

Identificación de variables y parámetros para la formulación de pastas biobasadas para impresión 3D

Andrea Wechsler Pizarro ⁽¹⁾, Camila Donoso Fredes ⁽²⁾,
Paola Benavides Bermúdez ⁽³⁾, Yesenia Briones Castro ⁽⁴⁾
y Pablo Domínguez González ⁽⁵⁾

Resumen: En este artículo se estudiaron rangos de trabajo para desarrollar formulaciones de pastas biobasadas adecuadas para la impresión 3D. Estos parámetros dependen de la composición, los procesos de extrusión y secado se ven influenciados por el tipo y granulometría de carga utilizada y el tipo de aglomerante.

Para este estudio se consideraron como cargas conchas de mejillón, borra de café y carozo de palta, con una granulometría de 150µm cada una. Como aglomerante se utilizó alginato de sodio. La extrusión de cada una de las muestras se realizó manualmente. Se midió el tiempo de secado al tacto, la densidad, la contracción dimensional, la pérdida de humedad de secado y la cantidad máxima de capas que podían apilarse.

La cantidad de capas que permitió el proceso de impresión 3D de pastas biobasadas estuvo relacionada con la cantidad de carga, la cantidad de aglomerante y el contenido de humedad en la pasta. La mezcla de carozo de palta fue la que presentó mejor desempeño, en tanto la de borra de café presentó la menor cantidad de capas apilables. Esto se atribuye a que la primera mezcla contenía más carga que última, una menor cantidad de aglomerante y de agua. Cabe mencionar además que los componentes químicos de cada carga varían bastante entre sí, lo que afectó en su desempeño.

Palabras clave: Pastas biobasadas - Impresión 3D - Alginato - Borra de café - Conchas de mejillón - Carozo de palta - Parámetros de impresión 3D

[Resúmenes en inglés y portugués en las páginas 172-173]

⁽¹⁾ **Andrea Wechsler Pizarro**, PhD Built Environment (UNSW), Diseñadora Industrial (UBB), Académica Departamento de Diseño (UCh), directora del Laboratorio de Materiales Biobasados BioLab Fau y Coordinadora de BioRed Iberoamérica. Durante su experiencia profesional se ha desempeñado en proyectos de investigación y desarrollo en Diseño Sustentable y nuevos materiales biobasados. Además, se ha desempeñado como diseñadora y docente en cursos de pregrado y postgrado a nivel nacional e internacional. andreawechsler@uchilefau.cl

⁽²⁾ **Camila Donoso Fredes**, estudiante de Diseño, mención Industrial y Servicios (UCh). Durante sus estudios de pregrado se ha desempeñado como practicante del Laboratorio de Materiales biobasados BioLabFAU, donde ha colaborado en la sistematización y testeo

de materiales biobasados para la impresión 3D. Asimismo, ha prestado servicios de consultoría de Diseño a empresas que imparten programas educativos de robótica. camila.donosof@ug.uchile.cl

⁽³⁾ **Paola Benavides Bermúdez**, Ingeniera Civil Mecánica (PUCV) y Dra. en Ciencia de los Materiales (UCh). Codirectora del Laboratorio de materiales Biobasados BioLab Fau. Profesora asistente (UAI) e instructora (FAU UCh) en línea de fabricación y materiales en pre y postgrado, investigadora en BioRed Iberoamérica. Sus líneas de investigación son; desarrollo de materiales sostenibles, nuevos materiales biobasados y manufactura digital. paolabenavides@uchile.cl

⁽⁴⁾ **Yesenia Briones Castro**, Diseñadora Industrial (UCh), Diplomada en Economía circular (UCh) y en Estrategias pedagógicas para la vinculación con el medio (UCh). Docente de la Escuela de Diseño (FAU UCh), Codirectora del Laboratorio de Materiales Biobasados Biolab Fau. Investigadora BioRed Iberoamérica. Asesora de proyectos de investigación de I+D e Investigadora del Grupo de Nuevos Materiales del C+ (UDD). Se ha especializado en investigación, desarrollo y manufactura de nuevas materialidades, compuestas y biobasadas, y diseño sostenible. yessy.bc@uchile.cl

⁽⁵⁾ **Pablo E. Domínguez González**, Ingeniero en Mecánica (UTEM) y Máster en Tecnologías del Diseño. Codirector del Laboratorio de materiales Biobasados BioLab Fau. Profesor Asistente del Departamento de Diseño de la Universidad de Chile e investigador BioRed Iberoamérica. Asesor de proyectos de ingeniería y diseño, con especialidad en materiales compuestos, modelación paramétrica, simulación digital y prototipado rápido. pdominiguez@uchilefau.cl

Introducción

Este estudio nace desde la brecha identificada de la falta de un registro sistematizado al que se pueda consultar al momento de generar formulaciones de materiales biobasados para impresión 3D. Se buscó identificar las variables más adecuadas para poder generar pastas de materiales biobasados para impresión 3D.

Sustentabilidad y políticas

El mundo está en crisis por el sobregiro ambiental en el que nuestro sistema de consumo lineal nos ha llevado. Si bien existen nociones para poder frenar de alguna manera la crisis global a nivel nacional desde el diseño y la economía circular, aún no es suficiente. Se han generado pautas de políticas medioambientales para combatir el sobregiro ecológico, tales como el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP) con la guía

de “Consumo y Producción Sustentable” (SCP) (UNEP 1996, 2007), cuyos enfoques son el ecodiseño y la ecología industrial. El ecodiseño se define como una estrategia de diseño para disminuir los impactos medioambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida (Aguayo *et al.*, 2011). La ecología industrial por su parte estudia el flujo de energía y materiales a través de todo el ciclo de vida de un producto, con un enfoque particular en los impactos que las actividades industriales tienen sobre el medio ambiente (Garner & Keoleian, 1995).

