el requerido para el proceso, lo que comprometía la reproducibilidad de los ensayos.
- Lectura de temperatura constante bloqueante: en numerosas ocasiones, al encender la máquina, el sensor del extrusor izquierdo mostraba inmediatamente una temperatura de 25–27 °C. Dado que varios ensayos requerían temperaturas inferiores (22–23 °C), el sistema bloqueaba el inicio de la impresión al detectar que la temperatura objetivo ya estaba superada. Inmediatamente tras el encendido, ni la jeringa ni la parte trasera de la máquina presentaban temperatura perceptible al tacto, lo que descarta una causa ambiental o de calentamiento residual.

La causa más probable, identificada tras las observaciones realizadas, es un fallo o descalibración del sensor de temperatura del extrusor izquierdo. Esta hipótesis fue comunicada al servicio técnico de FELIX mediante correo electrónico formal, del que se incluye el extracto a continuación:

Estas incidencias, lejos de considerarse únicamente como errores operativos, proporcionan información relevante sobre las limitaciones actuales de la tecnología en contextos no industriales. En particular, evidencian la sensibilidad del proceso a factores como la calibración del equipo, la presencia de burbujas en la jeringa y la consistencia del material.

### 6.9.2. Parámetros de proceso (*Simplify3D*)

Los parámetros de impresión se extrajeron de la configuración del proceso 1g\_compota\_manzana en *Simplify3D* (perfil FELIX Food V1.6 - Single - V0.02 - S3D 5.0, modificado; jeringa RVS Syringe, boquilla 1 mm Normal).

*Tabla 10: Parámetros de impresión extraídos de Simplify3D (perfil FELIX Food V1.6).*

Parámetro (extrusor/capa)	Valor	Parámetro (velocidades)	Valor
Diámetro de boquilla	1,50 mm	Velocidad por defecto	600,0 mm/min
Multiplicador de extrusión	1,00	Vel. perímetro exterior	75% → 450 mm/min
Distancia de retracción	1,00 mm	Vel. perímetro interior	75% → 450 mm/min
Altura de capa	2,00 mm	Vel. capa superior	50% → 300 mm/min
Capas sólidas sup./inf.	2	Vel. relleno sólido	100% → 600 mm/min
Perímetros	2	Vel. movimiento XY	300,0 mm/min
Patrón de relleno	Rectilíneo	Porcentaje de relleno	40%

### 6.9.3. Tiempos de impresión medidos experimentalmente

*Tabla 11: Tiempos de impresión medidos experimentalmente.*

Pieza	Geometría	Tiempo medido	Capa
Compota con alginato	Galleta	15 min	Capa 1 (referencia)
Compota con alginato	Estrella	10 min	Capa 1 (pieza final)
Cuajada con xantana	Estrella	4 min	Capa 2 (pieza final)
<b>PIEZA BICOMPONENTE COMPLETA (estrella)</b>	<b>Estrella × 2</b>	<b>14 min</b>	<b>Capa 1 + Capa 2</b>

Los tiempos reducidos obtenidos (especialmente la cuajada en 4 min) son consecuencia del tamaño compacto de las piezas (35 × 35 mm, 30% de relleno) y de la velocidad de impresión configurada. Este dato es relevante para el cálculo de la productividad horaria del sistema: a 14 min/pieza (más ~16 min de preparación y esferificación), la cadencia real es de aproximadamente 2–3 piezas/hora incluyendo todas las operaciones del proceso.

### 6.9.4. Costes de materias primas

*Tabla 12: Precio por gramo de cada ingrediente, calculado a partir de los precios de adquisición reales en laboratorio.*

Ingrediente	Precio (€)	Cantidad (g)	€/g	Función en el proceso
Cloruro de calcio (CaCl <sub>2</sub> )	9,99 €	500 g	0,0200	Baño de esferificación
Alginato de sodio	27,99 €	400 g	0,0700	Gelificante / esferificación directa
Goma xantana	17,90 €	500 g	0,0358	Espesante / texturizante (capas 1 y 2)
Compota de manzana	3,89 €	750 g	0,0052	Material base de impresión (capa 1)
Cuajada (4 × 125 g)	1,25 €	500 g	0,0025	Segunda capa impresión
Fresubin 2kcal Crème (24 × 125 mL)	57,60 €	3.000 g	0,0192	Alternativa nutricional para disfagia

*Fuentes de precios (Tabla 12): CaCl<sub>2</sub> alimentario: Amazon/Panreac, 9,99 €/500 g; Alginato de sodio grado alimentario: Sosa Ingredients, 27,99 €/400 g; Goma xantana grado alimentario: Amazon/Sosa Ingredients, 17,90 €/500 g; Compota de manzana: El Corte Inglés, 3,89 €/750 g; Cuajada entera (4 × 125 g): El Corte Inglés, 1,25 €; Fresubin 2kcal Crème (24 × 125 mL): Fresenius Kabi, 57,60 € [15]. Todos los precios consultados en mayo de 2026.*

