

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE QUITINA DE FUENTES CONVENCIONALES (MARINAS) Y NO CONVENCIONALES



Estudiante: Vallejo de Benito, Claudia

Director: Lizundia Fernández, Erlantz

Curso: 2022/2023

Fecha: Bilbao, 15 de mayo de 2023

Resumen

Las destacables propiedades mecánicas de las nanopartículas de quitina están fomentando su aplicación progresiva en diversos ámbitos científicos y tecnológicos. Recientemente, se han encontrado alternativas a la extracción convencional de este material, que hasta ahora solo era posible mediante el empleo de tratamientos altamente perjudiciales para el medioambiente, como es la hidrólisis ácida de los caparzones de crustáceos y gambas. Actualmente, se conoce que la extracción de las nanopartículas de quitina de los hongos es una gran alternativa, que permite obtener las mismas ventajas que proporcionaba el método tradicional, pero evitando en este caso la desmineralización con ácidos como el clorhídrico (HCl). No obstante, éste se trata del primer trabajo existente que cuantifica los impactos ambientales de las diferentes variantes para la extracción de nanopartículas de quitina. Tiene como fin comparar los procesos convencionales de extracción hidrolítica de nanocristales de quitina a partir de caparzones de gamba, polvo de quitina y caparzones de cangrejo, y la hidrólisis por ácido sulfúrico de celulosa microcristalina a nanocristales de celulosa. En contraposición, proponemos un nuevo método de extracción a partir de los hongos con impactos ambientales reducidos. Para ello empleamos la metodología análisis de ciclo de vida (ACV), que nos permite cuantificar los impactos ambientales derivados de diversos procesos industriales. Esta metodología de creciente relevancia en el mundo industrial debido a las regulaciones establecidas por la Comisión Europea, permite el eco-diseño de procesos industriales para poder reducir, poco a poco, los impactos negativos resultantes de procesos productivos, y colaborar así con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en concreto con los números 11, 12 y 13, que corresponden a ciudades y comunidades sostenibles, producción y consumo responsables y, acción por el clima, respectivamente. De esta manera, aquí cuantificamos a de manera pionera los beneficios ambientales del nuevo proceso de extracción, lo cual ayudará a su implementación futura. Asimismo, se pone de manifiesto que siguiendo un enfoque de Economía Circular se pueden valorizar diversos residuos de biomasa para reintroducirlos en el ciclo económico y, al mismo tiempo, evitar el vertido de biorresiduos tras el aislamiento de nanopartículas de quitina.

Laburpena

Kitina nanopartikulen propietate mekaniko nabarmenek aplikazio progresiboa sustatzen ari dira hainbat arlo zientifiko eta teknologikotan. Duela gutxi, material hau lortzeko ohiko erauzketarako alternatibak aurkitu dira, orain arte ingurumenarentzako oso kaltegarriak diren tratamenduen bidez soilik posible zenak, hala nola krustazeoen eta otarrainxka-oskolaren hidrolisi azidoa. Gaur egun, jakina da ondoetatik kitina nanopartikulen erauzketa alternatiba bikaina

delat, eta horrek metodo tradizionalaren abantaila berdina lortzeko aukera ematen du azido klorhidrikoaren erabilera saihestuz. Hala ere, orain arte ez dago kitina nanopartikulen erauzketarako era ezberdinen ingurumen-inpaktuak kuantifikatzen dituen lanik. Beraz, prozesu hauen ingurumen abantailak ez daude guztiz argi. Ildo honetan, lan honek nanokitina onddoetatik lortzea eragiten dituen ingurugiro inpaktuak kuantifikatzen ditu, eta gainera, lortutako emaitzak otarrainxka-oskoletatik, kitina-hautsetik eta karramarro-oskoletatik kitina nanokristalen erauzketa hidrolitikoko prozesu konbentzionalekin alderatzen dira. Horretarako, bizi-zikloaren analisisa (LCA, ingelesez) metodologia erabiltzen dugu, hainbat industria-prozesuetatik eratorritako ingurumen-inpaktuak kuantifikatzeko aukera ematen duena. Europako Batzordeak ezarritako araudiaren ondorioz industria munduan gero eta garrantzi handiagoa duen metodologia honek, prozesu industrialen ekodiseinua ahalbidetzen du, pixkanaka, ekoizpen prozesuen ondoriozko inpaktu negatiboak murrizteko, eta horrela, Garapen Jasangarriko Helburuekin (GJH) lankidetzan aritzea, zehazki, 11, 12 eta 13 zenbakiekin, hiri eta komunitate jasangarriei, ekoizpen eta kontsumo arduratsuei eta, azkenik, klima-ekintzari dagozkienak. Modu honetan, hemen modu aitzindari batean kuantifikatzen ditugu erauzketa prozesu berriaren ingurumen-onurak, zeinak etorkizunean ezartzen lagunduko dion. Era berean, frogatuta dago Ekonomia Zirkularri jarraituz, hainbat biomasa-hondakin balioztatu daitezkeela ziklo ekonomikoan berriro sartzeko eta, aldi berean, kitina nanopartikulak isolatu ondoren biohondakinak isurtzea saihesteko.

Abstract

The remarkable mechanical properties of chitin nanoparticles are promoting their progressive application in various scientific and technological fields. Recently, alternatives to the conventional extraction of this material have been found, which until now was only possible through the use of highly environmentally damaging treatments, such as acid hydrolysis of crustacean and shrimp shells. Currently, it is known that the extraction of chitin nanoparticles from fungi is a great alternative, which allows obtaining the same advantages as the traditional method, but in this case avoiding demineralization with acids such as hydrochloric acid (HCl). However, this is the first existing work that quantifies the environmental impacts of the different variants for the extraction of chitin nanoparticles. Its purpose is to compare the conventional processes of hydrolytic extraction of chitin nanocrystals from shrimp shells, chitin powder and crab shells, and sulfuric acid hydrolysis of microcrystalline cellulose to cellulose nanocrystals. In contrast, we propose a new method of extraction from the fungi with reduced environmental impacts. To do this, we use the life cycle assessment (LCA) methodology, which allows us to quantify the environmental impacts derived from various industrial processes. This methodology of increasing relevance in the industrial world due to the regulations established by the European Commission,

allows the eco-design of industrial processes in order to reduce, little by little, the negative impacts resulting from production processes, and thus collaborate with the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically with numbers 11, 12 and 13, which correspond to sustainable cities and communities, responsible production and consumption and climate action, respectively. In this way, here we quantify in a pioneering way the environmental benefits of the new extraction process, which will help its future implementation. Likewise, it is shown that following a Circular Economy approach, various biomass residues can be valorised to reintroduce them into the economic cycle and, at the same time, avoid the dumping of biowaste after the isolation of chitin nanoparticles.

Índice de figuras

Figura 1. Esquema general del proyecto.....	8
Figura 2. Descripción ACV	10
Figura 3. Etapas ACV.....	13
Figura 4. Tipos de alcance	14
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de extracción de nanopartículas de quitina a partir de fuentes fúngicas.....	18
Figura 6. Desglose del proceso.....	19
Figura 7. Esquema que resume la extracción de nanocristales de quitina a partir de caparazones de camarones	21
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de extracción de nanocristales de quitina a partir de polvo de quitina procedente de gambas.....	24
Figura 9. Diagrama de flujo que resume la extracción de nanocristales de quitina del cangrejo.....	27
Figura 10. Diagrama de flujo que resume el proceso de extracción de nanocristales de celulosa	30
Figura 11. Distribución del GWP en función de agua, químicos y electricidad. 34	
Figura 12. Reducción de impactos tras el Análisis de Sensibilidad.....	36

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de las categorías de impacto	15
Tabla 2. Inventariado del primer proceso	19
Tabla 3. Consumo energético asociado al primer proceso	20
Tabla 4. Inventariado del segundo proceso.	23
Tabla 5. Consumo energético asociado al segundo proceso.....	23
Tabla 6. Inventariado del tercer proceso.	25
Tabla 7. Consumo energético asociado al tercer proceso	26
Tabla 8. Inventariado del cuarto proceso.	28
Tabla 9. Consumo energético cuarto proceso.....	29
Tabla 10. Inventariado quinto proceso.	31
Tabla 11. Consumo energético del quinto proceso	31
Tabla 12. Distribución de impactos	33
Tabla 13. Impactos tras el análisis de sensibilidad.....	36
Tabla 14. Diagrama de Gantt del proyecto.....	39
Tabla 15. Coste del proyecto.....	40

Índice

Resumen.....	2
Laburpena	2
Abstract	3
Índice de figuras	5
Índice de tablas	5
1. Introducción.....	7
2. Contexto	10
2.1. Definición del Análisis de Ciclo de Vida	10
2.2. Historia del Análisis de Ciclo de Vida	11
2.3. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida	13
2.4. Determinación de los límites en el Análisis de Ciclo de Vida	14
2.5. Impactos	14
3. Objetivos	17
3.1. Objetivo primario	17
3.2. Objetivos secundarios	17
4. Metodología.....	18
4.1. Proceso 1	18
4.2. Proceso 2	21
4.3. Proceso 3	24
4.4. Proceso 4	27
4.5. Proceso 5	30
5. Resultados y discusión.....	32
6. Análisis de sensibilidad	35
7. Disposición del proyecto.....	37
7.1. Descripción de las tareas a realizar	37
7.3. Diagrama de Gantt.....	39
8. Coste del proyecto	40
9. Conclusiones.....	41
10. Bibliografía	44
11. Anexos	48
11.1 Proceso 1	48
11.2. Proceso 2	50
11.3. Proceso 3	53
11.4. Proceso 4	56
11.5. Proceso 5	58

1. Introducción

La quitina es, tras la celulosa, el segundo polímero natural más abundante que existe.¹ Fue aislada por primera vez en 1811 por Braconnot de algunos hongos, tras lo cual lo denominó “fungina”. Posteriormente, en 1823, fue Auguste Odier quien aisló de un escarabajo un residuo insoluble a soluciones de KOH, tras lo que le dio el nombre de quitina, procedente del griego “chitón”, túnica o cobertura. Asimismo, Odier sugirió que la quitina sería el material base del exoesqueleto de los insectos y posiblemente de los arácnidos. Posteriormente, en 1929, Albert Hofmann, también conocido por sus grandes descubrimientos acerca de la dietilamida de ácido lisérgico (LSD), consiguió por primera vez describir correctamente su estructura química.²

Su uso como agente floculante para el tratamiento de agua, para curar heridas, como espesante y estabilizador tanto de alimentos como de medicamentos, lo hace un producto de alto interés.

Por esto, su extracción es un proceso importante, por lo que se interesa buscar la manera menos medioambientalmente agresiva de llevarlo a cabo. La quitina es un carbohidrato que se encuentra en diversos seres vivos como son las paredes celulares de los hongos, el exoesqueleto de los artrópodos, dentro de los cuales destacan las gambas y los crustáceos, las quetas de los anélidos y los perisarcos de los cnidarios.³

Las nanofibrillas de quitina son responsables de la extraordinaria resistencia mecánica de los exoesqueletos de algunos animales y de la iridiscencia de algunos insectos⁴. Las nanopartículas de quitina, en contraposición a la mayoría de los polímeros derivados del petróleo, son renovables y biodegradables. Por ello, permiten implementar una economía circular de materiales que consiste en el desarrollo de materiales medioambientalmente sostenibles capaces de ser renovados, biocompatibles, no tóxicos y biodegradables.⁵

Los métodos tradicionales de aislamiento de nanopartículas de quitina para la producción de nanocristales de quitina (ChNC, por sus siglas en inglés) de alta pureza se basan en procesos de hidrólisis ácida y oxidación química, y comúnmente se realizan a partir de endocutículas de cangrejo desechadas⁶ y caparazones de gamba.⁷ Estos métodos proporcionan valores altos de eficiencia de extracción de quitina, pero a costa de producir impactos medioambientales notables debido a, en primer lugar, su alto consumo de energía para calentar las reacciones químicas, y en segundo, las grandes cantidades de productos químicos que requieren para eliminar el alto contenido en minerales de las conchas.

Este problema ha inspirado a considerar alternativas novedosas para extraer dichas nanopartículas de quitina de los desechos de biomasa⁸, planteando las fuentes fúngicas como alternativa principal en este escenario. De esta manera, se ha planteado extraer la quitina de las paredes celulares de los hongos, ya que, a diferencia del resto de métodos, se trata de una vía de aislamiento que no

requiere de desmineralización, siendo, por tanto, un proceso simple que constituye una gran reducción de impacto ambiental.^{9,10}

A pesar de conocer los beneficios que esta vía alternativa proporciona, no existen trabajos previos que cuantifiquen los impactos medioambientales de la misma. Es por esto que, aunque se intuye una mejora notoria, este proyecto es pionero en dar resultados numéricos y responder a esta cuestión, así como en guiar la extracción medioambientalmente sostenible de nanopartículas de quitina. Para ello, se utiliza la metodología del ACV, mediante la cual es posible cuantificar los impactos de la extracción de nanopartículas de quitina a partir de fuentes fúngicas, así como de las fuentes convencionales, y finalmente llevar a cabo una comparativa de los 18 indicadores de impacto medioambiental para cada uno de los procesos, pudiendo consensuar el mejor procedimiento.

Cabe destacar que la metodología ACV se trata de una estandarización según las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044 que permite cuantificar los impactos y clasificarlos en varias categorías de indicadores, dentro de los cuales la atención se centrará en el Índice de Calentamiento Global (en inglés, GWP).

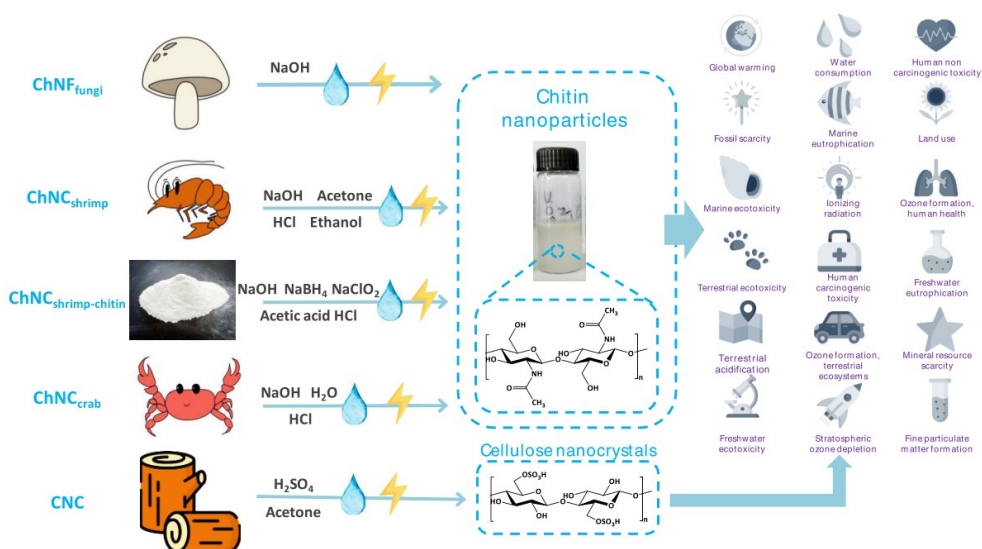


Figura 1. Esquema general del proyecto según Ref. ¹¹

Para poder comparar los resultados con otras nanopartículas de origen renovable, también se han cuantificado los impactos de los nanocristales de celulosa, CNC por sus siglas en inglés¹². Estos nanocristales son prometedores para su uso como refuerzo en nanocompuestos de alto rendimiento debido a su alta resistencia y rigidez, bajo peso y biodegradabilidad, ya que son extraídos de fuentes naturales y son renovables¹³, por lo que, además, los nanocristales de celulosa se consideran una alternativa a los polímeros basados en combustibles fósiles no degradables. Este proyecto pretende expandir el aislamiento de estas nanopartículas a partir de bases biológicas en los desafíos sostenibles globales, así como guiar el camino hacia una economía circular sostenible.