Por otro lado, la economía circular es un modelo de producción y consumo que busca extender el ciclo de vida de productos lo más posible a través de estrategias tales como compartir, reutilizar, reparar y reciclar, en búsqueda de reducir los residuos al mínimo (Parlamento Europeo, 2023). Si bien, en Chile existen iniciativas para avanzar hacia una economía circular, estas no han logrado generar una mirada sistémica. Algunos ejemplos de estas iniciativas son la implementación de la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), los Acuerdos de Producción Limpia (APL) y acciones tales como la línea de innovación y ordenanzas municipales emblemáticas como la prohibición de bolsas plásticas.

Respecto al manejo de residuos sólidos, la práctica común en Chile implica la recolección, transporte y depósito en rellenos sanitarios; sin una categorización de ellos en la cual se distinga, por ejemplo, entre orgánicos e inorgánicos (Schmidt, 2021). De esta manera, los desechos orgánicos, al estar compactados, están sometidos a un proceso de degradación anaeróbico en el cual liberan Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales son los principales causantes del cambio climático. Desde el análisis de este escenario hay quienes han encontrado una motivación para estudiar el potencial que tienen los desechos orgánicos como materia prima para formular nuevos materiales.

Brechas

Según estudios encargados por el Ministerio del Medio Ambiente (2019), aún no se han detectado trabajos colaborativos con innovación en los que se aprecien gestores de iniciativas de desarrollo de materialidades con una visión desde el diseño. Algunas de las brechas identificadas son la falta de innovación de materiales y procesos y falta de proveedores de materiales (MMA Chile, 2021; Ramos *et al.*, 2021; Rubik & MMA Chile, 2019). En función de estas brechas identificadas, Wechsler, Briones & Domínguez (2024) llevaron a cabo un análisis exploratorio sobre cómo entidades que trabajan generando nuevos materiales para una economía circular se vinculan con la sociedad y la industria. De este análisis se infiere que, si bien existe difusión de los resultados de los proyectos generados por esas entidades, tienen un perfil bastante dinámico e informal. La difusión se lleva a cabo a través de redes sociales o de talleres y exposiciones y para un público joven (20-30 años). Se identifica además la falta de recursos académicos que entreguen una pauta y sistematización de trabajo que sirva de base al momento de generar nuevas formulaciones desde experiencias e investigaciones previas.

Algunas brechas adicionales identificadas se relacionan con las bajas posibilidades de producción industrial e inserción en el mercado. Los nuevos materiales biobasados debieran

ser compatibles con los procesos de producción actuales, con un igual o menor precio y de mejor calidad que los materiales tradicionales (Cores, 2018). Sin embargo, lograr un nivel productivo y de desempeño competitivo es muy complejo de lograr, porque gran cantidad de estos nuevos materiales carecen de homologación y suelen presentar un desempeño mecánico menor a los materiales tradicionales. Estos nuevos materiales, a pesar de sus potencialidades, deben hacerse un espacio para poder ser funcionales, reproducibles y atractivos para la sociedad actual. Para zanjar esta brecha se vuelve de vital importancia el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias sistematizadas y replicables que sirvan de base para desarrollos futuros.

Los materiales biobasados, diseño y comunidades creativas

En Chile y el mundo existen diversas comunidades que fomentan y desarrollan proyectos de investigación y desarrollo que vinculan innovación, tecnologías y diseño de materiales (Araújo & Franco, 2021). Entre estas se cuentan actores recientes que trabajan en la reconversión de residuos para alimentar nuevos procesos industriales. Estos grupos, por lo general al alero de universidades, obedecen a necesidades locales o a comunidades productivas colaborativas, como por ejemplo laboratorios de materiales académicos y de investigación, “*fablabs*” o emprendedores independientes (Meroni, 2007; Schwab, 2016; Donoso & Wechsler, 2020, Wechsler *et al.*, 2024).

Los *fablabs* son vinculadores sociales que nacen como talleres de fabricación digital capaces de producir objetos a escala local mediante información global. Su particularidad reside en su fuerte vinculación con la sociedad más que con la industria. Los *FabLabs* siguen la filosofía “Data In / Data Out” (DIDO), la cual plantea que la producción debe desarrollarse localmente, considerando el reciclaje de materiales y la solución a problemáticas locales (Diez, 2018). Wechsler *et al.* (2024) identificaron que muy pocos *FabLabs* generan publicaciones académicas. Entre sus resultados se cuentan formulaciones de materiales, varias de ellas son de código abierto, es decir, formulaciones que están a disposición digital para quienes deseen utilizarlas. Si bien los *FabLabs* no poseen una alta infraestructura tecnológica, sí trabajan casi en su mayoría en impresión 3D.

Impresión 3D

La impresión 3D es una técnica de manufactura aditiva (MA), en la cual se crean objetos tridimensionales modelados digitalmente, mediante la deposición del material en capas. Esta técnica de prototipado rápido se ha logrado posicionar como una de las favoritas de quienes se desarrollan en el área del diseño gracias a la reducción de tiempo y costo de fabricación (Huang *et al.*, 2014).

Insumos tradicionales para impresión 3d y pastas biobasadas

Los materiales empleados en la impresión 3D se pueden categorizar en filamentos y en pastas. Entre los filamentos más utilizados se encuentran los filamentos basados en ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico) (Marchante, 2022). El ABS se caracteriza por ser un plástico muy resistente con una alta capacidad de ser reciclado; sin embargo, no es biodegradable, por lo que su uso conlleva un impacto medioambiental negativo (Marchante, 2022). En relación con el PLA, Contreras (2019) indica que, si bien es un material biodegradable, requiere de condiciones de temperatura y humedad específicas para lograr su degradación, por lo que en la práctica no consigue ser un material efectivamente biodegradable.