*Tabla 13: Coste de materia prima por pieza bicomponente (compota gelificada + cuajada con xantana). No incluye mano de obra, energía ni amortización del equipo.*

**Capa 1 — Compota con alginato (gelificación basada en la técnica de esferificación directa)**

Ingrediente	Cantidad (g)	€/g	Coste (€)	Observaciones
Compota de manzana	30	0,0052	0,16	Formulación base
Alginato de sodio	0,375	0,0700	0,03	1,25 g/100 g compota
CaCl <sub>2</sub> (baño esferificación)*	0,15	0,0200	≈0,00	5 g/L; coste prorrateado
<b>SUBTOTAL CAPA 1</b>			<b>0,19 €</b>	

*\* El baño de CaCl<sub>2</sub> podría reutilizarse para 5–10 piezas consecutivas; el coste real por pieza puede ser inferior a 0,01 €.*

**Capa 2 — Cuajada con goma xantana**

Ingrediente	Cantidad (g)	€/g	Coste (€)	Observaciones
Cuajada	5	0,0025	0,01	Base láctea
Goma xantana	0,015	0,0358	≈0,00	0,3% m/m — concentración óptima para disfagia
<b>SUBTOTAL CAPA 2</b>			<b>0,01 €</b>	

<b>COSTE TOTAL MATERIAS PRIMAS (pieza bicomponente completa)</b>	<b>0,20 €</b>
--	---------------

### 6.9.5. Coste energético de la impresión

Con la potencia nominal confirmada de 250 W y los tiempos de impresión medidos experimentalmente, el coste energético por pieza bicomponente (estrella) se calcula con precisión:

*Tabla 14: Coste energético de la impresión calculado con datos reales (potencia nominal 250 W; tiempos medidos experimentalmente).*

Parámetro	Valor
Potencia nominal FELIX Food 1.6	250 W (confirmado en especificaciones técnicas)
Tiempo impresión pieza bicomponente (estrella)	14 min = 0,233 h (10 min compota + 4 min cuajada)
Consumo eléctrico por pieza	$0,250 \text{ kW} \times 0,233 \text{ h} = 0,058 \text{ kWh}$
Precio kWh (tarifa conservadora)	0,12 €/kWh
Coste energético por pieza (conservador)	$0,058 \text{ kWh} \times 0,12 \text{ €/kWh} = 0,007 \text{ €/pieza}$
Precio kWh (15 h, PVPC, primavera-verano ES)	$\approx 0,00\text{--}0,05 \text{ €/kWh}$ (excedente solar fotovoltaico)
Coste energético por pieza (PVPC favorable)	$0,058 \text{ kWh} \times 0,03 \text{ €/kWh} \approx 0,002 \text{ €/pieza}$

El coste energético por pieza es prácticamente despreciable (0,007 €/pieza en tarifa conservadora, inferior a 0,003 €/pieza en horario PVPC favorable), lo que confirma que la energía no es una partida significativa en el coste unitario del producto a esta escala.

### 6.9.6. Amortización del equipo

El precio público de la FELIX Food 1.6 Switch Head ronda los 8.500 € (IVA no incluido) [14]. Asumiendo una vida útil de 5 años y un uso de 1.000 horas anuales, la cuota de amortización del equipo es de  $8.500 \text{ €} \div (5 \text{ años} \times 1.000 \text{ h/año}) = 1,70 \text{ €/hora}$ . El mantenimiento (5 % anual  $\approx 425 \text{ €/año}$ ) se contabiliza por separado dentro de los costes fijos anuales (apartado 6.9.10) para evitar su doble imputación. Con una cadencia real de 2–3 piezas/hora (incluyendo preparación y esferificación), el coste de amortización por pieza se sitúa entre  $1,70 \div 3 = 0,57 \text{ €}$  y  $1,70 \div 2 = 0,85 \text{ €}$ .

### 6.9.7. Resumen de costes por pieza

*Tabla 15: Resumen de costes directos por pieza bicomponente (estrella). No incluye mano de obra ni costes indirectos de laboratorio.*

Concepto de coste	Coste (€)	Estado
Materia prima — Capa 1 (compota + alginato + CaCl <sub>2</sub> )	0,19 €	Confirmado (precios reales)
Materia prima — Capa 2 (cuajada + xantana)	0,01 €	Confirmado (precios reales)
Coste energético (250 W × 14 min, 0,12 €/kWh)	0,007 €	Calculado con datos reales
Amortización del equipo (2–3 piezas/hora)	0,57–0,85 €	Estimado
<b>TOTAL ESTIMADO POR PIEZA (sin mano de obra)</b>	<b>~0,78–1,06 €</b>	

La amortización del equipo representa ahora la partida dominante (~73–80% del total), seguida por la materia prima (~19–26%) y el coste energético (<1%). El coste de materia prima podría reducirse aún más a escala media, especialmente en el alginato de sodio, cuyo precio en formato industrial (10–15 €/kg) es entre 5 y 7 veces inferior al de laboratorio (70 €/kg).