Se trata de un trabajo encuadrado en el marco de la ingeniería industrial, la cual se trata de una rama multidisciplinar que tiene como objetivo la optimización del

uso de los recursos humanos, técnicos e informativos, así como del manejo y gestión óptimos de los sistemas, con el fin de obtener productos y servicios de alta calidad. Por tanto, es responsabilidad del ingeniero industrial llevar a cabo su objetivo atendiendo a la salud del medio ambiente, y aplicar las aptitudes obtenidas a optimizar los procesos persiguiendo la máxima eficiencia, atendiendo a minimizar la extracción de materias primas, reducir el consumo energético y de sustancias químicas, y cuidando la gestión de los residuos.

2. Contexto

2.1. Definición del Análisis de Ciclo de Vida

El ACV es una metodología estandarizada internacionalmente (ISO 14040 e ISO 14044), mediante la cual se estudian los impactos medioambientales asociados al ciclo de vida de bienes y servicios, beneficios ambientales y áreas de mejora teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del producto.¹⁴ El alcance de este análisis puede variar, enfocándose en diferentes etapas contenidas entre el origen y el fin de la vida útil del mismo. Las aplicaciones más comunes del mismo son dos. En primer lugar, el análisis de la contribución que las distintas etapas del ciclo de vida tienen sobre la carga ambiental general, generalmente con el objetivo de plantear mejoras en productos o procesos. En segundo lugar, la comparación entre productos o servicios para uso interno.¹⁵ De esta manera, se consigue identificar los principales impactos ambientales, y plantear alternativas para reducirlos.

Las partes constituyentes de un ACV son el Inventario del Ciclo de Vida (LCI, por sus siglas en inglés) y la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (LCIA). El LCI trata de la recopilación y el análisis de todos los flujos de entrada y salida asociados con un producto, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación final, incluido el reciclaje, reutilización y recuperación de energía.¹⁴ El LCIA consiste en la estimación de los indicadores de impacto medioambiental de dicho producto o servicio, los cuales harán posible la interpretación del ACV, la comparación con otros procesos y la realización de las mejoras que sean oportunas.



Figura 2. Descripción ACV según Ref. ¹⁶

2.2. Historia del Análisis de Ciclo de Vida

La metodología de ACV comenzó a desarrollarse en la década de 1980 y 1990, así como la coordinación por parte de la comunidad científica. No obstante, el concepto nació dos décadas antes cuando surgió el riesgo de desabastecimiento de algunos recursos.

En 1997 se implantó por primera vez la norma ISO 14040, quedando estandarizada la estructura de dicha metodología. Durante los últimos años, a consecuencia de la creciente demanda de productos y servicios y la necesidad de promover la producción y consumo sostenibles, los estudios de ACV han continuado en el punto de mira.

La Comisión Europea actualmente cuenta con distintas normativas que impulsan la utilización del ACV en la industria con el fin de reducir la contaminación como pueden ser: el Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (E-PRTR), la normativa de emisiones industriales, la de gestión de los residuos de las industrias extractivas, la evaluación de las repercusiones de los proyectos sobre el medio ambiente (evaluación de impacto ambiental) y la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente (EAE); y particularmente en el sector automovilístico, acerca de la contaminación de los vehículos, la normativa de vehículos al final de su vida útil (VFU).

Esta última normativa tiene como objetivo estipular las medidas que permitan evitar y limitar los residuos de los vehículos al final de su vida útil, gestionando sus componentes de manera que se reutilicen, reciclen o revaloricen de una forma eficaz, mejorando la eficiencia de la protección medioambiental de este sector. Algunos de los puntos clave de la normativa VFU se basan en los siguientes requisitos: los fabricantes de vehículos y componentes deben considerar el desmontaje, reutilización y valorización tanto en el diseño como en la producción de sus productos; se debe erradicar el uso de sustancias peligrosas como el mercurio, plomo, cadmio y cromo hexavalente; los fabricantes, importadores y distribuidores deben facilitar sistemas que ayuden a la recogida de los VFU; y la expedición de un certificado de destrucción por parte de un Centro Autorizado de Tratamiento (CAT), entre otros.¹⁷

En lo que a la industria del País Vasco respecta, el sector de la automoción es uno de los motores económicos junto a la energía y la aeronáutica, ya que alrededor de un tercio del total de los componentes fabricados a nivel estatal se producen aquí, contando con dos grandes factorías como son la de Mercedes Benz en Vitoria-Gazteiz y el Grupo Irizar con sede en Ormaiztegui. En 2021, Mercedes Benz adjudicó a Tecnalía el plan de descarbonización de su planta de Vitoria con el objetivo de “identificar y desarrollar iniciativas de I+D+i para alcanzar el reto de Cero Emisiones para el año 2039”.¹⁸ Para llevar a cabo dicha estrategia, se estudia la mejora de la eficiencia energética y la implementación de sistemas de suministro energético sostenibles. Asimismo, el equipo de Tecnalía desarrolla tecnologías para la reducción de residuos mediante

valorización, partiendo del planteamiento mediante simulación de procesos químicos, realizando estudios a nivel de laboratorio y finalmente verificándolos a escala industrial ¹⁹

Retomando un enfoque global sobre la implementación de ACV por la Comisión Europea cabe destacar que, actualmente, el ACV es una metodología que las empresas del sector industrial tienen necesariamente en cuenta a la hora de desarrollar sus productos y servicios. Para ello, en dicho sector se cuenta con distintos parámetros que posibilitan en análisis medioambiental de los productos y servicios llevados a cabo, con el fin de avanzar hacia un escenario en el mundo industrial cada vez más medioambientalmente sostenible. En primer lugar, la Declaración Ambiental de Producto (EDP, por sus siglas en inglés) es un parámetro utilizado para que los fabricantes puedan informar con la mayor transparencia posible del impacto medioambiental asociado a sus productos y servicios mediante datos objetivos, estandarizados y verificados por terceros.²⁰ Esta herramienta está sujeta a la norma internacional UNE-EN ISO 14025, adoptada en España por AENOR como UNE-EN ISO 14025:2010 y su objetivo es valorar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del producto o servicio. Las EDP abarcan la totalidad del sector industrial, y para su desarrollo se requiere conocer los siguientes parámetros: los indicadores de impacto medioambiental extraídos del ACV, el tipo de recurso del que proviene el consumo energético (fósil, renovable etc.), la existencia de emisiones contaminantes y de sustancias peligrosas, el modo de gestión del fin de vida útil del producto y otros aspectos de organización.

Otra de las medidas tomadas en la industria para velar por la sostenibilidad de sus procesos es la conocida Huella Ambiental del Producto (PEF, por sus siglas en inglés). Se trata de un nuevo método incentivado por la Comisión Europea para establecer un criterio sobre cómo las empresas deben medir el desempeño ambiental de los productos o servicios que desarrollen a lo largo de su ciclo de vida. Esta metodología está basada en el ACV, evaluando el comportamiento ambiental hasta en dieciséis categorías de impacto, y describe los pasos y reglas a seguir para realizar una evaluación correcta y estandarizada. El objetivo del PEF es impulsar la concienciación medioambiental en el sector industrial y garantizar que el proceso de evaluación medioambiental se lleve a cabo de la manera más transparente posible, ya que, al ser la metodología estándar utilizada por todos, se trata de la forma más competente y válida de evaluar el desempeño ambiental. Actualmente, la Comisión Europea aún se encuentra en proceso de desarrollo de los detalles de esta metodología, por lo que esta todavía se encuentra en fase piloto, y su no será obligatorio hasta finales del año 2024.²¹

Un buen ejemplo de concienciación medioambiental en la industria vasca es el grupo Orona, cuya actividad está enfocada en la investigación y desarrollo de ascensores, y el cual es líder estatal en su sector. El grupo Orona está ubicado en Hernani, Guipúzcoa; y actualmente es la segunda planta productiva de ascensores más grande a nivel mundial, ocupando una superficie de 70.000 m²,

aproximadamente. Sus ascensores ecológicos son producto de una gran labor de investigación y un gran esfuerzo por reducir el impacto medioambiental mediante la disminución del consumo de energía, estando adaptados a las nuevas Directivas Europeas de confort y ahorro de energía.²² Hace 20 años, esta empresa consiguió, mediante “Ekoscan” (norma liderada por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental IHOBE), un certificado de cumplimiento legal ambiental, y en 2008 se convirtió en la primera empresa del sector de la elevación en certificarse según la norma ISO 14006 de Ecodiseño. Actualmente, sus esfuerzos se encuentran alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), trabajando concienzudamente en mejorar la eficiencia energética de sus plantas de fabricación.²³

2.3. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida

Etapa 1- Definición de objetivos y alcance: El alcance del ACV se refiere a la delimitación de la parte del ciclo de vida del producto que se tomará en la evaluación, y los fines de la misma.¹⁵ En esta etapa se procederá a definir dicho alcance, así como los motivos por los que se lleva a cabo.

Etapa 2- Inventario: A continuación, en esta segunda etapa se procederá a describir los diferentes flujos de materiales y energía dentro del sistema del producto, y especialmente su interacción con el medio ambiente, las materias primas consumidas y las emisiones asociadas.

Etapa 3- Evaluación de los Impactos: Los resultados de los indicadores de todas las categorías de impacto se detallan en este paso; la importancia de cada categoría de impacto se evalúa mediante la normalización y, eventualmente, también mediante la ponderación.

Etapa 4- Interpretación de resultados: La interpretación de un ciclo de vida implica una revisión crítica, la determinación de la sensibilidad de los datos y la presentación de resultados.

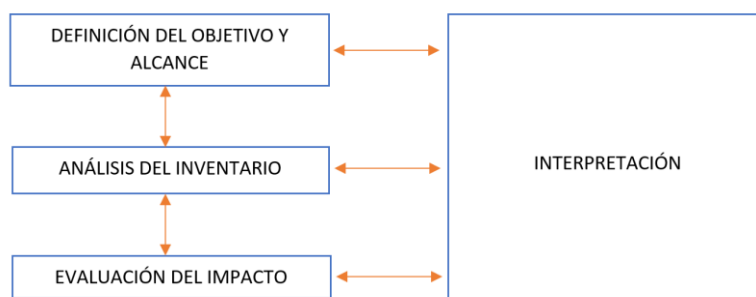


Figura 3. Etapas ACV. Adaptado de la fuente ¹⁵

2.4. Determinación de los límites en el Análisis de Ciclo de Vida

Los tipos de ACV se clasifican de distintas maneras atendiendo a su alcance, en función de las etapas que se consideren.

Existen los análisis del tipo: “de la cuna a la tumba”²⁴ (en inglés “*Cradle to grave*”), el cual incluye todos los flujos de entrada y salida de los procesos presentes a lo largo de todo el ciclo de vida; “de la cuna a la puerta” o “*Cradle to gate*”, el cual está limitado a los flujos desde la obtención de materias primas hasta que el producto abandona la planta de fabricación y entra en el mercado; “de la puerta a la puerta” (“*Gate to gate*”), considerando las entradas y salidas del sistema productivo, es decir, de los procesos de fabricación²⁵; y por último “de la cuna a la cuna” o “*Cradle to cradle*”²⁴, teniendo en consideración que las corrientes de salida del fin de vida del sistema pueden ser valoradas como materias primas del mismo sistema, cerrando así el círculo.²⁶

Para el caso concreto del presente estudio, el ACV con el que se va a trabajar es del tipo “de la cuna a la puerta”, ya que su alcance considera estudiar el impacto que tienen los flujos de entrada y salida que toman parte el proceso de extracción de la quitina desde las diferentes fuentes.

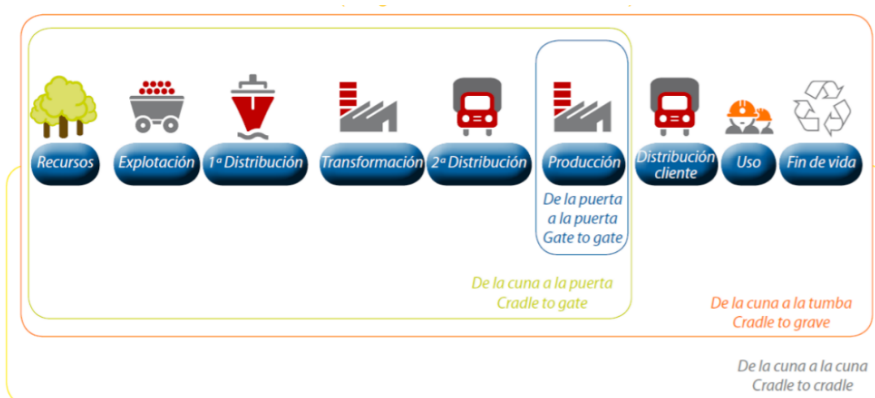


Figura 4. Tipos de alcance según Ref. ²⁶

2.5. Impactos

Se muestran a continuación en la Tabla 1, las dieciocho categorías de impacto ambiental que se han estudiado en este proyecto.