Por su parte, la práctica actual de impresión 3D de pastas se caracteriza por la utilización de arcilla como materia prima. La arcilla es un recurso natural compuesto por recursos no metalíferos y se caracteriza por ser un material no renovable, ya que su formación se logra mediante la erosión del suelo a lo largo de millones de años (Miller, 1994).

La sustitución de los filamentos plásticos y arcillas por pastas biobasadas conlleva impactos positivos desde un ámbito social, económico y medioambiental. Estas formulaciones utilizan como materia prima materiales de desecho industrial y doméstico, lo cual permite la revalorización de un material considerado residuo y la producción de un material a bajo costo (Romani, Suriano & Levi, 2023).

Existen variados proyectos que tienen como objetivo el desarrollo de nuevos materiales para impresión 3D mediante la formulación de pastas biobasadas (Sauerwein *et al.*, 2020; Shahbazi, 2021; Garmulewicz *et al.*, 2023). Estos nacen desde la motivación de otorgar un nuevo valor a un material residual y desde el anhelo de utilizar materiales que permitan el ejercicio del diseño dentro de los marcos de la sostenibilidad (Otero, 2022). Además, estos materiales biobasados tienen una composición que permite que sean biodegradables y fácilmente compostables, logrando una alta degradación en un corto tiempo, no mayor a 30 días (Gascón, 2020), por ejemplo.

Entre los proyectos nacionales en los que se han desarrollado pastas biobasadas para impresión 3D se cuentan el proyecto de investigación folio 531807 “Investigación y desarrollo de un sistema open source de prototipado 3D para materiales biobasados”, ejecutado por el BioLabFAU de la Universidad de Chile. Algunos de los materiales desarrollados se componen desde la borra de café (Morales y Moya, 2022), el carozo de palta (Fernández y Moya, 2020), la cáscara de papa (Gascón, 2020), el papel (Barraza y Gutiérrez, 2020) y la cáscara de huevo (Céspedes y Gibbs, 2020).

Entre otros proyectos recientes locales se cuentan el proyecto del FabLab de la Universidad de Chile llamado Bioprinter, proyecto de aplicación de bioplásticos basados en almidón y agar agar para impresión 3D (Campos, 2022) y calcáreo con Hábitat Nodriza, quienes generaron objetos producidos mediante impresión 3D en un material de conchas de mejillón y alginato. En el marco de este proyecto se ratifica que pensar en el uso de un biomaterial es muy distinto al uso de un material constructivo común, la escala a la cual se puede llegar es mucho menor. Los autores concluyeron que es necesario comprender cuáles son las oportunidades, cualidades y limitaciones que entrega el material y en base a eso especular sobre sus usos (Riquelme, 2022).

Paralelamente han surgido plataformas de difusión de biomateriales. Estas plataformas incentivan a las personas a ser parte del mundo de los nuevos “materiales que se cocinan” a través de la publicación virtual de los pasos para su fabricación. Un ejemplo de esto es el sitio web Materiom, el cual funciona como una biblioteca y repositorio digital de formulaciones de materiales biobasados. En esta plataforma cientos de investigadores comparten sus formulaciones. En cuanto a formulaciones para impresión 3D, en Materiom solo se pueden encontrar 4 pastas biobasadas para impresión 3D. Estas son a base de concha de ostra (Georgiou, s.f.), cáscara de huevo (Otero, 2020), orujo de oliva (Asut, s.f.) y concha de mejillón (Sauerwein, s.f.).

En esta revisión se evidencia que la información entregada en las plataformas de libre acceso es limitada debido a que utilizan un lenguaje más bien técnico y poco intuitivo, donde el contenido es descrito de manera general sin entregar consideraciones necesarias para una fabricación completa. Esto se interpreta como una barrera de conocimiento que obstaculiza la búsqueda de información específica en la fabricación de materiales que se cocinan, que no fomenta la participación de nuevos investigadores o personas interesadas en este tema (Barros, 2020; Inostroza, 2020).

Variables que definir

Para comenzar a abordar los desafíos previamente planteados, se identifican tres variables que requieren de un estudio más exhaustivo: variables en la **composición del material**, variables de **impresión** y variables de **secado** del material.

Las variables de composición del material corresponden a los ingredientes y proporciones que componen cada pasta biobasada. Una formulación básica de una pasta de impresión se compone de 3 partes: la carga de material, el aglomerante y el agua. Es importante estudiar y caracterizar cómo se relacionan los ingredientes de una formulación, según las proporciones utilizadas y las características fisicoquímicas de cada componente.

Un segundo grupo de variables son las de impresión, las que corresponden a todos los ajustes que pueden ser trabajados desde la impresora, como la velocidad de extrusión, el movimiento del cabezal, el diámetro y ángulo de la boquilla de salida del material, entre otras.

Por último, las variables de secado son los ajustes externos al material y la impresora, las cuales se pueden trabajar para regular la velocidad de secado; por ejemplo, añadir una fuente de calor externo o determinar las condiciones climáticas preferibles al utilizar un determinado material.

Las tres variables descritas se relacionan entre ellas y afectan directamente en el desempeño de cada material. La cantidad de capas que se pueden apilar del material fresco depende directamente de la rapidez de secado que tenga la formulación. Asimismo, la fluidez con la que es extruido el material depende de la formulación y de las variables de impresión. A su vez, la morfología resultante depende directamente de la cantidad de capas apilables y de la fluidez de la pasta y, por lo tanto, depende de las variables de composición, impresión y secado. Cada una de estas perspectivas representan en sí mismas una oportunidad de investigación.

En base a lo expuesto en los párrafos anteriores, el objetivo de esta investigación es desarrollar formulaciones de pastas biobasados adecuadas para la impresión 3D con el fin de identificar el tamaño de partícula, el tipo de aglomerante, la proporción de agua, el diámetro de la boquilla del extrusor, entre otras, para quienes deseen adentrarse en el uso y/o formulación de pastas biobasadas para impresión 3D.