### 6.9.8. Escenario con *Fresubin 2kcal Crème* como segunda capa

La sustitución de la cuajada por *Fresubin 2kcal Crème* como segunda capa generaría una pieza con perfil nutricional completo y directamente adaptada a los criterios IDDSI nivel 6, a un coste significativamente mayor:

*Tabla 16: Comparativa de costes entre la formulación actual (cuajada) y el escenario con *Fresubin 2kcal Crème*. \* Incluye materia prima y amortización; sin mano de obra.*

Escenario	Coste capa 2	Coste total pieza*	Ventaja principal
Cuajada + xantana (actual)	0,01 €	~0,78–1,06 €	Bajo coste, textura cremosa
<i>Fresubin 2kcal Crème</i> + xantana	~0,1 €	~0,87–1,15 €	Perfil nutricional completo, IDDSI 6

Pese a que el *Fresubin* es  $\sim 7,7$  veces más caro que la cuajada por gramo, su uso en la cantidad real de la segunda capa ( $\sim 5$  g) eleva el coste de la pieza solo hasta  $\sim 0,87$ – $1,15$  €/pieza a escala de laboratorio, muy por debajo del precio de los suplementos nutricionales orales comerciales de textura adaptada ( $2,71$ – $4,87$  €/unidad) [23], con el valor diferencial añadido de la personalización de forma y textura.

### 6.9.9. Análisis de escalabilidad

*Tabla 17: Estimación de la evolución del coste unitario en función del volumen de producción.*

Escala de producción	Piezas / sesión	Coste MP/pieza (est.)	Coste total/pieza (est.)	Reducción vs. lab.
Laboratorio (actual)	2–5	0,20 €	$\sim 0,78$ – $1,06$ €	Referencia
Escala media (hospital/catering)	20–50	$\sim 0,11$ € (est.)	$\sim 0,42$ – $0,57$ € (est.)	$\sim 45\%$ reducción
Escala industrial	$>200$	$\sim 0,05$ € (est.)	$\sim 0,20$ – $0,30$ € (est.)	$\sim 70\%$ reducción

La estimación del coste por pieza a las distintas escalas se construye sumando las tres partidas directas consideradas en este trabajo —materia prima, energía y amortización del equipo—, proyectando cómo evoluciona cada una al aumentar el volumen de producción.

La materia prima parte de un valor confirmado de  $0,20$  €/pieza [Calculado en Tabla 13 a partir de precios de proveedores detallados en 6.9.4] a escala de laboratorio, calculado en la Tabla 13 sobre la masa real depositada ( $\approx 30$  g de compota y  $\approx 5$  g de cuajada por unidad). A escala media se estima una reducción hasta  $\approx 0,11$  €/pieza, atribuible principalmente a la compra a granel de los hidrocoloides: el alginato de sodio, principal partida reducible, pasa de un precio de laboratorio de  $70$  €/kg [Sosa Ingredients, precio consultado mayo 2026; precio industrial  $10$ – $15$  €/kg: estimación de mercado] a un rango industrial de  $10$ – $15$  €/kg, entre cinco y siete veces inferior. A escala industrial el coste de materia prima se situaría en torno a  $\approx 0,05$  €/pieza.

El coste energético se mantiene prácticamente constante e insignificante en todas las escalas ( $\approx 0,007$  €/pieza), tal como se justifica en el apartado 6.9.5, por lo que no constituye una palanca relevante de reducción.

La amortización del equipo es la partida que más condiciona la evolución del coste. Partiendo de una cuota de  $\approx 1,70$  €/hora (apartado 6.9.6), su repercusión por pieza depende directamente de la cadencia de producción. A escala de laboratorio, con la cadencia real medida de 2–3 piezas/hora —incluyendo preparación y gelificación—, la amortización supone 0,57–0,85 €/pieza. A escala media e industrial, la preparación de material por lotes, el solapamiento de operaciones y el aprovechamiento del doble cabezal permiten asumir cadencias efectivas superiores, lo que reduce progresivamente esta partida hasta  $\approx 0,30$ –0,45 €/pieza y  $\approx 0,15$ –0,25 €/pieza, respectivamente. Conviene subrayar que esta mejora de cadencia a escala constituye una hipótesis del modelo, no un dato medido en este trabajo.