Categoría	Unidades	Descripción
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	Evolución temporal de la formación material particulado fino (MP 2.5)
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	Escasez existente de recursos fósiles

Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	Fracción de especies desaparecida y tiempo por kg de sustancia química emitida en agua dulce
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	Enriquecimiento del ecosistema acuático con nutrientes, debido a la emisión de nitrógeno o fósforo
Potencial de Calentamiento global	kg CO ₂ eq	Medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, por lo general dióxido de carbono.
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	Impacto cancerígeno en humanos de sustancias tóxicas emitidas al ambiente
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	Impacto no cancerígeno en humanos de sustancias tóxicas emitidas al ambiente
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	Tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas o partículas
Uso del suelo	m ² a crop eq	Cantidad de tierra ocupada
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	Fracción de especies desaparecida y tiempo por kg de sustancia química emitida en agua marina
Eutrofización marina	kg N eq	Enriquecimiento del ecosistema acuático con nutrientes, debido a la emisión de nitrógeno o fósforo
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	Escasez existente de recursos minerales
Formación de ozono	kg NO _x eq	Cantidad de ozono troposférico formado como resultado de reacciones químicas entre los NO _x , COVs y oxígeno en presencia de luz solar
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	Emisión de contaminantes atmosféricos que agotan el ozono estratosférico.
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	Liberación de sustancias tóxicas sobre el suelo e impacto sobre poblaciones, comunidades y ecosistemas.
Consumo de agua	m ³	Cantidad de agua consumida

Tabla 1. Descripción de las categorías de impacto; Fuente: Elaboración propia.

De entre los cuales, este estudio se centrará en el parámetro de calentamiento global, comparando el valor obtenido entre los cinco procesos, pudiendo así llegar a la conclusión de cuál es el más favorable. Al considerar únicamente este parámetro para la conclusión del análisis, podría decirse que trata de un análisis de Huella de Carbono, ACV particularizado para el calentamiento global.

3. Objetivos

3.1. Objetivo primario

El objetivo primario de este proyecto es llevar a cabo el ACV del tipo “de la cuna a la puerta” de cinco procesos de extracción de nanopartículas de quitina, con el fin de analizar alternativas a los métodos de extracción convencional, evitando así la utilización de tratamientos altamente perjudiciales que involucran el uso de ácidos. Se aportan, de manera pionera, datos numéricos que puedan convertir el proceso de extracción de quitina mediante fuentes fúngicas en una alternativa sólida, así como se cuantifica lo realmente perjudiciales que son los métodos tradicionales para el medio ambiente.

El estudio se realizará con 1 kg de muestra, para estandarizar los resultados y poder llevar a cabo una posterior comparación de los resultados obtenidos.

3.2. Objetivos secundarios

Como objetivos complementarios se encuentran, por un lado, la realización del LCI y del uso de energía requerido para llevar a cabo el proceso de reciclaje; y, por otro lado, el GWP. Este será el indicador en el que se base la toma de decisiones acerca de la mejor técnica de reciclaje.

4. Metodología

4.1. Proceso 1

Extracción de nanopartículas de quitina a partir de fuentes fúngicas²⁷

La secuencia de subprocesos ha sido extraída de las indicaciones proporcionadas por la Ref. ²⁷, por lo que no se trata de un ensayo propio en el laboratorio. La evaluación de este proceso de extracción de quitina es el objeto principal de estudio de este proyecto, ya que se pretende proponer como una alternativa altamente sostenible en comparación con el resto de metodologías debido a su reducido consumo de sustancias químicas y electricidad.

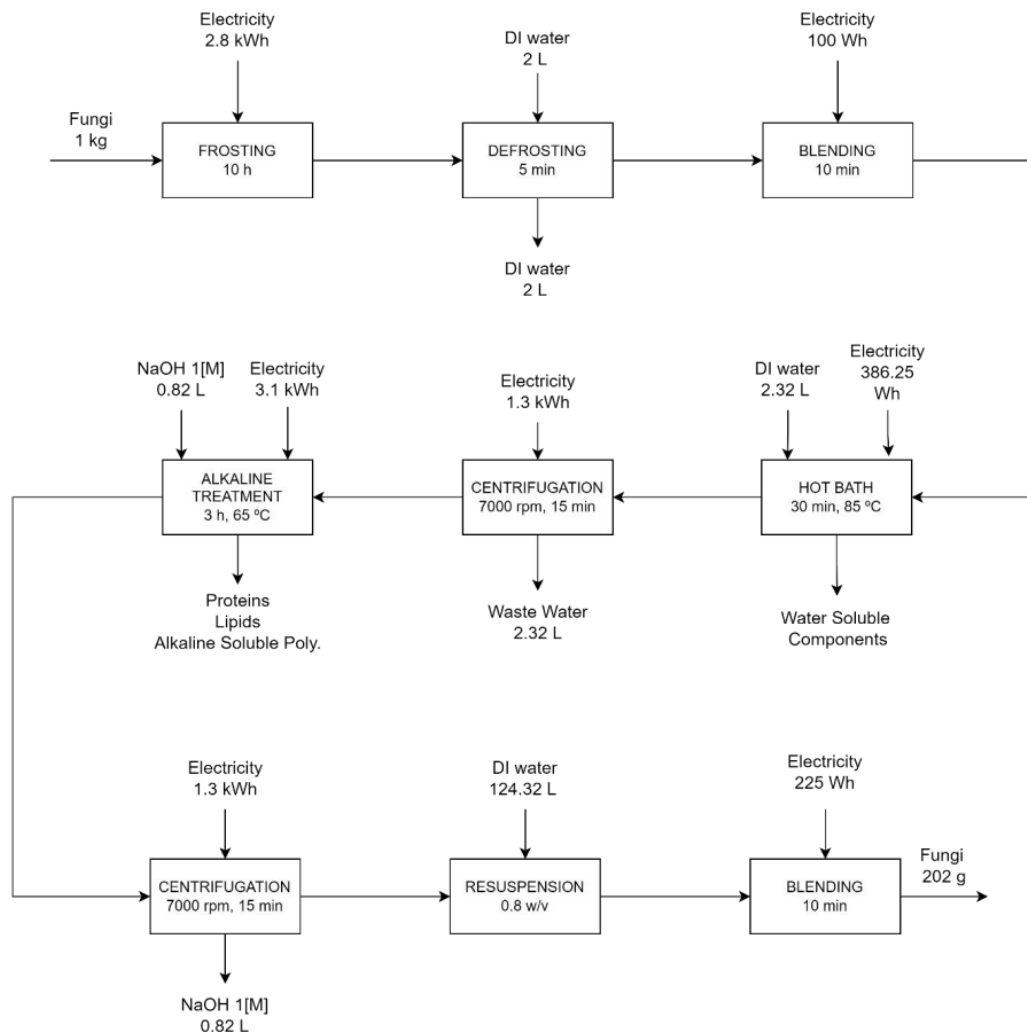


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de extracción de nanopartículas de quitina a partir de fuentes fúngicas según Ref. ²⁷

El primer proceso a estudiar se trata de la extracción de nanopartículas de quitina a partir de hongos. Para llevarlo a cabo, en primer lugar, se pesó 1 kg de muestra de *Agaricus Bisporus* y se mantuvo congelada para evitar pérdidas de agua y degradación enzimática. Posteriormente, se procedió a descongelarla en agua destilada durante 5 min, para lo que se necesitaron 2 L de agua, y se enjuagaron para eliminar las impurezas. A continuación, se trituró la muestra de en una licuadora de alta velocidad. El posterior proceso de tratamiento con agua caliente y centrifugado, mediante el cual comienza la extracción de quitina, tiene como fin eliminar cualquier componente soluble en agua. A éste le sigue un paso de desproteinización en solución alcalina y centrifugado para eliminar proteínas, lípidos y polisacáridos solubles en agua. Tras este, la torta residual obtenida de la centrifugación se resuspendió en agua (0.8 % $\frac{w}{v}$) y se batió durante 10 minutos. La tasa de recuperación de este proceso es del 20.2 %, y la distribución de consumo eléctrico se detalla a continuación en la Tabla 3.

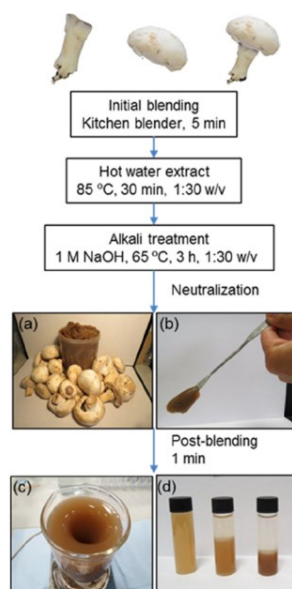


Figura 6. Desglose del proceso según Ref. ²⁷

El inventariado de este proceso se detalla a continuación en la Tabla 2.

Concepto	Cantidad (kg)	Fuente/provider
Agaricus Bisporus	1.00	-
Agua desionizada	129.45 L	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - Europe without Switzerland
Hidróxido de sodio	0.16	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
Electricidad	9.20 kWh	market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ENTSO-E

Tabla 2. Inventariado del primer proceso; Fuente: Elaboración propia.

Proceso	Consumo (kWh)
Congelado	2.80
Triturado	0.10
Baño en agua caliente	0.40
Centrifugación	1.30
Tratamiento alcalino	3.10
Centrifugación	1.30
Triturado	0.20
Total	9.20

Tabla 3. Consumo energético asociado al primer proceso; Fuente: Elaboración propia.

4.2. Proceso 2

Extracción de nanocrystal de quitina del caparazón de las gambas.²⁸

Cabe destacar nuevamente que las etapas del proceso siguen las indicaciones proporcionadas por la Ref. ²⁸, no habiéndolo desarrollado de primera mano en el laboratorio. Es necesario estudiar este procedimiento de extracción de quitina ya que es uno de los principales métodos que se llevan a cabo actualmente, y la finalidad de este trabajo es la comparación de los impactos medioambientales asociados a los procesos pioneros frente a los convencionales.

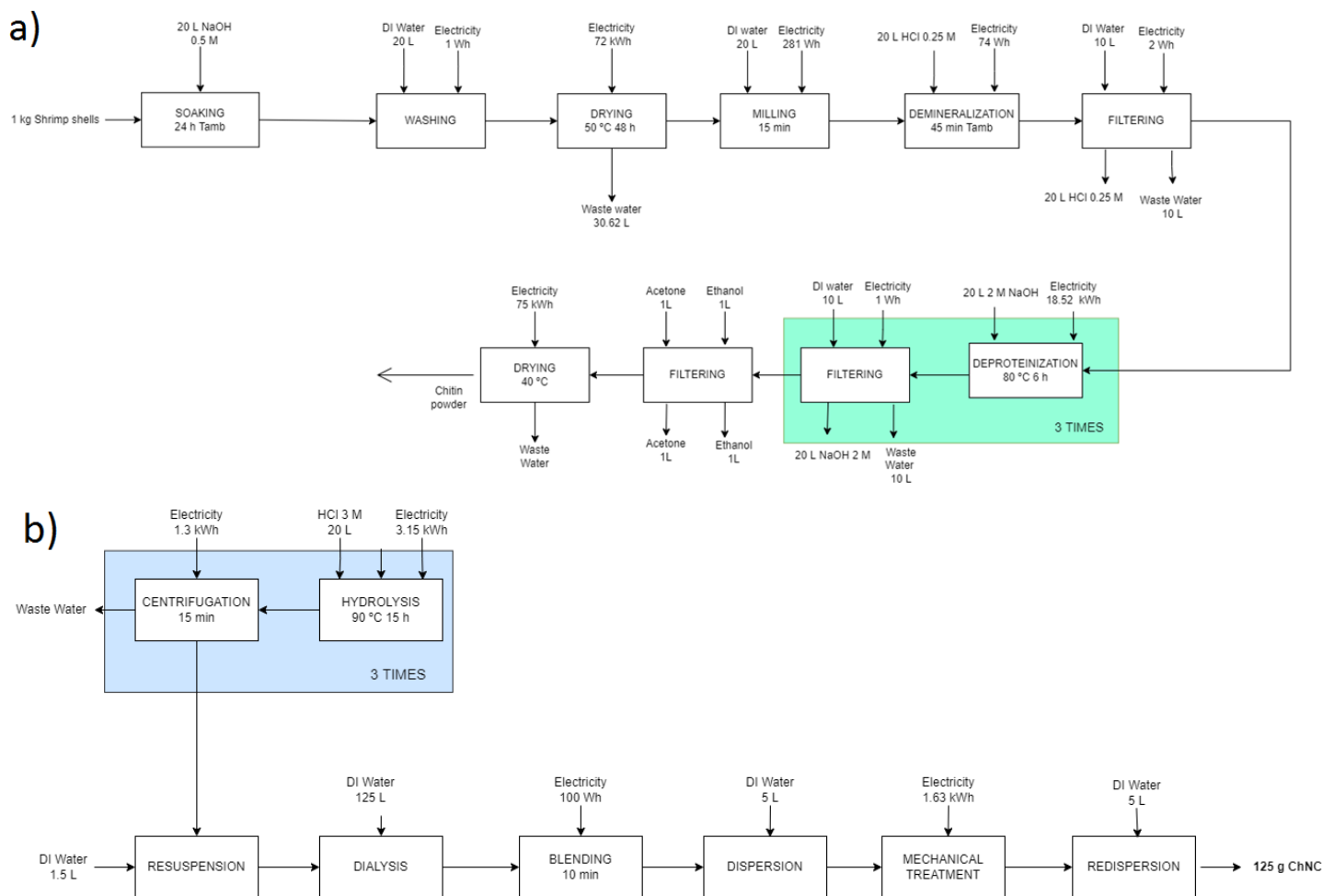


Figura 7. Esquema que resume la extracción de nanocrystal de quitina a partir de caparazones de camarones según Ref. ²⁸

Esta segunda metodología de extracción de nanopartículas de quitina se divide a su vez en dos subprocesos. El primero, consiste en el aislamiento de quitina en polvo a partir de caparazones de gambas, mientras que el segundo se trata de la extracción de quitina coloidal a partir de dicho polvo de quitina ya purificado. Primer subproceso: Se comenzó sumergiendo 1 kg de cáscaras de gambas en NaOH 0.5 [M] durante 24 h a temperatura ambiente con el fin de eliminar

proteínas y lípidos. Posteriormente, se lavó la muestra en agua desionizada hasta conseguir un pH neutro, tras lo cual se secó en un horno a vacío a una temperatura de 50 °C durante 48 h. Las cáscaras secas se molieron durante 15 min para conseguir reducir las a polvo. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de desmineralización mediante un tratamiento con HCl 0.25 [M] durante 45 min a temperatura ambiente. El material se filtró en un embudo Büchner y se enjuagó conseguir nuevamente un pH de 7 con agua destilada. Los posteriores tratamientos de desproteínización y filtrado se repitieron tres veces para eliminar la proteína de la muestra. Dicha desproteínización conllevó 6 h, y se realizó a 80 °C bajo la presencia de NaOH 2.5 [M]. Por último, se filtró la mezcla en las mismas condiciones de los filtrados anteriores, y se secó a 40 °C en un horno a vacío. De esta manera se eliminaron los compuestos orgánicos solubles y se obtuvo un polvo blanco esponjoso.