La importancia de este estudio radica en la generación de una pauta de uso con diversos materiales y en generar conocimientos, técnicas y guías abiertas a la comunidad, de forma de permitir el libre acceso a la manufactura y uso de nuevos materiales más amigables medioambientalmente.

Materiales y métodos

El procedimiento experimental se llevó a cabo de acuerdo con el esquema de la *Figura 1* y se explican a continuación:



Figura 1. Procedimiento experimental (Fuente: Elaboración propia).

Materiales para la pasta de extrusión

Los materiales utilizados para desarrollar las pastas de extrusión se seleccionaron a partir de investigaciones previas, enmarcadas en el proyecto FONDART folio 531807 “Investigación y desarrollo de un sistema *open source* de prototipado 3D para materiales biobasados” (Wechsler *et al.*, 2020), considerando los siguientes criterios: formulaciones que lograron una mayor cantidad de capas apilables, que fuesen simples en cuanto a cantidad

de componentes y que los tipos de cargas fuesen distintos entre sí. Cabe mencionar que las mezclas estudiadas en este proyecto se basan en formulaciones obtenidas de Materiom (Sauerwein, *et al.*, s.f.). Estas formulaciones han sido modificadas en función de optimizar procesos y recursos.

Se seleccionaron adicionalmente las cargas de carozo de palta y borra de café en base a experimentaciones previas en las que se han utilizado como cargas de otras formulaciones exitosas para impresión 3D (Fernández y Moya, 2020; Morales y Moya, 2022). Se replicó la formulación exitosa comprobada por Wechsler *et al.*, (2020), y se modifican los porcentajes, disminuyendo la cantidad de alginato a 1,2 %, la cantidad de conchas de mejillón a 55% y la cantidad de agua se incrementa a 43%. Se decide variar levemente el porcentaje de carga para probar esta variable en la muestra, de modo de disminuir las variables al mínimo y comprobar la incidencia del tipo y cantidad de carga y porcentaje de agua en la homogeneidad de la mezcla, fluidez, tiempo de secado al tacto, apilabilidad y estabilidad dimensional. Los materiales utilizados se muestran en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Selección de materiales para pastas de extrusión (Fuente: Elaboración propia).

Código	Material Carga	Granulometría	Aglomerante	Componente
ACM	Concha de mejillón	150 μm (100 Mesh)	Alginato de Sodio	Agua
ACP	Carozo de palta			
ABC	Borra de café			

El código asignado a cada carga se desglosa a continuación:

ACM = Alginato - Concha Mejillón

ACP = Alginato - Carozo de Palta

ABC = Alginato - Borra de Café

Tanto la carga en polvo del material biobasado como el alginato de sodio se obtuvieron en el Laboratorio de Materiales Biobasados (Biolab FAU) de la Universidad de Chile. Las cargas que comprenden conchas de mejillón, carozo de palta y borra de café fueron secadas en una estufa de secado marca Binder, modelo ED 115, durante 24 horas a 60° C hasta lograr disminuir su contenido de humedad a menos de un 4%. Las cargas fueron molidas y tamizadas para alcanzar una granulometría homogénea de 150 μm (100 mesh). Se molió en un molino de martillo, Marca Güter Tools, modelo WF-1500A2, con un tamiz de salida

de 420 μm (40 mesh). Por su parte, se utilizó entre el 1 y el 2 % de alginato de sodio como aglomerante. Esta fue la variable más estable dentro de este estudio. La diferencia de cantidad de carga y agua entre una y otra, obedece a la porosidad de cada una de las cargas, mientras más absorbente la carga, mayor la cantidad de agua. Con estas variables establecidas fue posible generar las formulaciones presentadas en la tabla 2, las cuales fueron obtenidas luego de la adaptación de las proporciones para lograr tres pastas biobasadas aglomeradas con alginato, aptas para impresión 3D.

Para la manufactura de las mezclas se masan el alginato (1,2 - 1,8%) y el agua a temperatura ambiente. Posteriormente se agrega el alginato al agua y se revuelve hasta formar un gel. Posteriormente se masa la cantidad deseada de la carga y se agrega al gel previamente preparado. Se revuelve hasta que los ingredientes se mezclan en una pasta suave y homogénea. La *Tabla 2* presenta las proporciones de las mezclas aquí estudiadas.

Tabla 2. Formulaciones de las muestras estudiadas (Fuente: Elaboración propia).

Código muestra	Muestras			
	Carga 100 Mesh (%)	Aglomerante alginato (%)	Agua (%)	Total (%)
ACM	55	1,2	43,8	100
ACP	45,5	1,5	53	100
ABC	17,8	1,8	80,4	100

Extrusión

El proceso de extrusión de cada una de las capas de las pastas biobasadas se realizó manualmente y se utilizó una jeringa con una boquilla de 2mm.

Caracterización

Para la caracterización de las pastas biobasadas se evaluaron las muestras extruidas manualmente sobre un papel milimétrico, a una velocidad constante que permitiera una salida permanente del material. Se midió el tiempo de secado al tacto, algunas propiedades

físicas y una variable del proceso de extrusión. A continuación, se describen las pruebas aplicadas:

Tiempo de secado al tacto

- Secado al tacto: Evaluación cualitativa. Se extruyó una muestra de 50 mm de largo. Cada 1 min se palpa la muestra para identificar la posible adherencia del material al objeto con el que se palpa. El ensayo culminó cuando no quedan residuos de material al tocar la muestra.

Propiedades físicas

Se llevó a cabo un análisis comparativo de las propiedades físicas de las muestras recién extruidas y después de 24 hrs. de secado a temperatura ambiente (20 ± 3 °C).