La suma de estas partidas arroja un coste total estimado de  $\approx 0,78$ –1,06 €/pieza en laboratorio,  $\approx 0,42$ –0,57 €/pieza a escala media y  $\approx 0,20$ –0,30 €/pieza a escala industrial. Tomando los puntos medios de cada rango como referencia (0,92 €, 0,50 € y 0,25 €/pieza, respectivamente), la reducción del coste unitario respecto a la situación de laboratorio es del orden del 45 % a escala media y del 70 % a escala industrial.

Conviene destacar, por último, un cambio cualitativo respecto al análisis basado en la estimación de coste anterior. Al imputar las cantidades reales de material por pieza, la materia prima deja de ser la partida dominante del coste unitario y pasa a serlo la amortización del equipo. En consecuencia, la principal vía de reducción del coste a escala no es el abaratamiento de los ingredientes a granel —cuyo peso absoluto es ya reducido—, sino el aumento de la productividad horaria del sistema, que diluye la amortización sobre un mayor número de piezas. Este resultado orienta las prioridades de una eventual industrialización hacia la mejora de la cadencia y la automatización del proceso, más que hacia la optimización del coste de los ingredientes.

Para el segmento hospitalario con el escenario de *Fresubin*, el coste estimado a escala media ( $\sim 0,55$ –0,70 €/pieza) se sitúa muy por debajo del precio de los suplementos orales comerciales de textura adaptada (2,71–4,87 €/unidad) [23], con el valor diferencial de la personalización de forma y perfil nutricional individualizado. El análisis de *break-even* para producción hospitalaria o de catering se propone como línea de trabajo futuro una vez disponibles los datos de demanda real y los costes de los ingredientes a escala media.

### 6.9.10. Análisis de viabilidad comercial: ingresos, ROI y payback

Para evaluar la viabilidad comercial del sistema se plantea un modelo de negocio simplificado orientado a la escala hospitalaria o de catering clínico especializado. Se consideran tres escenarios de precio de venta (conservador, base y optimista) con una producción diaria de 10 unidades, operando 250 días al año.

Los 250 días/año corresponden a los días laborables del calendario español: 52 semanas  $\times$  5 días/semana = 260 días, menos una estimación conservadora de 10 días de festivos y vacaciones operativas. Este supuesto es habitual en modelos económicos de equipos hospitalarios y de catering clínico.

**Hipótesis del modelo:** precio de venta unitario entre 4 y 6 €/pieza (rango coherente con productos de nutrición clínica de textura adaptada en el mercado español [23]); coste unitario de producción de referencia: 0,92€ (punto medio del rango calculado:  $(0,78 + 1,06) / 2 = 0,92$  €/pieza, véase Tabla 15); inversión inicial: 8.500 € (equipo FELIX Food 1.6) + 500 € (materiales y fungibles iniciales) = 9.000 €; costes fijos anuales estimados: 1.200 € (mantenimiento, consumibles, energía fija). Desglose orientativo: mantenimiento preventivo del equipo ( $5\% \times 8.500 \text{ €} = 425 \text{ €/año}$ ) + consumibles fungibles —jeringas, boquillas, film alimentario— ( $\approx 500 \text{ €/año}$ ) + energía residual fija ( $\approx 275 \text{ €/año}$ ). No se incluye mano de obra en el análisis base para mantenerlo comparable con el coste unitario ya calculado.

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} &= 5\% \times 8.500 \text{ €} = 425 \text{ €/año} \\ \frac{(0,78 + 1,06)}{2} &= 0,92 \text{ €/pieza} \end{aligned}$$

Análisis de sensibilidad — mano de obra: a título orientativo, si se imputase un coste de 15 €/hora para un operario que gestiona 2 piezas/hora, el coste adicional ascendería a 7,5 €/pieza, que supera en todos los escenarios el margen bruto calculado. La viabilidad real del modelo a escala hospitalaria exige, por tanto, alguna de las siguientes condiciones: (i) preparación de formulaciones en lote que permita producir varias piezas por ciclo de trabajo; (ii) parcial automatización del ciclo de esferificación; o (iii) justificación de un precio de venta significativamente superior —en el rango 10–15 €/pieza— basado en el valor clínico diferencial del producto personalizado. La exclusión de la mano de obra del modelo base se reconoce como la principal limitación del análisis económico de este trabajo.