Segundo subproceso: Una vez obtenida la quitina purificada, se hidrolizó en presencia de HCl 3 [M] durante 1.5 h a 90 °C. Este proceso, junto con una centrifugación posterior, se repitió tres veces. Después, se resuspendió la muestra en agua desionizada hasta alcanzar un pH de 6. Tras esto, se procedió a la diálisis, para lo que se requirieron 125 L de agua desionizada. A continuación, la suspensión de nanocristales de quitina neutralizada final se mezcló en un mezclador a alta velocidad durante 5 min. La suspensión fina resultante se dispersó aún más en agua mediante homogeneización a 8000 psi durante 10 a 15 ciclos con un homogeneizador APV Gaulin. De este subproceso se obtuvieron, finalmente, los nanocristales de quitina. El rendimiento del proceso es del 12.5 %.²⁸ El inventariado de flujos requeridos para llevar a cabo dicho proceso completo se muestra a continuación en la Tabla 4.

Concepto	Cantidad (kg)	Fuente/provider
Cascara de gamba	1.00	-
Agua desionizada	340.70	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U -Europe without Switzerland
Hidróxido de sodio	12.80	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
Ácido clorhídrico	22.47	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW
Acetona	1.00 L	market for acetone, liquid acetone, liquid Cutoff, U RER
Etanol	1.00 L	market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from fermentation ethanol, without water, in 99.7% solution state, from fermentation Cutoff, U - GLO

Electricidad	218.06 kWh	market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ENTSO-E
--------------	------------	--

Tabla 4. Inventariado del segundo proceso; Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el consumo eléctrico del proceso global se detalla a continuación en la Tabla 5.

Proceso 2	Consumo (kWh)
Lavado	0.0010
Secado	72.00
Molienda	0.28
Desmineralización	0.074
Filtrado	0.0020
Desproteínización	55.56
Filtrado	0.0030
Secado	75.00
Hidrólisis	9.45
Centrifugación	3.90
Trituración	0.10
Tratamiento mecánico	1.63
Total	218.10

Tabla 5. Consumo energético asociado al segundo proceso; Fuente: Elaboración propia.

4.3. Proceso 3

Extracción de nanocrisales de quitina a partir de polvo de quitina procedente de gambas: ²⁹

El desarrollo de este proceso ha sido tomado de la Ref.²⁹, y el estudio del mismo es necesario ya que es otro de los procedimientos convencionales en la actualidad, por lo que se necesita conocer cómo afecta a los 18 indicadores de impacto para poder elaborar una conclusión acerca de la validez de la nueva metodología propuesta como medioambientalmente sostenible.

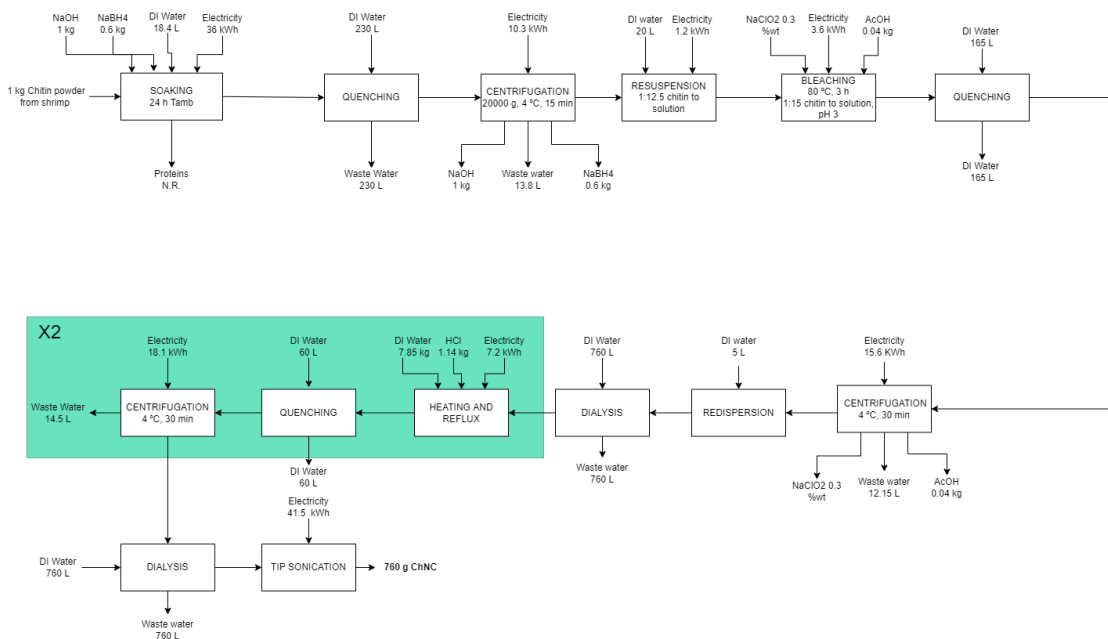


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de extracción de nanocrisales de quitina a partir de polvo de quitina procedente de gambas según Ref. 17

Este proceso difiere del resto en que la muestra inicial a tratar ya se trata de polvo de quitina, por lo que no tiene en consideración los subprocesos necesarios para obtener dicho polvo a partir de las posibles materias primas. Se trata, por tanto, de un proceso no equiparable en cuanto a impacto ambiental con el resto de metodologías de extracción de quitina, aunque su gran importancia y el interés que suscita en la investigación lo ha convertido de igual manera en objeto de estudio.

En primer lugar, el polvo de quitina se trató con una solución de NaOH (5 % en peso) a 80 °C durante 3 horas para eliminar cualquier proteína, en presencia de NaBH₄ (0.3 % en peso) para evitar la degradación de la quitina inducida por la base (proporción de quitina a solución 1:20). Tras una etapa de temple en la que la reacción fue calmada, se procedió a centrifugar a muestra a 20.000 g durante 15 min, a una temperatura de 4 °C. Posteriormente, el sedimento se resuspendió en agua desionizada en una proporción 1:12.5 quitina a solución, tras lo que se sometió a blanqueo ácido en una solución de NaClO₂ (0.3 % en peso) a 80 °C

durante 3 h (proporción de quitina a solución de 1:15). A continuación, la mezcla de reacción se diluyó con agua desionizada y se volvió a centrifugar siguiendo los parámetros anteriores. Todas las reacciones se realizaron con agitación de alta cizalladura, utilizando un agitador mecánico. Después de todos los pasos de purificación, se dispersó mediante agitación la muestra hasta convertirse en una disolución de aproximadamente el 2 % en peso de quitina y se dializó contra agua Milli-Q.

Los siguientes subprocesos de calentamiento bajo reflujo, temple y centrifugado se repitieron dos veces. El calentamiento bajo reflujo requirió de 1.14 kg de ácido clorhídrico, para el temple se usaron 60 L de agua desionizada, y la centrifugación se llevó a cabo a 4 °C durante media hora. Por último, se dializó la muestra nuevamente contra agua Milli-Q, y se sometió a una sonicación mediante la cual se recuperaron 760 g de nanocristales de quitina. La tasa de recuperación de este proceso es, por consiguiente, del 76 %, y el consumo de electricidad se detalla en la Tabla 7. Asimismo, se muestra a continuación en la Tabla 6 el inventariado de los flujos presentes durante el mismo.

Concepto	Cantidad (kg)	Fuente/provider
Polvo de quitina	1.00	-
Agua desionizada	2104.45	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - Europe without Switzerland
Hidróxido de sodio	6.00	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
Ácido clorhídrico	4.37	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW
Clorito de sodio	0.040	market for sodium chloride, powder sodium chloride, powder Cutoff, U - GLO
Ácido acético	0.040	market for acetic acid, without water, in 98% solution state acetic acid, without water, in 98% solution state Cutoff, U - GLO
Borohidruro de sodio	0.18	market for sodium borates sodium borates Cutoff, U - GLO
Electricidad	158.80 kWh	market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ENTSO-E

Tabla 6. Inventariado del tercer proceso; Fuente: Elaboración propia.

Proceso	Consumo (kWh)
Remojo	36.00
Centrifugación	10.30
Resuspensión	1.20
Blanqueamiento	3.60

Centrifugación	15.60
Calentamiento en reflujo	14.40
Centrifugación	36.20
Ultrasonidos	41.50
Total	158.80

Tabla 7. Consumo energético asociado al tercer proceso; Fuente: Elaboración propia

4.4. Proceso 4

Extracción de nanocristales de quitina de caparazones de cangrejo:³⁰

Nuevamente este proceso no ha sido llevado a cabo en el laboratorio para el desarrollo de este proyecto, sino que se han seguido las etapas aportadas por la Ref. ³⁰ para el cálculo de ACV. Junto con la extracción de quitina a partir de caparazones de gambas, este es el proceso más común, por lo que se ha considerado necesario analizarlo para poder comparar su impacto medioambiental con el resto de procesos.

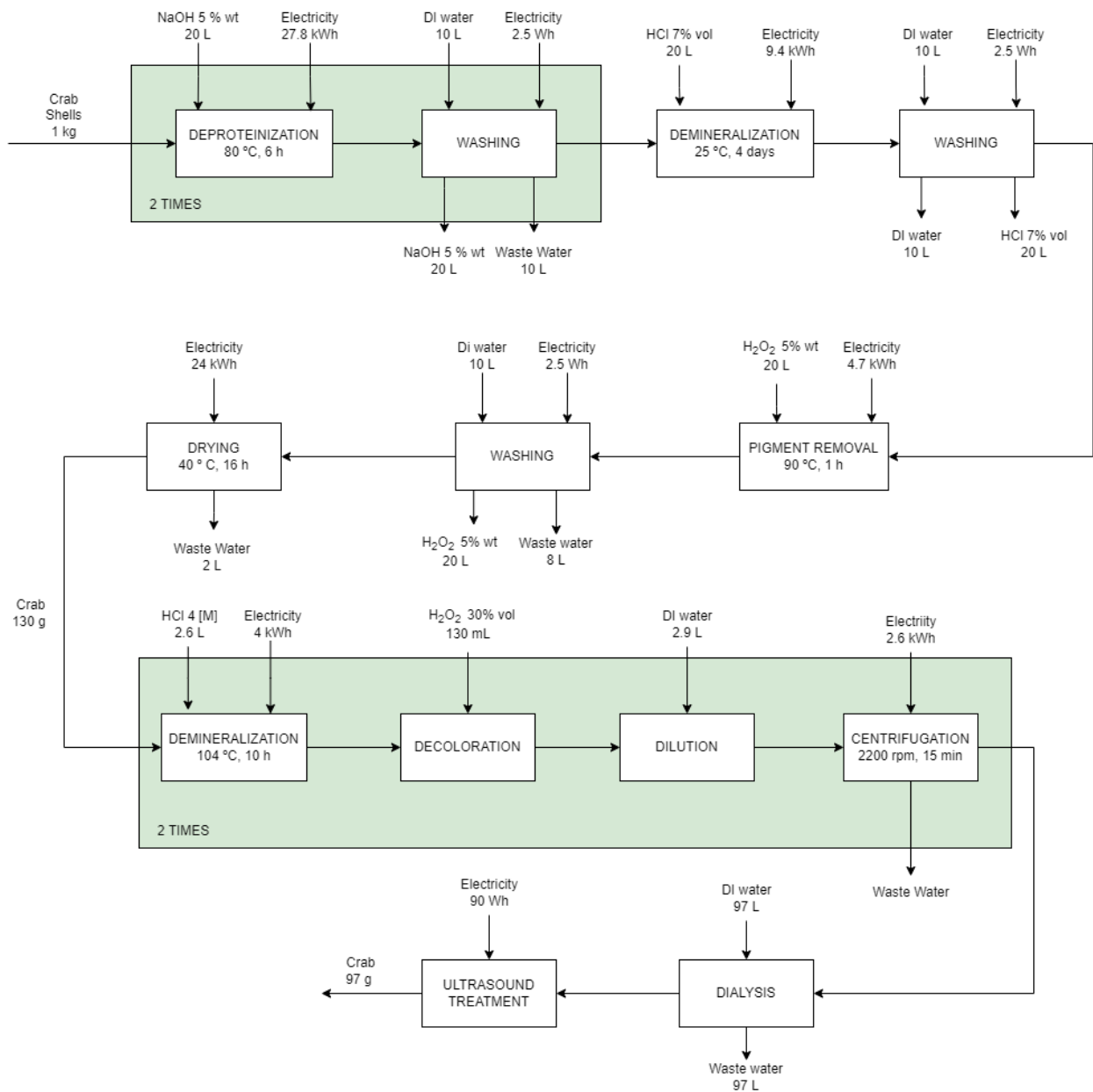


Figura 9. Diagrama de flujo que resume la extracción de nanocristales de quitina del cangrejo según Ref.³⁰

Se toma 1 kg de caparazones de cangrejo y se procede a sumergirlos en una disolución acuosa de NaOH 5 % en peso a 80 °C durante 6 h para eliminar las

proteínas presentes. Los productos se lavaron con agua desionizada y posteriormente tratados con una solución acuosa de HCl 7 % en volumen durante 4 días a temperatura ambiente con el fin de eliminar los minerales de carbonato de calcio. Después de lavar la muestra, se oxidó con una solución acuosa de H₂O₂ al 5 % en peso a 90 °C durante 1 h. La muestra se lavó con agua destilada y luego se secó en un horno a 40 °C durante 16 h para obtener quitina blanca. Tras este paso, se procedió a desmineralizar el producto con una solución de HCl 4 [M] y decolorarlo inyectando H₂O₂ al 30 % en volumen. Después de la hidrólisis ácida, la mezcla de reacción se diluyó con 2.9 L de agua destilada seguido de centrifugación (a 2200 rpm durante 15 min) para eliminar las especies de quitina solubles. Este paso se repitió dos veces más para producir una suspensión acuosa de quitina con pH aproximadamente de 2. La suspensión se dializó contra agua destilada durante 48 h hasta que el pH de la suspensión aumentó a aproximadamente 4. Para aumentar la estabilización de los coloides de quitina nanocristalinos, la suspensión se dispersó con un tratamiento de ultrasonido durante 1 h. La tasa de recuperación de este proceso es del 9.7 %, obteniendo así 97 g de material recuperado.

Concepto	Cantidad (kg)	Source/provider
Caparazón de cangrejo	1.00	-
Agua desionizada	231.84	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - Europe without Switzerland
Hidróxido de sodio	4.24	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
Ácido clorhídrico	8.20	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW
Peróxido de hidrógeno	3.50	market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - RER
Electricidad	107.00 kWh	market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ENTSO-E

Tabla 8. Inventariado del cuarto proceso; Fuente: Elaboración propia.