- Densidad (gr/cm³): Evaluación cuantitativa. Se extruyó una muestra rellenando un cuadrado de 50 x 50 mm. Se registró la masa y volumen inicial y final de la muestra. Los cálculos de la densidad se obtuvieron a partir de la ecuación 1:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{Ecuación 1}$$

- Cambio dimensional (cm³): Evaluación cuantitativa. Se extruyó una muestra de forma cuadrada plana de 50 x 50 mm. Se registró el volumen inicial y final de la muestra luego de 24 horas de secado a temperatura ambiente (20 ± 3 °C). Los cálculos de los cambios dimensionales se obtuvieron a partir de la ecuación 2:

$$\text{Cambio dimensional} = \text{Volumen final} - \text{Volumen inicial} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Pérdida de humedad luego de 24h de secado a temperatura ambiente (%): Evaluación cuantitativa. Se extruyó una muestra de 50 x 50 mm. Se registró la masa inicial y final de la muestra. Para determinar la masa inicial de la muestra, esta fue pesada al momento de ser extruida. Para la masa final se midió la misma muestra luego de 24 horas de secado a temperatura ambiente (20 ± 3 °C). Con estos datos se calculó el contenido de humedad el cual se obtuvo a partir de la ecuación 3:

$$\text{Contenido de humedad} = \text{masa inicial} - \text{masa final} \quad \text{Ecuación 3}$$

Al conocer el valor de humedad final de la muestra fue posible calcular el porcentaje de pérdida de humedad mediante la aplicación de la ecuación 4:

$$\text{Pérdida de humedad (\%)} = \frac{100 \times \text{Contenido de humedad}}{\text{Masa inicial}} \quad \text{Ecuación 4}$$

VARIABLES DE PROCESO

- Capas extrusión manual (N°): Evaluación cuantitativa. Se extruyó una muestra de 50x50 mm para definir la cantidad de capas en las que es posible apilar material. El ensayo se llevó a cabo bajo el criterio de apilar la mayor cantidad de capas hasta que las paredes formadas se desmoronen.

Resultados y discusión

Los resultados del proceso de extrusión manual a partir de las formulaciones presentadas en la *Tabla 2* se muestran en la *Figura 2*.

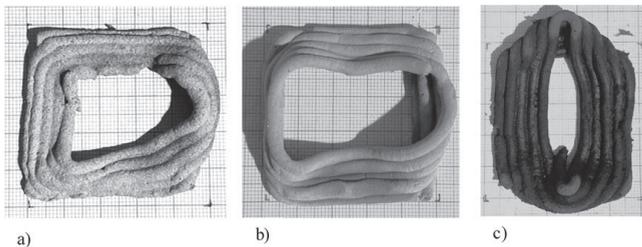


Figura 2.
Extrusiones de cargas. a) ACM; b) ACP; c) ABC (Fuente: Elaboración propia).

En esta figura se aprecia que la muestra que presenta una mejor homogeneidad mantiene la forma más que las demás y permite un mejor apilamiento de capas de ACP, seguida de ACM y de ABC. ABC se desgrana y se seca de manera más heterogénea en relación con las mezclas anteriores.

Prueba de secado al tacto

La *Tabla 3* muestra los resultados de la prueba de secado al tacto para cada una de las cargas.

Tabla 3. Tiempo de secado al tacto (Fuente: Elaboración propia).

Código	Tiempo de secado al tacto (min)
ACM	5
ACP	6
ABC	9

Se aprecia que la mezcla que presenta un menor tiempo de secado al tacto es ACM, seguida de ACP, y con una diferencia mayor con ABC.

Propiedades físicas

La *Tabla 4* muestra los resultados de las propiedades físicas mediante las pruebas de densidad, cambio dimensional y contenido de humedad para cada una de las cargas.

Tabla 4. Propiedades físicas; densidad, cambio dimensional y contenido de humedad (Fuente: Elaboración propia).

Código	Densidad (gr/cm ³)			Cambio dimensional (cm ²)			Pérdida de humedad luego de 24h de secado a temperatura ambiente (%)		
	Inicial	Final	%	Inicial	Final	%	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	%
ACM	2	1,4	30	7,5	6,5	13	14,7	9,3	37
ACP	0,7	0,6	14	7,5	5,8	23	6,24	3,3	33
ABC	0,8	0,6	25	7,5	5,7	24	5,5	3,7	46

Se evidencia que la muestra ACM es la que presenta una mayor pérdida de densidad, seguida de ABC y ACP. Con respecto al cambio dimensional se revela que la muestra que disminuyó mayormente su superficie fue ABC, seguida de ACP y de ACM, siendo esta última la más estable dimensionalmente. En cuanto a la pérdida de humedad una vez secas las muestras a temperatura ambiente por 24 horas, ABC es la mezcla que pierde una mayor cantidad de agua, seguida de ACM y por última ACP.

VARIABLES DEL PROCESO

La *Tabla 5* muestra los resultados de la cantidad máxima de capas extruidas manualmente con una boquilla de 2 mm para cada carga.

Tabla 5. Cantidad máxima de capas (Fuente: Elaboración propia).

Código	Cantidad máxima de capas obtenidas
ACM	5
ACP	7
ABC	4

En esta experiencia la mezcla que logró apilar más capas de manera adecuada, teniendo mayor estabilidad formal fue ACP y la que tuvo un peor desempeño fue ABC, mezcla que se secó de manera heterogénea y sufrió deformaciones importantes.

DISCUSIÓN

REFERIDOS A LA VARIABLE DE COMPOSICIÓN

A partir de los resultados expuestos en la *Figura 2*, se observa que la carga ACP presenta mayor estabilidad respecto al soporte de las capas de material extruido, lo que se sustenta al comprobar que resiste la mayor cantidad de capas respecto a las cargas ACM y ABC siendo esta última la más inestable y la que soporta la menor cantidad de capas. Esto es debido probablemente al alto porcentaje de agua y bajo porcentaje de carga presente en la pasta.