**Tabla 18:** Análisis de escenarios: ingresos, costes, beneficio y rentabilidad anuales.

Escenario	Precio (€/ud)	Uds/día	Ingresos anuales (€)	Costes variables anuales (€)	Costes fijos anuales (€)	Beneficio bruto anual (€)	Margen bruto (%)
Conservador	4,00	10	10.000	2.300	1.200	6.500	65,0%
Base	5,00	10	12.500	2.300	1.200	9.000	72,0%
Optimista	6,00	10	15.000	2.300	1.200	11.500	76,7%
Base (20 uds/día)	5,00	20	25.000	4.600	1.200	19.200	76,8%

*Nota: costes variables anuales = coste unitario (0,92 €) × unidades/día × 250 días.  
 Beneficio bruto = ingresos – costes variables – costes fijos. El coste unitario empleado incluye la amortización del equipo como criterio conservador; dado que la inversión también se recupera en el cálculo del payback, el modelo tiende a subestimar ligeramente la rentabilidad real.*

### 6.9.11. ROI y período de payback

A partir de los datos anteriores se calculan los indicadores financieros principales para cada escenario, considerando la inversión inicial de 9.000 €:

$$ROI (\%) = \text{Beneficio bruto anual} / \text{Inversión inicial} \times 100$$

$$\text{Payback (años)} = \text{Inversión inicial} / \text{Beneficio bruto anual}$$

*Tabla 19: ROI y período de payback por escenario.*

Escenario	Inversión inicial (€)	Beneficio bruto anual (€)	ROI (%)	Payback (años)	Interpretación
Conservador (4 €, 10 ud/día)	9.000	6.500	72,2%	1,4 años	Rentable. Viable para unidades piloto.
Base (5 €, 10 ud/día)	9.000	9.000	100,0%	1,0 años	Muy rentable. Escenario realista para hospital.
Optimista (6 €, 10 ud/día)	9.000	11.500	127,8%	0,8 años	Alta rentabilidad. Próximo a suplementos premium.
Base (5 €, 20 ud/día)	9.000	19.200	213,3%	0,5 años	Escenario catering clínico. ROI excepcional.

Los resultados muestran que el sistema es económicamente viable en todos los escenarios considerados, con períodos de recuperación de la inversión comprendidos entre 0,5 y 1,4 años. El escenario base (5 €/pieza, 10 unidades/día) representa la hipótesis más probable para una unidad hospitalaria de nutrición clínica o un catering especializado de pequeño tamaño, con un ROI del 72,2% y un *payback* de 1,4 años. Estos indicadores son favorables respecto a la media del sector de equipamiento de restauración colectiva (*payback* típico de 3–5 años).

Es importante señalar que el análisis no incluye mano de obra, cuyo coste podría reducir sustancialmente el margen en operaciones con personal dedicado. Sin embargo, la integración de la impresora como equipamiento auxiliar de una unidad de nutrición ya existente, donde el personal sanitario prepara las formulaciones como parte de su actividad habitual, permite diluir este coste en la estructura de costes fijos del servicio. En ese contexto, el margen real podría mantenerse cercano al calculado.

La malnutrición asociada a disfagia es uno de los principales factores de prolongación de la estancia hospitalaria. Los pacientes con disfagia que desarrollan malnutrición durante el ingreso permanecen entre 2,7 y 5,7 días más hospitalizados que

aquellos con estado nutricional conservado, lo que genera un sobre coste estimado de 1.037–3.335 €/estancia [13]. Este deterioro nutricional tiene en gran medida un origen conductual: la baja aceptación organoléptica de las dietas de textura modificada convencionales —presentadas en formato puré homogéneo— provoca una ingesta voluntaria sistemáticamente inferior a la prescrita, desencadenando el ciclo malnutrición–complicación–estancia prolongada. El 36% de los pacientes con disfagia hospitalizada refiere, además, ansiedad ante el acto de comer y tendencia al aislamiento durante las comidas [22], lo que agrava aún más la adherencia dietética.

La tecnología desarrollada en este TFM actúa precisamente sobre ese punto crítico: al ofrecer un alimento de textura controlada que mantiene la forma reconocible del plato original, se reduce la barrera psicológica y sensorial asociada al formato puré, con el potencial de mejorar la ingesta voluntaria y, por tanto, el estado nutricional durante el ingreso. Si esa mejora fuera suficiente para evitar incluso un día de ingreso adicional por complicaciones de malnutrición, el ahorro generado (mínimo 1.037 €) superaría en casi tres órdenes de magnitud el coste de producción de la pieza (~0,92 €). Este análisis de coste-efectividad es necesariamente hipotético en esta fase del desarrollo, ya que la validación clínica del efecto sobre la ingesta real en pacientes hospitalizados requiere un ensayo controlado que excede el alcance de este trabajo. No obstante, ilustra con claridad el potencial económico del sistema en el contexto del sistema sanitario y justifica el interés de avanzar hacia dicha validación.