Proceso	Consumo (kWh)
Deproteinización	55.60
Lavado	0.0050
Demineralización	9.40
Lavado II	0.0025
Despigmentación	4.70
Lavado III	0.0025
Secado	24.00

Demineralización	8.00
Centrifugado	5.20
Tratamiento ultrasónico	0.090
Total	107.00

Tabla 9. Consumo energético cuarto proceso; Fuente: Elaboración propia.

4.5. Proceso 5

Proceso convencional de extracción de nanocristales de celulosa (hidrólisis de ácido sulfúrico)³¹

Por último, se estudia este proceso cuyas etapas se describen en la Ref.³¹ debido al alto interés que suscita comparar su efecto sobre los indicadores de impacto medioambiental respecto a los métodos de extracción de quitina, ya que es el método tradicional y más usado de nanocristales de celulosa.

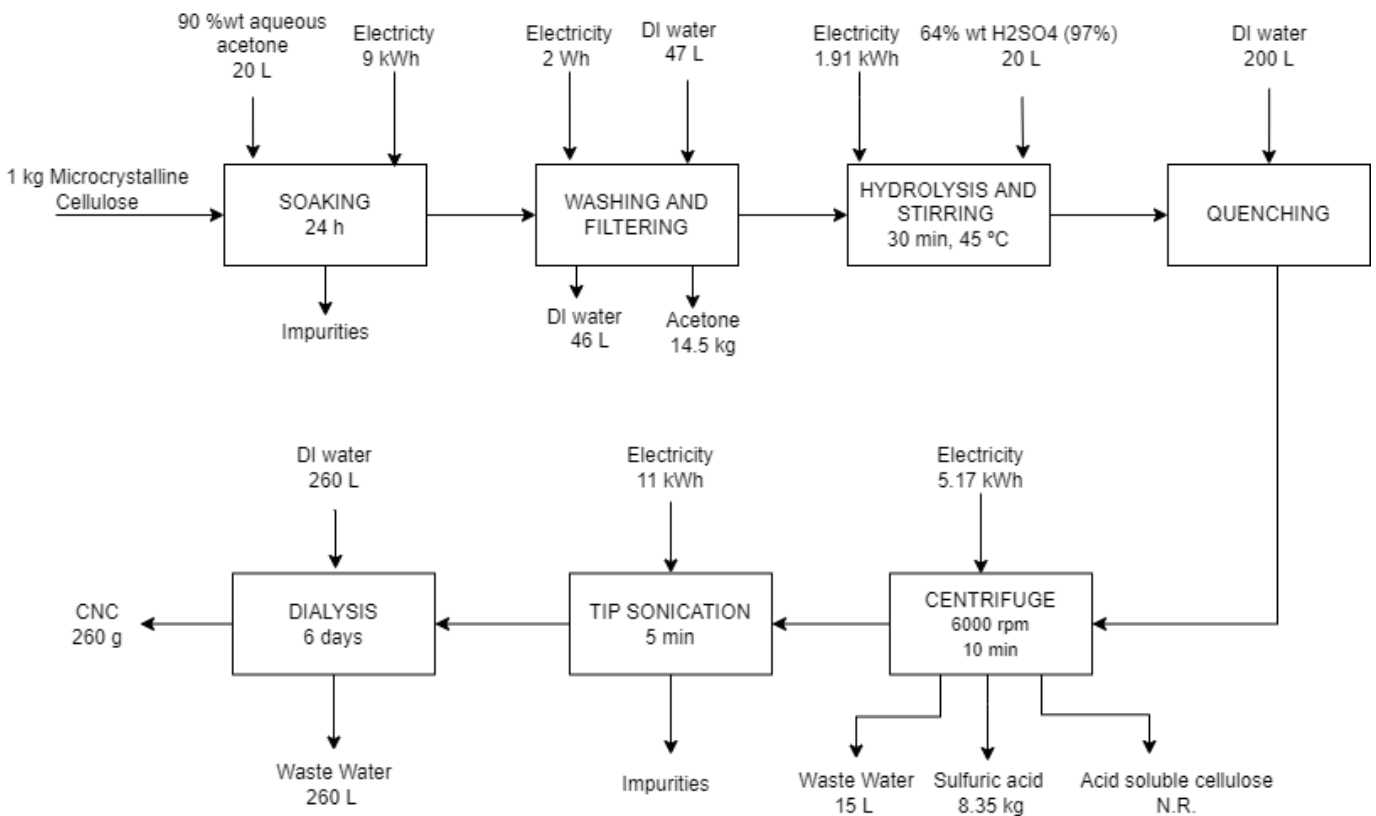


Figura 10. Diagrama de flujo que resume el proceso de extracción de nanocristales de celulosa según Ref.³¹

Se comenzó tratando 1 kg de polvo de celulosa microcristalina y sumergiéndola en acetona acuosa al 90 % durante 24 h para eliminar todos los extractos residuales. La mezcla obtenida se lavó hasta pH neutro y se hidrolizó con una solución de ácido sulfúrico al 64 % ($\frac{w}{w}$) a una temperatura de 45 °C durante 30 min con agitación constante. Posteriormente, la suspensión se diluyó 20 veces en agua destilada para apagar la reacción en un proceso de temple, seguido de un centrifugado a 6000 rpm durante 10 min para concentrar la celulosa restante y eliminar el exceso de ácido acuoso. La celulosa coloidal se logró mediante sonicación con una producción del 40 % en un baño de hielo durante 5 min, seguido de un proceso de diálisis durante 6 días, con un consumo de agua de 260 L.

La Tabla 10 reúne el inventariado de los flujos envueltos en el proceso, y se conoce que el rendimiento es del 26 % para esta metodología.

Concepto	Cantidad (kg)	Source/provider
Celulosa microcristalina	1.00	-
Agua desionizada	513.32	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - Europe without Switzerland
Acetona	14.50	acetone production, liquid acetone, liquid Cutoff, U - RoW
Ácido sulfúrico	8.60	market for sulfuric acid sulfuric acid Cutoff, U - RoW
Electricidad	27.10 kWh	market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ENTSO-E

Tabla 10. Inventariado quinto proceso; Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se muestra a continuación en la Tabla 11 el desglose del consumo energético requerido para el proceso completo.

Proceso	Consumo (kWh)
Remojo	9.00
Lavado y filtrado	0.0020
Hidrólisis y mezclado	1.91
Centrifugado	5.17
Ultrasonidos	11.00
Total	27.10

Tabla 11. Consumo energético del quinto proceso

5. Resultados y discusión

A continuación, se muestra en la Tabla 12 la distribución de impactos medioambientales de los cinco procesos estudiados, en lo que a las 18 categorías de impacto se refiere.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	ChNF_{HONGOS}	ChNC_{GAMBA}	ChNC_{GAMBA-QUITINA}	ChNC_{CANGREJO}	CNC
Formación de partículas finas	10 ⁻³ kg PM2.5 eq	27.93	1522.59	164.94	862.25	282.46
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	4.91	248.72	28.09	150.07	92.05
Ecotoxicidad en agua dulce	10 ⁻¹ kg 1,4-DCB	6.35	402.92	39.53	244.04	390.15
Eutrofización de agua dulce	10 ⁻³ kg P eq	18.61	823.50	103.69	493.57	56.74
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	18.46	906.77	105.17	543.46	177.95
Toxicidad cancerígena humana	10 ⁻¹ kg 1,4-DCB	12.34	635.42	71.61	420.90	60.45
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	23.54	1233.00	138.34	744.49	95.90
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	9.30	392.21	50.81	238.22	23.81
Uso del suelo	m2a crop eq	0.46	31.61	2.62	13.10	1.49
Ecotoxicidad marina	10 ⁻² kg 1,4-DCB	87.00	5415.18	537.79	3294.25	544.51
Eutrofización marina	10 ⁻⁴ kg N eq	15.13	872.96	121.79	476.08	52.89
Escasez de recursos minerales	10 ⁻³ kg Cu eq	24.70	2003.01	172.88	1172.01	186.31
Formación de ozono, Salud humana	10 ⁻³ kg NOx eq	31.97	2644.18	188.67	990.77	391.31
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	10 ⁻³ kg NOx eq	32.30	3232.03	190.69	1005.44	432.74
Agotamiento del ozono estratosférico	10 ⁻⁶ kg CFC11 eq	9.97	651.30	61.61	330.12	27.93
Acidificación terrestre	10 ⁻³ kg SO ₂ eq	66.54	3604.71	387.65	2053.81	855.00
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	21.67	2194.07	162.07	1236.48	330.70

Consumo de agua	m3	1.01	21.44	2.29	14.15	3.86
-----------------	----	------	-------	------	-------	------

Tabla 12. Distribución de impactos; Fuente: Elaboración propia.

En verde, se muestra el mejor resultado dentro de cada categoría, y en naranja, por el contrario, el peor. Se aprecia como el proceso de extracción de quitina a partir de fuentes fúngicas destaca por su bajo perjuicio ya que aporta los mejores resultados en todas las categorías. En concreto, para el caso del GWP, se cuantifican únicamente 18.45 kg de CO₂ equivalente por kilo de nanopartículas. En contraposición, es la extracción a por cáscaras de gambas el proceso que más daña el medioambiente, ya que ofrece los valores más altos en todas las categorías de estudio, siendo el GWP 49 veces superior al caso del primer proceso. Para los casos intermedios de extracción de quitina, se conoce que el tercer proceso, el cual consistía en tratar polvo de quitina, es alrededor de 6 veces más contaminante que el de los hongos, a pesar de que, como se ha comentado previamente, mediante esta metodología se ignoraban todos los tratamientos previos a la extracción de dicho polvo, y que por ello no era realmente semejante a los demás. En cuanto a la extracción de nanocristales de celulosa, se conoce tras este análisis que toma un lugar intermedio, siendo casi 10 veces más perjudicial que el de fuentes fúngicas, pero 5 veces menos que el extraído de caparazones de gambas. Por último, el proceso de extracción a partir de caparazones de cangrejo, el cual comparte estructura con el de extracción a partir de gambas, se trata de la segunda metodología más perjudicial, con un GWP de 543.46 kg de CO₂ equivalente.

Tras este análisis, se sostiene la premisa de que la extracción de nanopartículas de quitina a partir del se trata de un proceso muy superior a sus semejantes en cuanto a sostenibilidad se refiere. Esto se debe a su bajo uso tanto de sustancias químicas como de electricidad. La contribución de cada factor al GWP total queda reflejada en la Figura 11 que se muestra a continuación.

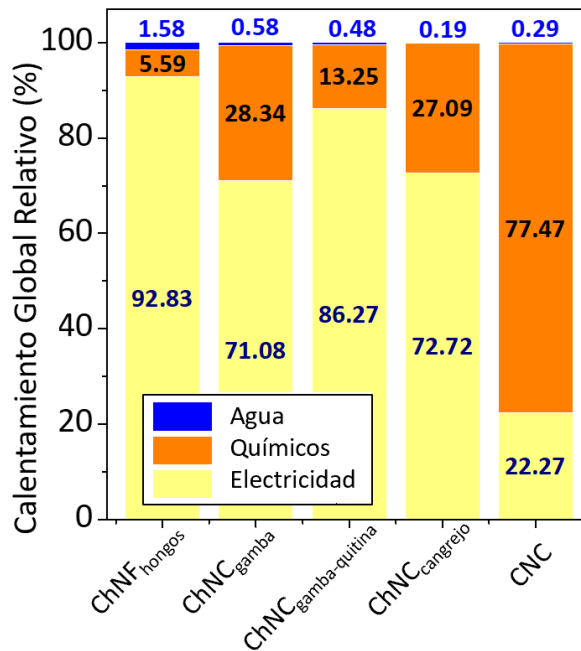


Figura 11. Distribución del GWP en función de agua, químicos y electricidad. Adaptado de Ref. ¹¹

Se puede observar que el primer proceso, el que menor impacto medioambiental tiene, es de todos el que menor cantidad de sustancias alcalinas requiere para poder ejecutarse. De su GWP global, los químicos aportan únicamente 1.03 kg CO₂ equivalente, lo cual supone el 5.59 % del impacto total, siendo el consumo eléctrico el factor predominante con 17.13 kg de CO₂ equivalente.

Por el contrario, dentro de la Huella de Carbono del proceso más contaminante, el procedente de las gambas, destacan tanto el uso de químicos (28.34 % del total) y de electricidad (71.08 %). Estos dos factores aportan 256.97 y 644.53 kg de CO₂ equivalente, respectivamente.

6. Análisis de sensibilidad

Con el fin de estudiar la reducción de impacto medioambiental asociado con el aislamiento de nanofibrillas de quitina de hongos y de nanocristales de quitina de caparzones de gambas, se ha considerado un nuevo escenario en el que, se estima que la demanda eléctrica se reducirá en un 30 % debido a una mejora de la eficiencia energética y al aumento de escala. Además, se considera que los disolventes se recogen mediante destilación para que no se liberen a la atmósfera, utilizando para ello un evaporador rotatorio con una capacidad de 20 L y una tasa de evaporación máxima de $5 \frac{L}{h}$. Posteriormente, se considera que los productos recuperados se recirculan nuevamente a la producción y que solo se requiere un 5 % de productos químicos frescos para cada procedimiento. De esta manera, se modelan veinte ciclos, donde los productos químicos crudos solo se agregan en el primer ciclo y los siguientes 19 ciclos requieren agregar 5 % en peso de reactivos frescos.

Se han elegido estos dos procesos para llevar a cabo el análisis de sensibilidad ya que se tratan de los escenarios menos y más contaminantes, respectivamente. Los resultados de las 18 categorías de impacto tras la aplicación del análisis de sensibilidad se muestran a continuación en la Tabla 13.

		HONGOS	GAMBA
Categoría de impacto	Unidad de referencia	Impacto por kg recuperado	Impacto por kg recuperado
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	0.023	0.69
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	3.93	125.69
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4-DCB	0.51	15.59
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.016	0.49
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	14.75	468.92
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	1.03	31.16
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	20.35	603.09
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	7.60	246.36
Uso del suelo	m ² a crop eq	0.41	12.87
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0.70	21.42
Eutrofización marina	kg N eq	0.0049	0.05
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0.027	0.58
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	0.026	0.88
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	0.026	0.95

Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	0.0000080	0.00025
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0.054	1.68
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	16.22	458.19
Consumo de agua	m ³	0.38	9.52

Tabla 13. Impactos tras el análisis de sensibilidad; Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos del análisis son muy significativos, tal y como se puede observar en la Figura 12, el GWP se reduce en un 20.1% para el caso de las fuentes fúngicas, alcanzando un valor mínimo de $14.7 \frac{kg CO_2 equiv}{kg}$, el cual es un valor muy competitivo para plantear esta alternativa como optima; y un 48.3 % para el de los caparazones de gambas.

Sin embargo, para de los hongos, la escasez de recursos minerales y la eutrofización marina aumentan en un 10.0 y un 227.6 %, respectivamente, debido al mayor consumo de energía para alimentar el rotavapor.