En las muestras con un menor porcentaje de carga, pero mayor cantidad de agua en la composición de la mezcla, y por lo tanto, mayor contenido de humedad, se evidenció baja adherencia y estabilidad entre capas, dado que el aglomerante no lograba estructurar la composición, disminuyendo así la posibilidad de resistir y adherir más cantidad de ca-

pas. A su vez, la composición ACP es la muestra con menor porcentaje de carga y menor porcentaje de agua, así mismo menor porcentaje de contenido de humedad, logró mayor estabilidad y altura de capas. Sauerwein (2020), en su investigación logró extruir mediante impresión 3D una muestra con una altura de 17 capas. La pasta estaba compuesta de 61% de carga de conchas de mejillón, 3% de alginato de sodio y un 36% de agua, demostrando así la importancia del efecto del porcentaje de carga y del aglomerante para alcanzar mayor adherencia.

Dentro del factor carga dentro de la composición es necesario también conocer las propiedades de esta, su relación con el agua, ph, densidad y porosidad factores necesarios para obtener una buena imprimibilidad (Shahbazi, 2021). El éxito de la formulación para ser impresas podría estar determinado principalmente por las características estructurales de la carga, las cuales considera la granulometría de la carga utilizada, la homogeneidad de la misma, la porosidad, el nivel de relleno, ya que como se mencionó con anterioridad la baja cantidad de carga podría influir en la disminución de la estabilidad al extruir formas complejas. La carga es el componente crucial para generar estabilidad y estructura de las capas en el proceso de extrusión, al generar mayor concentración de éstas viéndose reflejada en su densidad, por lo cual es posible asumir que permitiría generar formas más complejas.

A su vez la granulometría de la carga afecta directamente a la capacidad de impresión, a las propiedades mecánicas de las piezas impresas, la resolución de impresión, la rugosidad de la superficie de las piezas impresas, la homogeneidad del material y la obstrucción y bloqueo de las boquillas (Rahman, 2023). Es así como Romani, *et al.* (2023), indican que en promedio la granulometría para obtener un proceso de extrusión exitoso varía entre 50µm y 500µm, y recomiendan mantenerlo bajo las 500 µm para residuos biobasados. En esta investigación se utilizó una granulometría de 150µm lo que da un indicio que el tamaño está dentro de los tamaños recomendados y que lo que estaría afectando directamente a la estabilidad en la pasta es la cantidad de masa utilizada de carga.

Referido a la cantidad de agua en la composición, es necesario conocer el porcentaje de agua que se evapora al momento del proceso de secado, la cual tiene relación con el proceso de contracción o reducción de la muestra morfológica resultante. Esto se debe considerar en la fase de aplicación de las pastas y la morfología a imprimir.

Referidos a la variable de proceso de impresión y secado

Generalmente se requiere un tratamiento adicional para terminar de definir la forma impresa evitando posibles cambios en las dimensiones de la forma. Los métodos de tratamiento de post-impresión consideran el horneado, secado o deshidratación. En relación con el proceso de secado de impresión de materiales biobasados se considera importante no generar golpes de calor o cambios abruptos en la temperatura, humedad o intervenciones externas, dado que en un comienzo la formulación extruida aún es maleable, blanda y viscosa. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo y va perdiendo la humedad, se vuelve más rígida, menos maleable y más propensa a generar fracturas superficiales visibles, muy similar a los daños que puede generar exponer la muestra resultante a calor directo, puesto que acelera el proceso de deshidratación y secado de la muestra.

Conclusión

Entre los diversos materiales y técnicas de impresión 3D existentes a nivel mundial, en este artículo se analizaron, definieron y comprobaron factores a considerar para lograr extruir pastas biobasadas con una base de alginato. Estos factores son determinantes para la precisión y estructura de la impresión resultante.

Se concluye que la cantidad y calidad de capas que permite el proceso de impresión 3D de pastas biobasadas está directamente relacionada con la composición del material desarrollado, la homogeneidad y cantidad de carga. Todas estas variables influyen en la estabilidad, textura y altura de las capas, así como también en la densidad y porosidad de esta. La cantidad de agua influye en la contracción y tiempo de secado post impresión de la muestra. La cantidad de aglomerante debe ser capaz de juntar la composición sin llegar a saturarse puesto que puede generar fracturas internas y superficiales en la fase de secado. Si bien en este estudio la muestra que presentó mejor desempeño fue ACP, que contenía carozo de palta, alginato y agua en proporciones intermedias en relación con las otras dos cargas estudiadas, se puede intuir que el efecto fue positivamente afectado por la alta cantidad de almidón presente en el cuesco de palta. El almidón otorga mayor estabilidad y absorción de agua a las pastas. En cambio, las conchas de mejillón no son de naturaleza absorbente. Por otro lado, la borra de café, al tener una serie de extractivos y aceites propios de esta, son complejos de aglomerar con adhesivos hidrocoloides. Por esta razón se aprecia la necesidad de incluir en estudios posteriores los componentes químicos de las cargas y su relación con la homogeneidad y la fluidez de estas como otra variable más.

La precisión de la impresión está condicionada por factores relacionados a la impresora y proceso de extrusión, como la boquilla, la altura de la misma y la velocidad de extrusión, ya que estos han de influir en la precisión y calidad de las formas impresas resultantes. Como en este caso la impresión fue manual, solo se puede concluir que el tamaño de boquilla utilizado de 2 mm fue adecuado para este estudio específico.

Como proyecciones a futuro, para el proceso de secado se requiere considerar un sistema de deshidratación suave entre capa y capa, de manera que las capas inferiores logren cierta rigidez antes de pasar a la siguiente, logrando así generar un estructura y estabilidad en la impresión resultante.