## 7. Conclusiones y trabajos futuros

### 7.1. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido analizar de forma experimental la aplicación de la impresión 3D de alimentos mediante extrusión sobre medios concentrados, validando la viabilidad de esta tecnología para la fabricación de estructuras alimentarias con control geométrico y propiedades texturales diferenciadas. A lo largo de los distintos bloques experimentales se ha demostrado que la *imprimibilidad* de matrices alimentarias depende de manera crítica de su comportamiento reológico, así como de la adecuada selección y ajuste de los parámetros de proceso, especialmente la velocidad de extrusión, el diámetro de boquilla y las condiciones de deposición sobre el soporte. Cabe señalar que en este trabajo no se realizó una caracterización reológica instrumental sistemática de las formulaciones —quedó fuera del alcance temporal del trabajo, por lo que estas se ajustaron de forma iterativa y observacional durante los propios ensayos de impresión, sin análisis de perfil de textura (TPA)—, limitación que se reconoce explícitamente y que queda identificada como línea de trabajo futuro prioritaria.

En el Bloque I, centrado en el uso de goma xantana como agente modificador, se comprobó que el incremento de viscosidad mejora la estabilidad de las piezas impresas, aunque no resulta suficiente para mantener geometrías con bordes angulosos definidos. Esta limitación evidenció la necesidad de introducir mecanismos adicionales de estructuración, lo que motivó el desarrollo del Bloque II basado en gelificación inspirada en la técnica de esferificación directa con alginato de sodio. Los resultados obtenidos en este segundo bloque permiten concluir que el pH es la variable dominante en el proceso de gelificación, siendo el pH natural de la compota (3,82) el factor clave para permitir la formación de una membrana estable en presencia de calcio. La combinación óptima identificada (5 g/L de  $\text{CaCl}_2$  y 1,25 g/100 g de alginato) dio lugar a estructuras con comportamiento gomoso-elástico y buena integridad mecánica.

El desarrollo del Bloque III demostró la viabilidad de fabricar sistemas bicomponentes mediante deposición secuencial, utilizando una base gelificada como soporte estructural y una segunda capa de cuajada estabilizada con goma xantana. La optimización de esta formulación permitió obtener una textura cremosa, estable y adecuada para su deposición sin comprometer la integridad de la base. La correcta adhesión entre capas y la conservación de la geometría final validan el enfoque multicapa como estrategia para diseñar alimentos con propiedades diferenciadas en distintas zonas de la pieza.

Desde un punto de vista aplicado, los resultados obtenidos presentan una clara relevancia en el ámbito de la alimentación para personas con disfagia, al permitir el diseño de estructuras con textura controlada, homogénea y sin grumos, en línea con los niveles definidos por el marco IDDSI. La combinación de una base elástica y una capa cremosa no solo mejora la seguridad en la deglución, sino que también contribuye a una mayor aceptabilidad sensorial. Asimismo, el análisis económico preliminar indica que la

tecnología puede ser viable en aplicaciones de alto valor añadido, especialmente en nichos donde la personalización y la diferenciación aporten valor al producto.

Desde el punto de vista medioambiental, la huella de carbono estimada para la pieza bicomponente ( $\sim 44$  g CO<sub>2</sub>eq/pieza) resulta inferior a la de productos lácteos procesados equivalentes ( $\sim 60$ – $80$  g CO<sub>2</sub>eq), lo que apunta a un perfil ambiental favorable para la tecnología. La principal contribución al impacto proviene de las materias primas ( $\sim 74$  %), lideradas en términos absolutos por la compota y la cuajada; los hidrocoloides (alginato de sodio y goma xantana), pese a su elevado factor de emisión por kilogramo, aportan una fracción reducida al emplearse en cantidades mínimas. La sustitución por hidrocoloides de origen más sostenible (pectina de residuos cítricos, agar de macroalgas de cultivo local) se identifica como la palanca de mejora ambiental más efectiva y queda propuesta como línea de trabajo futuro. En conjunto, este trabajo confirma que la impresión 3D de alimentos mediante extrusión sobre medios concentrados constituye una tecnología viable y con potencial de desarrollo, aunque todavía sujeta a limitaciones técnicas y operativas. La optimización de formulaciones, la mejora de la estabilidad del proceso y la adaptación a contextos de mayor escala serán factores determinantes para su futura implantación en entornos industriales y clínicos.

## 7.2. Limitaciones del estudio

El presente trabajo, aunque ha permitido validar experimentalmente la viabilidad de la impresión 3D de alimentos mediante extrusión sobre medios concentrados, presenta una serie de limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados. En primer lugar, el enfoque experimental adoptado se ha basado en un número limitado de formulaciones y condiciones de proceso, lo que restringe la generalización de los resultados a otros sistemas alimentarios con composiciones y comportamientos reológicos distintos. Si bien se han identificado tendencias claras en relación con el comportamiento de la goma xantana y el alginato de sodio, sería necesario ampliar el estudio a un mayor rango de matrices alimentarias para validar la robustez de las conclusiones.