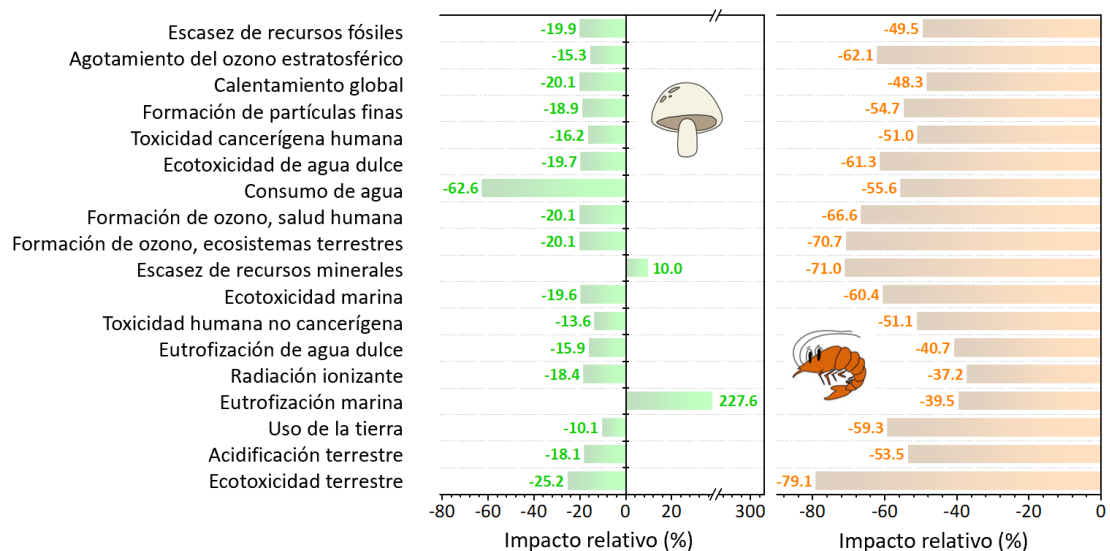


Figura 12. Reducción de impactos tras el Análisis de Sensibilidad. Adaptado de Ref. ¹¹

7. Disposición del proyecto

7.1. Descripción de las tareas a realizar

Tarea 1: Preparación

Descripción de la tarea: En esta etapa del proyecto, se leyeron los documentos proporcionados por el director del trabajo.

Recursos humanos:

Ingeniero/a Junior (90h)

Ingeniero/a Senior (15h)

Duración: 2 semanas

Tarea 2: Búsqueda de información

Descripción de la tarea: Se comenzó a indagar en el tema. Esta etapa implica la lectura de distintos artículos relacionados con el asunto a tratar y la búsqueda de bibliografía.

Recursos humanos: Ingeniero/a Junior (150h)

Duración: 3 semanas

Tarea 3: Cálculo LCI

Descripción de la tarea: Se analizaron las 5 diferentes metodologías de extracción de quitina. Se realizó el inventariado, entradas y salidas del ACV.

Recursos humanos:

Ingeniero/a Junior (210)

Ingeniero/a Senior (40)

Duración: 12 semanas

Tarea 4: Obtención y análisis de resultados OpenLCA

Descripción de la tarea: Se introdujeron dichas entradas y salidas en el software OpenLCA, mediante el cual se calcularon los impactos de cada proceso de reciclaje.

Recursos humanos:

Ingeniero/a Junior (30)

Ingeniero/a Senior (10)

Duración: 5 semanas

Tarea 5: Redacción del documento

Descripción de la tarea: Una vez obtenidos los resultados, se procedió a redactar el documento que engloba la contextualización, procedimiento y conclusiones del trabajo.

Recursos humanos:

Ingeniero/a Junior (60)

Ingeniero/a Senior (10)

Duración: 2 semanas

7.2. Duración total

La duración total del trabajo será de 24 semanas, comenzando en septiembre de 2022 y finalizando en febrero de 2023.

7.3. Diagrama de Gantt

		sep-22				oct-22				nov-22				dic-22				ene-23				feb-23			
PROYECTO	DURACIÓN	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24
ANÁLISIS CICLO VIDA																									
FASE 1: PREPARACIÓN	2 SEM.																								
Guía de documento																									
FASE 2: BUSQUEDA DE INFORMACIÓN	3 SEM.																								
Lectura de artículos																									
FASE 3: CÁLCULO DE LCI	12 SEM.																								
Primer LCI																									
Segundo LCI																									
Tercer LCI																									
Cuarto LCI																									
Quinto LCI																									
FASE 4: SOFTWARE OPENLCA	5 SEM.																								
Introducir datos y obtener resultados																									
FASE 5: REDACCIÓN DEL DOCUMENTO	2 SEM.																								
Concluir documento																									

Tabla 14. Diagrama de Gantt del proyecto. Fuente: Elaboración propia. SEM: semanas.

8. Coste del proyecto

El coste del proyecto considera:

- i. Un tiempo de amortización de 3 años.
- ii. Un 10 % de costes indirectos.
- iii. Un precio de la electricidad de 0.28 € / kWh.

El coste del proyecto asciende a 20455 €.

CONCEPTO	TASA (€/HORA)	HORARIA	UNIDAD (HORAS)	TOTAL
PERSONAL				
<i>Ingeniero/a Junior</i>	30		450	13500 €
<i>Ingeniero/a Senior</i>	70		75	5250 €
AMORTIZACIONES				
<i>Ordenador</i>	0.90		450	405 €
<i>Licencia OpenLCA</i>	1.60		100	160 €
<i>Licencia Microsoft</i>	0.50		150	75 €
<i>Ecoinvent</i>	0.50		100	50 €
GASTOS				
<i>Material de oficina</i>	-		-	400 €
<i>Electricidad</i>	0.28		450	126 €
SUBTOTAL				18586 €
<i>Costes indirectos (10 %)</i>				1859 €
TOTAL				20445 €

Tabla 15. Coste del proyecto; Fuente: Elaboración propia

9. Conclusiones

En el presente trabajo, se ha cuantificado de manera pionera los impactos medioambientales que se originan del aislamiento de nanopartículas de quitina a partir de recursos fúngicos y crustáceos mediante la evaluación de ciclo de vida. A pesar de conocerse las potenciales ventajas frente a los métodos convencionales, nunca antes se había estandarizado y cuantificado, de manera que se pudiese comparar de una manera real y objetiva dicha diferencia.

Los impactos de la cuna a la puerta de los ChNF de los hongos se enfrentan a la producción de ChNC por hidrólisis ácida a partir de caparazones de camarón, caparazones de cangrejo y polvo de quitina. A modo de comparación, también se considera la hidrólisis de celulosa inducida por ácido sulfúrico análoga para obtener CNC. Se ha normalizado la cantidad de materia prima entrante al proceso, de manera que en todos los casos se utiliza 1 kg de material de origen (hongos, caparazones de camarones y cangrejos, polvo de quitina, celulosa microcristalina).

Los 18 impactos que muestran el efecto medioambiental nocivo de cada una de las metodologías están basados en el consumo de material de entrada, electricidad y emisiones durante el desarrollo de cada proceso.

La extracción de nanopartículas de quitina a partir de fuentes fúngicas resulta ser el proceso más respetuoso con el medio ambiente, y tal como se ha analizado previamente, se conoce que sus impactos en las diferentes categorías son los más bajos entre todas las metodologías estudiadas. Por el contrario, el método de extracción a partir de caparazones de gambas se trata del más perjudicial, siendo sus impactos los más altos en todas y cada una de las categorías. Se conoce que el GWP del caso fúngico, es de 18.5 kg CO₂ equivalente por 1 kg de nanopartículas dispersadas en agua, mientras que los ChNC de los caparazones de los camarones presentan un valor de 906.8 kg·CO₂ equivalente por 1 kg, alrededor de 49 veces superior.

El análisis de sensibilidad realizado al primer proceso extraído de los hongos, el cual consiste en la suposición de un escenario en el que el 95 % de las sustancias químicas requeridas se recirculan y que el consumo energético disminuye en un 30 %, muestra un GWP de 14.7 kg CO₂ equivalente por 1 kg, lo cual supone una reducción del 20.1 %. De esta manera queda aclarada la posible duda sobre la validez de dicho método y se propone como una alternativa muy interesante a implementar para el desarrollo de este campo. Asimismo, un análisis de sensibilidad análogo realizado sobre el proceso de obtención de quitina por medio de caparazones de gambas, revela una reducción del 48.3 % respecto a la situación original. No obstante, este escenario, el cual disminuye el impacto para la mayoría de las categorías tanto en el caso de las fuentes fúngicas como en el de las gambas, resulta perjudicial para la eutrofización marina y la escasez de recursos minerales siguiendo la metodología de los hongos. Estos índices aumentan en un 227.6 y un 10 % respectivamente, lo cual

es debido al consumo adicional de electricidad asociado al rotavapor del que se alimenta la recirculación de los ácidos.

El objetivo principal de este proyecto es conocer los indicadores de impacto medioambiental de los cinco procesos estudiados, sin ellos no se podría comparar ni tomar decisiones. No obstante, estos valores son la punta del iceberg, y para llegar a ellos se ha tenido que realizar previamente una profunda búsqueda de información, la cual ha sido el factor más problemático en el desarrollo del trabajo. El estudio de cada uno de los procesos se ha basado en artículos que enumeran tanto la secuencia de etapas intervinientes como el inventario, pero en repetidas ocasiones la ausencia de datos concretos acerca de cantidades de materiales ha ocasionado que la búsqueda deba ampliarse a otras fuentes. Cuando ha faltado un dato necesario para el cálculo de impactos, se ha tenido que recurrir a buscar otros procesos que pudieran presentar similitudes con el objeto de estudio, y tratar de extraer conclusiones de ellos. Este ha sido el mayor problema del proyecto, la necesidad de desarrollar un criterio de selección de datos válidos, y la gran labor de búsqueda y lectura de artículos. Sin embargo, cabe mencionar que para la mayoría de metodologías de extracción de quitina, los artículos de partida con los que se ha trabajado, han resultado ser detallados y claros, por lo que dicho problema solo se ha presentado en ocasiones muy específicas. Asimismo, puntualmente los cálculos químicos de algunos procesos han podido suponer un inconveniente a la hora de desarrollar el trabajo, ya que se trataban de operaciones muy precisas que no eran objeto de estudio pero que se requerían para poder analizar los procesos, en concreto el ajuste del pH de la muestra ha sido la mayor dificultad, por lo que se han consultado fuentes externas que han podido explicar y ayudar con dichos cálculos.

Una vez superadas estas dificultades, cuando el inventario de los procesos ha estado claro y se ha conocido cada detalle de las distintas etapas, el trabajo con el software OpenLCA no ha supuesto mayor reto que la inversión de tiempo y la precisión en la creación de las cadenas de subprocesos. Este software es eficiente y relativamente sencillo de utilizar una vez se ha comprendido su funcionamiento, aunque ha sido necesario invertir mucho tiempo en él, ya que la complejidad de los procesos y la gran longitud de las cadenas deriva en la necesidad de un largo tiempo de compilación. No obstante, los resultados proporcionados por este software tienen un gran valor, ya que permite elegir la información que se desea obtener, y en este caso, se ha podido conocer el valor exacto de las dieciocho categorías de impacto y, por consiguiente, se ha podido comparar los valores concluidos de los cinco procesos con una precisión sobresaliente.

De esta manera, es indudable que el proceso de extracción por medio de fuentes fúngicas es la mejor alternativa para la obtención de quitina, conclusión que se acentúa aún más tras la realización del análisis de sensibilidad. Este análisis plantea un escenario mucho más similar al real en el sector industrial, ya que, en la realidad de la industria, siempre que se pueda se va a buscar optimizar los

recursos y conseguir la mayor eficiencia posible, que tal y como se ha mencionado anteriormente, es uno de los principales objetivos de la ingeniería. Por tanto, viendo que los impactos medioambientales se reducen aún más cuando se asemeja el proceso estudiado a la realidad, se valora aún más su potencial y los beneficios ambientales que conlleva. No obstante, se debe tener en consideración que se trata de un proceso que trata materias primas en lugar de residuos, en contraposición a los procesos que parten de las cáscaras de gambas o cangrejos. Actualmente, es conveniente dar una salida a estos desechos procedentes del mar, ya que son abundantes y en ocasiones suponen un problema de gestión. La extracción de quitina de estos residuos es una buena manera de aprovecharlos y de mejorar la salud del ecosistema marino. Habrá, por tanto, que valorar cuál es la prioridad a la hora de proceder, y la única manera de poder hacerlo es conociendo los valores numéricos de impacto que se proporcionan en este proyecto.

En una actualidad donde la escasez de recursos y la cruda situación medioambiental representan una amenaza, es necesario apostar por tecnologías innovadoras que puedan revertir o, al menos, frenar la hostilidad con el medio ambiente. En ocasiones se recurre a la comodidad de mantener los modelos tradicionales de desarrollo de procesos, pero una vez cuantificada y demostrada la validez de este método pionero, es necesario no solo fomentar su aplicación en la industria, sino continuar buscando nuevos métodos que puedan incluso superarlo.

La participación en trabajos como este es realmente interesante y satisfactoria, tras años de estudio alejados de la puesta en práctica de la ingeniería en el mundo real, es una novedad conocer cómo funcionan dichos procesos fuera de una escala de laboratorio. Además, la formación en el importante campo de la ingeniería sostenible y la posibilidad de aportar conocimiento y soluciones a un problema como es el Calentamiento Global es reconfortante y motivador para continuar colaborando en futuros proyectos.