Dentro de las demás variables a estudiar y considerar a futuro está el factor estético y sensorial de las pastas biobasadas; por ejemplo, la inclusión de pigmentos, la generación de formas complejas orgánicas y las posibles texturas resultantes del proceso de impresión.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Materiales Biobasados de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (Biolab FAU) de la Universidad de Chile por facilitar sus dependencias y materias primas para el desarrollo de esta investigación. Así también al proyecto Fondart, por el proyecto de investigación folio 531807 "Investigación y desarrollo de un sistema open source de prototipado 3D para materiales biobasados".

Referencias bibliográficas

- Aguayo González, F., Peralta Álvarez, M. E., Lama Ruiz, J. R., & Soltero Sánchez, V. M. (2011). *Ecodiseño. Ingeniería Sostenible de la Cuna a la Cuna (C2C)*. España: RC Libros.
- Araújo, R., & Franco, M. (2021). *The use of collaboration networks in search of eco-innovation: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production*, 314, 127975. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127975>
- Asut, S. (s. f.). Olive pomace - 3D print material. *Materiom*. Recuperado 7 de julio de 2023, de <https://materiom.org/recipe/593>
- Barros, D. (2021). Desarrollo de un método DIY (Hazlo tú mismo) que sistematice la fabricación de materiales que se cocinan a partir de hidrocoloides y residuos orgánicos [Memoria de título]. Universidad de Chile.
- Cai, W., *et al.* (2019). *Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. Science of The Total Environment*, 665, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.069>
- Campos, E. (2022). Aplicación de bioplásticos cocinados a base de Agar-Agar y almidón de papa en tecnologías de manufactura aditiva [Tesis ingeniero civil mecánico]. Recurso electrónico - Universidad de Chile.
- Céspedes, I., & Gibbs, B. (2020). Material compuesto en base a residuo cáscara de huevo para impresión 3D [Investigación]. Universidad de Chile.
- Contreras, L. (2019, 23 julio). ¿Qué tan ecológico es realmente el filamento PLA? 3Dnatives. Recuperado 7 de julio de 2023, de <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#>
- Cores Irago, I. (2018). *Biobased Materials. Diseño. Valencia, Escolad' Art I Superior de Disseny de Valencia*.
- Diez, T. (2018). *Fab City. The mass distribution of (almost) everything*. Recuperado de <https://issuu.com/iaac/docs/fabcitymassdistribution>
- Donoso, S., & Wechsler, A. (2020). Los materiales biobasados y el paradigma desarrollista latinoamericano: perspectivas desde el Diseño industrial. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, (114). <https://doi.org/10.18682/cdc.vi114.4116>
- Fernández, C., & Moya, P. (2020). El carozo de palta como componente principal de un material biobasado para impresión 3D [Investigación]. Universidad de Chile.
- Fu, Y., *et al.* (2020). *Conceptual design scheme automatic generation and decision-making considering green demand. Procedia Manufacturing*, 43, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.194>
- Garmulewicz, A., Tourlomis, F., Smith, C., & Bolumburu, P. (2023). *3D printing with biopolymers. En M. Mehrpouya & H. Vahabi (Eds.), Additive Manufacturing of Biopolymers* (pp. 371-399). Elsevier.
- Garner, A. and G. A. Keoleian (1995). *Industrial ecology: an introduction [Investigación]. National Pollution Prevention Center for Higher Education, University of Michigan*.
- Gascón, L. (2020). Desarrollo de un material basado en residuos de papa para su utilización en impresión 3D [Investigación]. Universidad de Chile.
- Georgiou, M. (s. f.). *Oyster Shell | Alginate Composite 3D print. Materiom*. Recuperado 7 de julio de 2023, de <https://materiom.org/recipe/609>

- Gutiérrez, D., & Barraza, S. (2020). Material compuesto a partir de papel reciclado para la impresión 3D [Investigación]. Universidad de Chile.
- Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2014). *Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1), 014001. doi:10.1115/1.4028725
- Inostroza, M. (2021). Desarrollo de un método DIY (Hazlo tú mismo) que sistematice la fabricación de materiales que se cocinan a partir de hidrocoloides y residuos orgánicos [Memoria de título]. Universidad de Chile.
- Marchante, A. (2022, 8 agosto). PLA vs ABS, ¿qué material de impresión 3D elegir? 3Dnatives. Recuperado 7 de julio de 2023, de <https://www.3dnatives.com/es/pla-abs-material-impresion-3d-08082022/>
- Meroni, A. (2007). *Creative communities. People inventing sustainable ways of living*. Milano: Polidesign.
- Miller, T. (1994). Ecología y medio ambiente. México DF: Ed. Iberoamérica.
- MMA Chile. (2021). Hoja de ruta para un Chile Circular al 2040. Recuperado de: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/chi211134.pdf>
- Morales, E., & Moya, J. (2022). Impresión 3D de biomateriales: Extrusión y manufacturación aditiva con borra de café [Investigación]. Universidad de Chile.
- Otero, A. (2022). Cocinas, residuos e impresión 3D. Biomateriales basados en cáscaras de huevo y conchas de mejillón. *Inmaterial. Diseño, Arte y Sociedad*, 7 (13), 55-74. DOI 10.46516/inmaterial.v7.145
- Parlamento Europeo. (2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios. Noticias. <https://doi.org/20151201STO05603>
- Rahman, A. M., Rahman, T. T., Pei, Z., Ufodike, C. O., Lee, J., & Elwany, A. (2023). *Additive manufacturing using agriculturally derived biowastes: A systematic literature review*. *Bioengineering (Basel, Switzerland)*, 10(7), 845. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10070845>
- Ramos, M., Pérez, J., Dumbay, C., Robinson, J., Florenzano, A., & Salvo, R. (2021). Diagnóstico sectorial, Acuerdo de producción limpia: “Transición hacia una Economía Circular”. Recuperado de: <https://accionempresas.cl/content/uploads/informe-de-diagnostico-sectorial-apl-transicion-hacia-la-economia-circular-accion-empresas>
- Riquelme, V. (2022) Calcáreo: Un biomaterial emergente de Chile. *Weblog ArchDaily* en español. Accedido el 19 Mar 2024. <https://www.archdaily.cl/cl/994296/calcareo-un-biomaterial-emergente-de-chile>
- Rojas, M. (2023). Gobierno presenta proyecto de ley de reciclaje de residuos vegetales para disminuir la “basura” y combatir el cambio climático. Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado de <https://mma.gob.cl/gobierno-presenta-proyecto-de-ley-de-reciclaje-de-residuos-vegetales-para-disminuir-la-basura-y-combatir-el-cambio-climatico/>
- Romani, A., Suriano, R., & Levi, M. (2023). *Biomass waste materials through extrusion-based additive manufacturing: A systematic literature review*. *Journal of Cleaner Production*, 386(135779), 135779. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135779>
- Rubik, & MMA, Chile (2019). Economía Circular En Chile Informe Final. https://www.paiscircular.cl/wp-content/uploads/2019/08/Econom%C3%a-Circular-_Informe-1.pdf