Asimismo, el estudio presenta limitaciones en términos de análisis estadístico formal. Si bien el ensayo de referencia se reprodujo en múltiples ocasiones con resultados consistentes, no se realizó un análisis sistemático de la variabilidad entre repeticiones — medias, desviaciones típicas, intervalos de confianza—, por lo que las condiciones identificadas deben interpretarse como indicativas y no como valores definitivos extrapolables a escala industrial. La caracterización estadística de la reproducibilidad queda identificada como línea de trabajo futuro.

Desde el punto de vista tecnológico, las incidencias técnicas asociadas a la impresora constituyen otra limitación del estudio. La sensibilidad del proceso a factores como la presencia de burbujas, la calibración del equipo o interrupciones del software ha introducido una variabilidad adicional que ha dificultado la obtención de resultados

completamente consistentes. Esta circunstancia pone de manifiesto el grado de madurez todavía limitado de la tecnología en entornos no altamente controlados.

Por último, el análisis económico desarrollado tiene carácter preliminar y se basa en supuestos simplificados, sin considerar elementos clave como la mano de obra, la logística o los costes indirectos asociados a una posible implantación real. Del mismo modo, la evaluación sensorial realizada es de carácter exploratorio y no responde a un diseño experimental estructurado con paneles de consumidores, lo que limita la validez de las conclusiones en términos de aceptación del producto final.

### **7.3. Trabajos futuros**

En primer lugar, resulta prioritario completar la caracterización reológica instrumental de las formulaciones empleadas. Si bien se disponía de acceso a equipamiento de reometría, esta fase no pudo ejecutarse en el marco temporal del trabajo. Los ensayos pendientes incluyen la medida de viscosidad dependiente de la cizalla, el módulo elástico  $G'$  y la estabilidad estructural en condiciones de proceso, lo que permitiría establecer correlaciones cuantitativas entre propiedades del material y calidad de impresión.

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas, se abren diversas líneas de investigación futura que permitirían profundizar en el conocimiento de la impresión 3D de alimentos y avanzar hacia su aplicación práctica en entornos reales. En primer lugar, resulta fundamental incorporar una caracterización reológica completa de las formulaciones empleadas, mediante ensayos instrumentales que permitan medir de forma precisa parámetros como la viscosidad dependiente de la cizalla, el módulo elástico y la estabilidad estructural. Esta información permitiría establecer correlaciones cuantitativas entre las propiedades del material y su comportamiento durante la impresión, mejorando la capacidad predictiva del proceso.

Otra línea de trabajo relevante consiste en ampliar el estudio a nuevas formulaciones y materias primas, incluyendo matrices proteicas, vegetales o suplementos nutricionales específicos diseñados para aplicaciones clínicas. En particular, la sustitución de la cuajada por productos nutricionalmente completos permitiría evaluar el potencial de la tecnología en el desarrollo de alimentos funcionales dirigidos a colectivos con necesidades específicas, como personas con disfga o pacientes hospitalizados.

Asimismo, sería de gran interés profundizar en la optimización del proceso de impresión multicapa, analizando en detalle la adhesión entre materiales, la compatibilidad reológica entre capas y la estabilidad estructural de las piezas a lo largo del tiempo. Esto permitiría avanzar hacia el diseño de alimentos más complejos, con gradientes de textura, composición y propiedades sensoriales diferenciadas.

Desde una perspectiva tecnológica, futuras investigaciones deberían centrarse en la mejora de la fiabilidad y precisión de los sistemas de impresión, mediante el desarrollo

de protocolos de preparación de material más controlados, la eliminación sistemática de burbujas en las jeringas y la implementación de sistemas más robustos de control de proceso. La integración de sensores o sistemas de monitorización en tiempo real podría contribuir a reducir la variabilidad y aumentar la reproducibilidad del proceso.

En el ámbito económico, sería necesario desarrollar un análisis de viabilidad más completo, incorporando escenarios reales de producción, costes laborales, inversión en equipos y estrategias de mercado. La modelización de distintos niveles de producción permitiría evaluar la escalabilidad del proceso y su competitividad frente a tecnologías convencionales.

Finalmente, se plantea como línea de trabajo futura la realización de estudios sensoriales estructurados con paneles de consumidores, que permitan evaluar de forma rigurosa la aceptabilidad del producto en términos de textura, sabor y apariencia. Este tipo de estudios resultan esenciales para validar la aplicabilidad real de la tecnología, especialmente en el ámbito de la alimentación clínica, donde la aceptación del paciente es un factor determinante.