10. Bibliografía

- (1) Shahidi, F.; Arachchi, J. K. V.; Jeon, Y.-J. Food Applications of Chitin and Chitosans. *Trends Food Sci Technol* **1999**, *10* (2) 0-51. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00017-5).
- (2) *Quimica.es*, *Quitina*. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Quitina.html> (accedido 2022-12-09).
- (3) McGavin, G. C. *Insectos Arañas y Otros Artrópodos Terrestres*. **2000**.
- (4) Lizundia, E.; Nguyen, T.-D.; Winnick, R. J.; MacLachlan, M. J. Biomimetic Photonic Materials Derived from Chitin and Chitosan. *J Mater Chem C Mater* **2021**, *9* (3) 796-817. <https://doi.org/10.1039/D0TC05381C>.
- (5) Bai, L.; Liu, L.; Esquivel, M.; Tardy, B. L.; Huan, S.; Niu, X.; Liu, S.; Yang, G.; Fan, Y.; Rojas, O. J. Nanochitin: Chemistry, Structure, Assembly, and Applications. *Chem Rev* **2022**, *122* (13) 11604-11674. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00125>.
- (6) Nguyen, T.-D.; Shopsowitz, K. E.; MacLachlan, M. J. Mesoporous Silica and Organosilica Films Templated by Nanocrystalline Chitin. *Chemistry - A European Journal* **2013**, *19* (45) 151148-15154. <https://doi.org/10.1002/chem.201301929>.
- (7) Nguyen, T.-D.; Peres, B. U.; Carvalho, R. M.; MacLachlan, M. J. Photonic Hydrogels from Chiral Nematic Mesoporous Chitosan Nanofibril Assemblies. *Adv Funct Mater* **2016**, *26* (17) 2875-2881. <https://doi.org/10.1002/adfm.201505032>.
- (8) Lizundia, E.; Luzi, F.; Puglia, D. Organic Waste Valorisation towards Circular and Sustainable Biocomposites. *Green Chemistry* **2022**, *24* (14) 5429-5459. <https://doi.org/10.1039/D2GC01668K>.
- (9) Fazli Wan Nawawi, W. M.; Lee, K.-Y.; Kontturi, E.; Murphy, R. J.; Bismarck, A. Chitin Nanopaper from Mushroom Extract: Natural Composite of Nanofibers and Glucan from a Single Biobased Source. *ACS Sustain Chem Eng* **2019**, *7* (7) 6492-6496. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00721>.
- (10) Nawawi, W. M. F. B. W.; Jones, M.; Murphy, R. J.; Lee, K.-Y.; Kontturi, E.; Bismarck, A. Nanomaterials Derived from Fungal Sources—Is It the New Hype? *Biomacromolecules* **2020**, *21* (1) 30-55. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01141>.
- (11) Berroci, M.; Vallejo, C.; Lizundia, E. Environmental Impact Assessment of Chitin Nanofibril and Nanocrystal Isolation from Fungi, Shrimp Shells, and Crab Shells. *ACS Sustain Chem Eng* **2022**, *10* (43) 14280-14293. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c04417>.
- (12) Lizundia, E.; Meaurio, E.; Vilas, J. L. Grafting of Cellulose Nanocrystals. In *Multifunctional Polymeric Nanocomposites Based on Cellulosic Reinforcements*; Elsevier, 2016 61-113. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44248-0.00003-1>.

- (13) Aggarwal, R.; Garg, A. K.; Saini, D.; Sonkar, S. K.; Sonker, A. K.; Westman, G. Cellulose Nanocrystals Derived from Microcrystalline Cellulose for Selective Removal of Janus Green Azo Dye. *Ind Eng Chem Res* **2023**, *62* (1) 649-659. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03365>.
- (14) *European Platform of Life Cycle Assessment (LCA)*. <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm> (accedido 2022-12-10).
- (15) Muralikrishna, I. v.; Manickam, V. Life Cycle Assessment. In *Environmental Management*; Elsevier, 2017 57-75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>.
- (16) *Conciencia Eco*. www.concienciaeco.com (accedido 2022-12-10).
- (17) *EUR-Lex, Acceso al derecho de la UE*. <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/end-of-life-vehicles.html> (accedido 2023-01-13).
- (18) *Tecnia*, *Noticias*. <https://www.tecnia.com/noticias/mercedes-benz-plan-de-descarbonizacion-planta-vitoria-gasteiz> (accedido 2023-01-13).
- (19) *Tecnia*, *Tecnología*. <https://www.tecnia.com/tecnologias/tecnologias-de-valorizacion-de-residuos> (accedido 2023-01-13).
- (20) *Environdec, El sistema internacional de EDP*. <https://www.environdec.com/home> (accedido 2023-01-13).
- (21) *Ecochain, Huella ambiental del producto (PEF): una descripción completa*. <https://ecochain.com/knowledge/product-environmental-footprint/> (accedido 2023-01-13).
- (22) *Euskadi.eus, Medio ambiente*. https://www.euskadi.eus/web01-a2inguru/es/contenidos/noticia/lideres_g_gr/es_orona/grupo_orona.html (accedido 2023-01-13).
- (23) *La Fundación*. <https://www.lafundacion.com/blog/entrevista-orona-medio-ambiente/> (accedido 2023-01-13).
- (24) Jacob-Lopes, E.; Zepka, L. Q.; Deprá, M. C. Fundamentals of Life Cycle Assessment: Definitions, Terminology, and Concepts. In *Sustainability Metrics and Indicators of Environmental Impact*; Elsevier, 2021 7-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823411-2.00010-4>.
- (25) Iturrondobeitia, M.; Akizu-Gardoki, O.; Minguez, R.; Lizundia, E. Environmental Impact Analysis of Aprotic Li–O₂ Batteries Based on Life Cycle Assessment. *ACS Sustain Chem Eng* **2021**, *9* (20) 7139-7153. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01554>.
- (26) *Economía Circular, Ingurumen Hobekuntza*. <http://www.ihobe.eus/economia-circular#conceptos%circular-thinking> (accedido 2022-12-10).
- (27) Fazli Wan Nawawi, W. M.; Lee, K.-Y.; Kontturi, E.; Murphy, R. J.; Bismarck, A. Chitin Nanopaper from Mushroom Extract: Natural Composite of Nanofibers and Glucan from a Single Biobased Source. *ACS Sustain Chem Eng* **2019**, *7* (7) 6492-6496. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00721>.

- (28) Goodrich, J. D.; Winter, W. T. α -Chitin Nanocrystals Prepared from Shrimp Shells and Their Specific Surface Area Measurement. *Biomacromolecules* **2007**, *8* (1) 252-257. <https://doi.org/10.1021/bm0603589>.
- (29) Narkevicius, A.; Steiner, L. M.; Parker, R. M.; Ogawa, Y.; Frka-Petesic, B.; Vignolini, S. Controlling the Self-Assembly Behavior of Aqueous Chitin Nanocrystal Suspensions. *Biomacromolecules* **2019**, *20* (7) 2830-2838. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00589>.
- (30) Nguyen, T.-D.; Shopsowitz, K. E.; MacLachlan, M. J. Mesoporous Silica and Organosilica Films Templated by Nanocrystalline Chitin. *Chemistry - A European Journal* **2013**, *19* (45) 15148-15154. <https://doi.org/10.1002/chem.201301929>.
- (31) Lizundia, E.; Vilas, J. L.; León, L. M. Crystallization, Structural Relaxation and Thermal Degradation in Poly(l-Lactide)/Cellulose Nanocrystal Renewable Nanocomposites. *Carbohydr Polym* **2015**, *123* 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.01.054>.
- (32) *Arctiko, Congelador de laboratorio*. www.arctiko.com (accedido 2022-12-10).
- (33) *Labbox.eu, Digital Magnetic Stirrer*. <https://labbox.eu/product/digital-magnetic-stirrer-with-heating-and-glass-ceramic-plate-lbx-h20sqc-series-10-l/> (accedido 2022-12-10).
- (34) *Templab, Centrifugadora Refrigeradora*. http://www.templab.pro/wp-content/uploads/2016/04/CR-22N_TL-.pdf (accedido 2022-12-10).
- (35) *Dimoba Suministros, Triturador*. <https://www.dimobasuministros.com/triturador-dynamic-mx2000.html> (accedido 2022-12-10).
- (36) Yonglekang, Light Roll Ball Mill.
- (37) Labbox, Digital Overhead Stirrer.
- (38) *Newegg, Bomba de Vacío*. <https://www.newegg.com/global/sa-en/p/334-011Z-000F4> (accedido 2022-12-10).
- (39) *Inycom, Gerhardt, Hydrolisis Device*. <https://www.inycom.es/sites/default/files/productos-tienda-pdf/catalogo-accesorios-hydrotherm-gerhardt-en.pdf> (accedido 2022-12-10).
- (40) *AxFlow, APV Gaulin*. <https://www.axflow.com/es-es/catalogar/productos/homogenizers/process-homogenizers/apv-gaulin-homogeniser> (accedido 2022-12-10).
- (41) *Sonics, VCX Tip Sonicator*. sonics.com/site/assets/files/1167/vcx_1500.pdf (accedido 2022-12-10).
- (42) *Alibaba.com, Mezclador*. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Larksci-Cosmetic-Blender-Mixer-High-Shear-1600082802571.html> (accedido 2022-12-10).
- (43) *OI Analytical, Hydrotherm Gerhardt*. <https://www.oico.com/File%20Library/Resource%20Library/Brochures%20and%20Catalogs/43091021---HYDROTHERM-Data-Sheet.pdf> (accedido 2022-12-10).

- (44) *ProfiShop, Placa Calefactora*. https://www.profishop.es/placa-calefactora-gestigkeit-1800-w-230-v-mx-370-c-hd-0?number=GT0-125&gclid=Cj0KCQjw-JyUBhCuARIsANUqQ_KmupR93KbQXpLXxRd97YI95p-RB1C0_lk7_GrX50VBT5JlsdxkEdcaAkd_EALw_wcB (accedido 2022-12-10).

11. Anexos

11.1 Proceso 1

Obtención de nanofibrillas de quitina a partir de hongos considerando 1 kg de *Agaricus Bisporus* como material de origen y un rendimiento del 20.2 % (rendimiento medio entre el 25.4 % para el tallo y el 15.0 % para el sombrero)²⁷

1. Congelado

Se congela inicialmente 1 kg de *Agaricus Bisporus* durante 10 h. Considerando una potencia de 370 W, se necesita un consumo del 75 % del máximo, 2.8 kWh.³²

2. Descongelación

Para descongelar la muestra se utiliza 1 L de agua desionizada, bañando los hongos por 5 min. El procedimiento se repite dos veces, consumiendo 2 L de agua.

3. Triturado

A continuación, la muestra se licúa durante 10 min con una licuadora de 800 W, que teniendo en consideración que se trabaja al 75 % del máximo, supone un consumo energético de 100 Wh.

4. Baño en agua caliente

Se realiza un baño a 85 °C durante 30 min para eliminar los componentes hidrosolubles. Para ello se añade agua desionizada hasta obtener un volumen total de 3 L. La electricidad requerida es de 386.25 Wh, debido al uso de un agitador magnético y un baño calefactor (1030 W de potencia).

5. Centrifugado

La mezcla se centrifuga a 7000 rpm durante 15 min para eliminar el agua residual. Para ello, utilizando una centrifugadora de 6900 W de potencia y 6 L de capacidad, el consumo energético asociado al 75 % del total es de 1.3 kWh.

6. Tratamiento alcalino

La mezcla se somete a un tratamiento alcalino para eliminar proteínas, lípidos y polisacáridos alcalino solubles. Se utilizan aproximadamente 2 L de hidróxido de sodio (NaOH) 1[M] (80 g de NaOH), y la mezcla se calienta a 65 °C durante 3 h, consumiendo 3.1 kWh. El dispositivo utilizado es el LBX H20SQC.³³

7. Neutralización y centrifugado

Se añaden 5 L de agua y se realiza un paso de centrifugado similar al anterior para eliminar el NaOH. El consumo de energía es de 1.3 kWh. El equipo utilizado es una centrifuga refrigeradora modelo CR22N, Hitachi Koki con una capacidad de 6 L.³⁴

8. Resuspensión

Se resuspende la mezcla hasta conseguir que sea una solución 0.8 % ($\frac{w}{v}$). Para ello, la cantidad de agua a añadir es de 124.32 L.

9. Triturado

Finalmente, la mezcla se bate durante 10 min. El equipo utilizado es el modelo Dynamic MX2000, con una potencia de 600 W y una capacidad de 100 L. Para realizar el proceso se requieren 3 pasos, ya que el volumen a tratar considerando un factor de seguridad de duplicación es de 250 L.³⁵ El consumo energético es de 225 Wh.

11.2. Proceso 2

Para obtener nanocristales de quitina a partir de caparazones de camarón considerando 1 kg de caparazón de camarón como material de origen y un rendimiento del 12.5 %:

a- Primer subproceso:

1. Remojo

Las cáscaras de los camarones se sumergen en 20 L de NaOH 0.5 [M] durante 24 h para eliminar las impurezas a temperatura ambiente (400 g de NaOH puro).

2. Lavado

Se utilizan 20 L de agua desionizada. Se filtra la mezcla mediante un Büchner, cuya capacidad es de $20 \frac{l}{min}$, y 60 W de potencia. El consumo energético es, por tanto, de aproximadamente 1 Wh, considerando que se utiliza una potencia del 75 % de la máxima.

3. Secado

La mezcla se seca a 50 °C durante 48 h, consumiendo 72 kWh a un 75 % de la potencia máxima.

4. Molienda

Las cáscaras de los camarones se muelen (para reducir el tamaño de las partículas) durante 15 min usando 20 L de agua DI. El consumo de energía es de 281 Wh al 75 % de la potencia máxima considerando el modelo YLK-S-50L.³⁶

5. Desmineralización

Para este proceso de desmineralización se requieren 20 L de solución de HCl 0.25 [M] (182.3 g de HCl puro). La energía utilizada para el proceso es de 74 Wh, correspondiendo esta energía a la agitación de la mezcla, mediante el uso de un agitador de cabeza digital con un consumo de energía de 130 W. El proceso se realiza a temperatura ambiente, y el tiempo necesario para el proceso es de 45 min.³⁷

6. Filtrado

Se utiliza un filtrador a vacío tipo Büchner, con una capacidad de $20 \frac{l}{min}$, y 60 W de potencia.³⁸ Se utilizan 10 L de agua DI con un consumo de energía de 2 Wh al 75 % de la producción.

7. Desproteínización

El proceso se repite 3 veces. Se añaden 20 L de NaOH 2.5 [M] (2 kg de NaOH cada vez), trabajando con 19.27 L de agua desionizada y 1.54 kg de NaOH a una temperatura de 80 °C durante 6 horas, consumiendo 18,52 kWh. El

dispositivo utilizado para este proceso es el agitador magnético Labbox modelo LBX H20SQC, con una potencia de 1030 W y una capacidad de 10 L. Para realizar este paso se necesitan 4 etapas.³³

8. Filtrado

El proceso de filtrado también se repite 3 veces. Se utiliza nuevamente un filtro de vacío tipo Büchner con un consumo de energía de 1 Wh (considerando el 75 % del máximo). Se añaden 10 L de agua desionizada.

9. Filtrado

Se lleva a cabo un paso de filtrado adicional. Para ello se requiere 1 L de acetona y 1 L de etanol.

10. Secado

La muestra se seca a 40 °C para eliminar toda el agua restante. Este consume 72 kWh al 75 % de la potencia máxima.

b- Segundo subproceso:

11. Hidrólisis

En este punto la muestra está formada por polvo de quitina que se utiliza en el proceso de hidrólisis.