- Sauerwein, M., Zlopasa, J., Doubrovski, Z., Bakker, C., & Balkenende, R. (2020). *Reprintable paste-based materials for additive manufacturing in a circular economy*. *Sustainability*, 12(19), 8032. <https://doi.org/10.3390/su12198032>
- Sauerwein, M., Doubrovski, Z., & Vette, J. (s. f.). *Mussel shell | alginate MS01*. *Materiom*. Recuperado 7 de julio de 2023, de <https://materiom.org/recipe/25>
- Schmidt, C. (2021). Estrategia nacional de residuos orgánicos: Chile 2040. Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado de <https://economiecircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Nacional-de-Residuos-Organicos-Chile-2040.pdf>
- Schwab, K. (2016). *La cuarta revolución industrial*. Barcelona: Debate.
- Shahbazi, M., & Jäger, H. (2021). *Current status in the utilization of biobased polymers for 3D printing process: A systematic review of the materials, processes, and challenges*. *ACS Applied Bio Materials*, 4(1), 325-369. <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c01379>
- UNEP (1996). *Life cycle assessment: what it is and how to do it*. Paris: United Nations Environment Programme, Industry and Environment.
- UNEP (2007). *Buildings and climate change-Summary for decision-makers*. Paris, United Nations Environment Programme Sustainable Building and Climate Initiative: 62.
- Valenzuela Zubiaur, M. (2022). Contribución de la Red Chilena de Fab Labs al ecosistema de innovación local para alcanzar el desarrollo sostenible [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia].
- Wechsler, A., Briones, Y., Domínguez, P. (2024). Nuevos materiales y la simbiosis creativa en el diseño en Chile. *Intersections – Interdisciplinary Research on Architecture, Design, City and Territory. Scales, Agencies and Territories in Latin America” Springer Geographies, Springer*, Capítulo 23.
- Wechsler, A., Domínguez, P., Osses R., Zamora F., Urra, C. (2020). folio 531807 “Investigación y desarrollo de un sistema *open source* de prototipado 3D para materiales biobasados”, FONDART Nacional, Diseño, línea de investigación.

Abstract: This research addresses the challenge of developing bio-based paste formulations suitable for 3D printing. The difficulty of this process is due to the lack of established parameters to carry it out. These parameters depend on the composition and workability of each paste and are reflected in factors such as the type of filler used, the size of the particles and the type of binder. In addition, variables related to the extrusion and drying phases of the material must also be considered.

Mussel shells, coffee grounds and avocado pits with a particle size of 150µm each were considered as biobased fillers. Sodium alginate was used as a common binder for all of the samples. The extrusion of each of the samples was carried out using a syringe with a 2mm diameter nozzle. The time in which the sample was able to be touched after extruding, the density of the samples, the dimensional stability, the moisture content and the number of layers that could be stacked were also identified.

It is concluded that the number of layers that the 3D process of bio-based pastes allows is related to the amount of material, the amount of binder and the moisture content in the

paste. The pasta that presented the higher number of stackable layers was the avocado pit, while the coffee grounds presented the least amount of stackable layers. This is attributed to the fact that this last mixture had coffee grounds in a lower percentage compared to the other mixtures, a greater amount of binder and a higher percentage of moisture that hindered its adhesion and stability in the union of each layer.

Keywords: Bio-based pasta - 3D printing - Alginate - Coffee grounds - Mussel shells - Avocado pits - 3D printing parameters

Resumo: Neste artigo, foram estudadas as faixas de trabalho para o desenvolvimento de formulações de pasta de base biológica adequadas para impressão 3D. Esses parâmetros dependem dos processos de composição, extrusão e secagem e são influenciados pelo tipo e tamanho de partícula do enchimento usado e pelo tipo de aglutinante.

Para esse estudo, foram considerados como cargas as cascas de mexilhão, a borra de café e os caroços de abacate com tamanho de partícula de 150 µm cada. O alginato de sódio foi usado como aglutinante. A extrusão de cada amostra foi realizada manualmente. Foram medidos o tempo de secagem até o toque, a densidade, o encolhimento dimensional, a perda de umidade de secagem e o número máximo de camadas que poderiam ser empilhadas. O número de camadas permitido pelo processo de impressão 3D de pastas de base biológica foi relacionado à quantidade de enchimento, à quantidade de aglutinante e ao teor de umidade na pasta. A mistura de caroço de abacate teve o melhor desempenho, enquanto a mistura de borra de café teve a menor quantidade de camadas empilháveis. Isso é atribuído ao fato de que a primeira mistura continha mais carga do que a segunda, menos aglutinante e menos água. Também vale a pena mencionar que os componentes químicos de cada carga variam bastante entre si, o que afetou seu desempenho.

Palavras-chave: Pastas de base biológica - Alginato - Borra de café - Cascas de mexilhão - Cascas de abacate - Parâmetros de impressão 3D - Impressão 3D