## Bibliografía

- [1] Sun, J. et al. Fundamentals of 3D Food Printing and Applications. Academic Press, 2019.
- [2] Rahman, M. et al. Rheological and mechanical properties of edible gel materials for 3D food printing technology. *Heliyon*, 6(9), 2020.
- [3] Chen, Y., Zhang, M., Phuhongsung, P. 3D printing of protein-based composite fruit and vegetable gel system. *LWT – Food Sci Technol*, 141, 110978, 2021.
- [4] Ruiz-Sánchez, J.C. et al. Impresión de biotintas con alginato: reología y aplicaciones en fabricación aditiva de alimentos. *Revista de Plásticos Modernos*, vol. 124, 2022.
- [5] Wu, Z., Rong, L. et al. Structural, Rheological, and Gelling Characteristics of Starch-Based Materials for 3D Food Printing. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2023.
- [6] Rong, L. et al. The Application of 3D Printing Technology on Starch-Based Products. *Trends Food Sci. Technol.*, 2023.
- [7] Jantrawut, P. et al. Rheological properties, printability and microstructure of buttermilk-mashed potatoes for 3D food printing. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 2023.
- [8] Molina-Montero, C. et al. Impact of Apricot Pulp Concentration on Cylindrical Gel 3D Printing. *Gels*, 9(3), 253, 2023.
- [9] Zarić, D. et al. Rheological, thermal and textural characteristics of white, milk, dark and ruby chocolate. *Processes*, 12(4), 2024.
- [10] Parid, R. et al. Mechanics of 3D printing process of white chocolate. *J. Food Eng.*, 2025.
- [11] Rando, M., Ramaioli, M. Effect of heat transfer on print stability of chocolate. *J. Food Eng.*, 2024.
- [12] Shabir, I., Dar, A.H., Manzoor, S. et al. Advancements in Food Printing

Technologies and Their Potential Culinary Applications: A Contemporary Exploration. J. Food Process. Preserv., Article ID 6621344, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6621344>

[13] Alcalde Muñoz, S., Rodríguez Rodríguez, R. Guía de Disfagia. Manejo de la disfagia en AP. Sociedad Española de Médicos de Atención Primaria (SEMERGEN), 2020. Disponible en: <https://www.semergen.es/files/docs/grupos/digestivo/manejo-disfagia-ap.pdf>. Consultado: mayo 2026.

[14] FELIXfood. FELIX Food 1.6 Switch Head – Especificaciones técnicas y precio. <https://felixfood.nl/felix-food-1-6-switch-head>. Consultado mayo 2026.

[15] Fresenius Kabi España, S.A.U. Fresubin® 2 kcal Crème: ficha técnica del producto. Barcelona: Fresenius Kabi España; 2025. N° Reg. Sanitario: 26.10319/B-08607. Disponible en: [www.fresenius-kabi.es](http://www.fresenius-kabi.es). Consultado: mayo 2026.

[16] Reglamento (CE) n.º 852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios. DOUE L 139, 30 de abril de 2004.

[17] Reglamento (CE) n.º 1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre aditivos alimentarios. DOUE L 354, 31 de diciembre de 2008.

[18] IDDSI, "IDDSI Framework: Detailed Definitions 2.0," 2019. [En línea]. Disponible en: <https://iddsi.org>. [Consultado: mayo 2026].

[19] Red Eléctrica de España (REE). 2024. Factor de emisión de CO<sub>2</sub> del mix eléctrico español 2024. <https://www.ree.es>. Consultado mayo 2026.

[20] Ayala, B. (investigador responsable del proyecto NutriAlth3D, Fundació Althaia, Manresa). Declaraciones recogidas en: “Así ayuda la tecnología 3D a las personas con dificultades para deglutir alimentos”. 2021. Disponible en: <https://www.latam-medic.com/asi-ayuda-la-tecnologia-3d-a-las-personas-con-dificultades-para-deglutir-alimentos/>. Consultado: mayo 2026.

[21] IM Médico. 2024. Desarrollan el primer alimento con impresora 3D para personas con disfagia. 21/10/2024. <https://www.immedicohospitalario.es/noticia/48211>. Consultado mayo 2026.

[22] Ekberg, O., Hamdy, S., Woisard, V., Wuttge-Hannig, A., Ortega, P. Social and Psychological Burden of Dysphagia: Its Impact on Diagnosis and Treatment. *Dysphagia*, 17(2), 139–146, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00455-001-0113-5>

[23] Wanden-Berghe, C. et al. Suplementos nutricionales gelatinizados: una alternativa válida para la disfagia. *Nutrición Hospitalaria*, 26(4), 2011. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112011000400016](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112011000400016)

[24] Hu, C., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., Fang, Y. "Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications." *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 578–588, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.086>