El proceso de hidrólisis consiste en 20 L de solución ácida 3 [M] (2.187 kg de HCl y 18.63 L de agua) a 90 °C durante 15 min con agitación constante. Este proceso se realiza tres veces y se lleva a cabo en una unidad Gerhardt de hidrólisis automática Hydrotherm con 2800 W de potencia durante 15 min, consumiendo un total de 3.15 kWh de energía al 75 % de la potencia máxima.³⁹

12. Centrifugado

Este proceso se repite 3 veces, y para cada una de ellas, la centrifugación requiere 15 min. Por tanto, se consume un 1.3 kWh en cada etapa.

13. Resuspensión

Se añaden 1.5 L de agua a la mezcla.

14. Diálisis

La diálisis de la quitina se lleva a cabo para eliminar las moléculas no deseadas de la dispersión. Como las moléculas grandes no pueden pasar a través de los poros de las membranas de diálisis, la quitina permanece dentro de las bolsas de diálisis, mientras que las moléculas pequeñas se difunden libremente a través de la membrana hacia el medio exterior. Para ello, la suspensión de quitina a una concentración del 2 % en peso se dializa contra agua destilada utilizando membranas de diálisis de celulosa regenerada durante 48 h. El agua se reemplaza cada 12 h. Teniendo en cuenta la cantidad de nanoquitina extraída,

la cantidad de agua requerida es: 6.25 L de suspensión de nanoquitina al 2 % en peso, que requiere ser cinco veces el agua en el tanque para diálisis, constando de 4 etapas, es decir, 125 L de agua.

15. Licuado

A continuación, la muestra se bate durante 10 min con una batidora de 800 W de potencia, consumiendo el 75 %, 100 Wh.

16. Dispersión

La muestra se vuelve a dispersar mediante la adición de 5 L de agua.

17. Tratamiento mecánico

Para este tratamiento mecánico se utiliza un Homogeneizador APV Gaulin, requiriendo un consumo energético de 1.63 kWh al 75 %.⁴⁰

18. Redispersión

Finalmente, la muestra se vuelve a dispersar en 5 L de agua.

11.3. Proceso 3

Para el proceso de obtención de nanocristales de quitina a partir de polvo de quitina considerando 1 kg de polvo de quitina como material de partida y un rendimiento del 76 %:²⁹

1. Desproteización

Se trata 1 kg de quitina en polvo. Para ello, se añade a la solución de quitina, NaOH al 5% en peso y borohidruro de sodio (NaBH₄) al 0.3 % en peso, en una proporción de 1:20 (1 kg de NaOH puro y 60 g de NaBH₄ puro). Este proceso, mediante el cual se eliminan las proteínas, que representan el 22.07 % de la masa inicial, se repite 3 veces

El dispositivo utilizado debe mantener el coeficiente de seguridad de 2, para garantizar el correcto cumplimiento del proceso. Por tanto, se necesita un depósito que permita una capacidad de 46 L.

Se utiliza un agitador magnético con una capacidad de 10 L. Se requieren 6 etapas a 80 °C para completar el proceso. La potencia consumida por este dispositivo es de 1030 W, por lo que la electricidad consumida será de 13.91 kWh, siendo el tiempo necesario de 3 h.³³

2. Temple (*Quenching*)

La reacción se diluye con un volumen de agua 10 veces el de la muestra, es decir, 230 L.

3. Centrifugado

La mezcla se centrifuga a una velocidad de 20000 g, durante 15 min a una temperatura de 4 °C, para lo cual se utiliza una centrifugadora-frigorífico modelo CR22N, hitachi koki de 6 L de capacidad.

Por tanto, el proceso se tendrá que realizar en 8 etapas, ya que el volumen a centrifugar es de 46 L, y queremos mantener el factor de seguridad. La potencia de este dispositivo es de 6900 W, por lo que el consumo eléctrico será de 13.8 kWh, considerando las 8 etapas, y el tiempo requerido de 15 min. De nuevo, el consumo eléctrico se estimará en el 75 % del máximo, 10.35 kWh.³⁴

Por medio de este proceso, se eliminan $\frac{3}{4}$ de la cantidad total de agua, 13.8 kg, quedando para la etapa siguiente 4.6 kg.

4. Resuspensión

Para este proceso de resuspensión se utilizan 20 L de agua. La energía consumida es la correspondiente al mezclado, el cual se indica que está presente en todas las etapas de purificación.

Para ello se utilizará nuevamente el agitador magnético mencionado anteriormente, consumiendo 1.59 kWh. (una sola etapa de mezclado, potencia de 530 W y 3 h de duración) que al 75 % suponen 1.2 kWh.

5. Blanqueamiento

Con una proporción de solución de quitina a clorito de sodio (NaClO_2) de 1:15, la concentración de NaClO_2 es 0.3 % en peso. A partir de 1 kg de quitina, la masa de solución será de 15 kg y la de NaClO_2 en consecuencia (40 g).

Asimismo, para la etapa de blanqueo, se especifica que es necesaria la adición de ácido acético (AcOH) hasta que el pH sea 3. Esto da como resultado 0.044 L de AcOH , o 0.0462 kg de AcOH .

En cuanto a la energía eléctrica consumida en el blanqueo, se calcula de igual forma, 1.59 kWh, y al 75 %, 1.2 kWh.

Además, se necesita energía para la agitación, se realizan 4 etapas con un agitador magnético de 10 L de capacidad y 1030 W de potencia, consumiendo un total de 9.27 kWh considerando un consumo energético del 75 %.

6. Temple (*Quenching*)

Considerando los 16.42 L de solución, se realiza un temple agregando 165 L de agua.

7. Centrifugado

Utilizando la misma centrifugadora que antes, por medio de 6 etapas, durante 30 min, consumiendo (al 75 %), 15.6 kWh. Mediante este proceso se eliminan $\frac{3}{4}$ del volumen de agua y todos los residuos, que son 12.15 kg de agua, quedando en el proceso un total de 4.05 kg de agua.

8. Redispersión

Se usan 5 L de agua.

9. Diálisis

Como se ha explicado previamente, la diálisis de la quitina se lleva a cabo para eliminar las moléculas no deseadas de la dispersión. Para ello, la suspensión de quitina a una concentración del 2 % en peso se dializa contra agua destilada utilizando membranas de diálisis de celulosa regenerada durante 48 h. El agua se reemplaza cada 12 h. Teniendo en cuenta la cantidad de nanoquitina extraída, la cantidad de agua requerida es: 6,25 L de suspensión de nanoquitina al 2 % en peso que requiere cinco veces el agua en el tanque para diálisis, con 4 etapas, es decir, 760 L de agua. Este proceso se repite dos veces.

10. Calentamiento y reflujo

Se necesitan 9 kg de HCl 4 [M] (1.31 kg de HCl puro). Se aplica calentamiento durante 540 min a 70 °C bajo reflujo. Para llevar a cabo este proceso se tienen 19.3 L de mezcla, se necesitan 4 etapas con el agitador magnético utilizado anteriormente durante 540 min, consumiendo un total de 27.81 kWh (al 75 % de potencia).

11. Temple

Se añaden 60 L de agua.

12. Centrifugado

Se procede a centrifugar la mezcla utilizando la misma centrifugadora que antes, con 7 etapas durante 30 min, consumiendo al 75 %, 18.1 kWh. Mediante este proceso se eliminan las $\frac{3}{4}$ partes del volumen de agua y todos los residuos, que son 14.5 kg de agua, quedando en el proceso un total de 4.8 kg de agua.

13. Diálisis

La fase de diálisis se repite, consumiendo de nuevo 760 L de agua.

14. Ultrasonidos

Implica someter a ultrasonidos la dispersión en etapas de 100 mL. El equipo utilizado es VCX 1500 HV con un consumo máximo de potencia de 2500 W. La energía necesaria al 75 % de la potencia es, por tanto, de 41.56 kWh.⁴¹

11.4. Proceso 4

1. Desproteínización

En este primer paso se añaden 20 L de NaOH al 5 % (20.07 kg de agua desionizada y 1.06 kg de NaOH). Para completar este proceso se utiliza un agitador mecánico con un consumo de energía de 1030 W Labbox modelo LBX H20SQC.³³

Para llevar a cabo el proceso se requieren 6 etapas, ya que la capacidad es de 10 L y el volumen a tratar es de 30 L. Además, se requiere un factor de seguridad de 2. La duración del proceso es de 6 h, por lo que el consumo eléctrico es de 27.8 kWh, teniendo en cuenta que se considera un 75 % de la potencia máxima.

2. Lavado

Se utilizan 10 L de agua desionizada. Se lleva a cabo la filtración con un filtrador a vacío tipo Buchner, con una capacidad de $20 \frac{l}{min}$, y un consumo eléctrico de 60 W. La electricidad consumida es por tanto de 2.5 Wh aproximadamente, considerando que se utiliza el 75 % de la potencia máxima.

3. Desmineralización

Se añaden 20 L de HCl 7 % en volumen (1.4 L o 2.086 kg de HCl puro). La energía utilizada para el proceso es de 9.4 kWh, ya que el dispositivo utilizado es un agitador de cabeza (proceso a temperatura ambiente) con un consumo eléctrico de 130 W y una capacidad de 40 L. El tiempo necesario para el proceso es de 4 días.

4. Lavado

De nuevo, se usan 20 L de NaOH 5 % en peso (1.06 kg de NaOH puro). El consumo energético es de aproximadamente 3 Wh.

5. Despigmentación

Para eliminar el pigmento residual, 20 L de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) 5 % en volumen se añade a la muestra (1.7 kg de H₂O₂ puro). La mezcla se calienta hasta alcanzar los 90 °C, y se agita durante 1 h en el agitador magnético de 1030 W comentado anteriormente. La capacidad de este dispositivo es de 10 L, por lo que se requieren 6 etapas con un consumo de 4.7 kWh.

6. Lavado

De nuevo, se usan 20 L de NaOH 5 % en peso (1.06 kg de NaOH puro). El consumo energético es de aproximadamente 3 Wh.

7. Secado

La muestra se seca a 40 °C durante 16 h con el horno modelo Carbolite Gero Apex AX120 de 2000 W, con un consumo de 24 kWh.

8. Desmineralización

La muestra se trata con 2.6 L de HCl 4 [M] (379.2 g de HCl puro). El proceso se completa en 10 h a 104 °C, y el dispositivo utilizado es el agitador magnético mencionado anteriormente, con un consumo de 7.7 kWh.

9. Decoloración

Se añaden 130 mL de H₂O₂ 30 % en volumen durante los últimos 30 min de la fase de desmineralización (56.5 g de H₂O₂ puro).

10. Dilución

La mezcla se diluye hasta duplicar el volumen, agregando así 2.86 L.

11. Centrifugado

Para eliminar aproximadamente el 80 % del aporte líquido a la muestra, se realiza un proceso de centrifugación de 15 min a 2200 rpm. El equipo utilizado es la centrifugadora modelo CR22N, hitachi koki con una capacidad de 6 L con un consumo de potencia de 6900 W. El volumen tratado es de aproximadamente 5.8 L, como previamente se ha explicado, por lo que se requieren 2 etapas. La electricidad consumida es de 2.6 kWh.

12. Diálisis

Teniendo en cuenta la cantidad de nanoquitina extraída, la cantidad de agua requerida es: 4.85 L de suspensión de nanoquitina al 2 % en peso que requiere cinco veces el agua en el tanque para diálisis, con 4 etapas, es decir, 97 L de agua.

13. Tratamiento ultrasónico

En este proceso se utiliza el Limpiador Ultrasónico ZORTRAX, el cual tiene un consumo de potencia de 120 W. Para realizar esta última fase se requiere 1 h, consumiendo 90 Wh.

11.5. Proceso 5

1. Remojo

El polvo de celulosa microcristalina se empapa en acetona acuosa al 90 % en peso durante 24 h para eliminar las impurezas utilizando una relación sólido a líquido de 1:20.

De estos 16.1 kg de acetona acuosa, el 10 % es agua (1.61 kg de agua) y el 90 % de acetona (14.5 kg de acetona).

El dispositivo utilizado es una batidora industrial, con 500 W de potencia. La energía requerida es de 12 kWh. A una salida del 75 %, 9 kWh.⁴²

2. Lavado y filtrado

El lavado y filtrado se realizan con 47 L de agua.

Durante el lavado y filtrado se utiliza un filtro de vacío tipo Buchner, con una capacidad de flujo de $20 \frac{l}{min}$ de 60 W.³⁸

$$E = 47 L \frac{\frac{1 min}{20 L}}{\frac{60 min}{1 h}} 60 W = 2.35 Wh \text{ al } 75 \% \text{ del máximo, } 1.76 Wh.$$

3. Hidrólisis y mezclado

El proceso de hidrólisis consiste en una solución de ácido sulfúrico al 64 % ($\frac{w}{w}$) a 45 °C durante 30 min con agitación constante. La masa total es la suma de la masa de ácido y agua. Resultando en 8.35 kg de ácido sulfúrico puro y 4.71 kg de agua.

El dispositivo utilizado se llama Hydrotherm Gerhardt por 30 min, con 2800 W de potencia, y la energía requerida es de 1400 Wh.⁴³

Para el proceso de agitación, la dispersión se calienta a 45 °C con una placa calefactora de 1800 W de potencia. La energía requerida es de 900 Wh.⁴⁴

Inmediatamente después del calentamiento, la muestra se mezcla utilizando una batidora industrial de 500 W de potencia. La energía requerida es de 250 Wh.⁴²

La energía total requerida para este proceso al 75 % de la producción es de 1.91 kWh.

4. Temple

La reacción se diluye en una cantidad de agua 10 veces superior a la de la mezcla, es decir, 200 L.

5. Centrifugado

La mezcla se centrifuga durante 15 min a 4000 rpm para concentrar la celulosa restante y eliminar el exceso de ácido acuoso. Entran a la centrifugadora 20 L de solución. El equipo utilizado es una centrifugadora refrigeradora modelo CR22N, Hitachi Koki con una capacidad de 6 L y un consumo de potencia de 6900 W. Se

requieren 4 etapas en volúmenes de 6 L. Entonces, la energía requerida a una salida del 75 % es de 5.17 kWh. De la centrífuga salen 15 L de agua residual junto con celulosa soluble en ácido y ácido sulfúrico, quedando 5 L de agua.³⁴

6. Ultrasonidos

De este proceso se obtiene celulosa coloidal. Implica tratar 100 mL de dispersión acuosa de celulosa, requiriendo 70 etapas de 100 mL cada una para completar el proceso. El equipo utilizado es VCX 1500 HV con un consumo máximo de potencia de 2500 W. La energía necesaria (al 75 %) es por tanto de 11 kWh.⁴¹

7. Diálisis

Teniendo en cuenta la cantidad de nanoquitina extraída, la cantidad de agua requerida es: 13,25 L de suspensión de nanocelulosa al 2 % en peso que requiere cinco veces el agua en el tanque para diálisis, con 4 pasos de intercambio, es decir, 260 L de agua.