



## Tesis Doctoral

# ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE TAPONES DE CORCHO PARA UTILIZACIÓN COMO CIERRE PARA VINO TRANQUILO

Autor:

**Francisco Javier Flor Montalvo**

Directores:

**Dr. Juan Ignacio Latorre Biel**

**Dr. Emilio Jiménez Macías**

## Compendio de publicaciones

La memoria de la presente tesis doctoral se presenta en la modalidad de compendio de artículos publicados en revistas científicas internacionales con revisión por pares e indexadas en el Journal Citations Reports (JCR). Las referencias completas de los artículos publicados que constituyen el cuerpo de la tesis son las siguientes:

**Publicación 1:** Flor-Montalvo, F.J., Martínez-Cámara, E., García-Alcaraz, J.L., (...), Latorre-Biel, J.-I., Blanco-Fernández, J. Environmental Impact Analysis of Natural Cork Stopper Manufacturing. Agriculture (Switzerland), 2022. 12(5): 636. DOI: 10.3390/agriculture12050636

**Publicación 2:** Flor-Montalvo, F.J., Ledesma, A.S.-T., Cámara, E.M., (...), García-Alcaraz, J.L., Blanco-Fernandez, J. 2-piece cork stoppers as alternative for valorization of thin cork planks: Analysis by LCA methodology. Foods, 2021. 10(4): 873. DOI: 10.3390/foods10040873

**Autorización de los directores** para la presentación de la tesis "Estudio comparativo de diferentes tipologías de tapones de corcho para utilización como cierre para vino tranquilo" en la modalidad de compendio de publicaciones.

Vº Bº de los directores de la tesis



Fdo: Juan Ignacio Latorre Biel



Fdo: Emilio Jiménez Macías

**TÍTULO:** Estudio comparativo de diferentes tipologías de tapones de corcho para utilización como cierre para vino tranquilo

Programa de doctorado en ciencias y tecnologías industriales.

Línea de investigación en tecnologías energéticas y químicas industriales

**DOCTORANDO:** Francisco Javier Flor Montalvo

**DIRECTORES:** Dr. Juan Ignacio Latorre Biel

Dr. Emilio Jiménez Macías

*A Noelia, Gabriel, Miguel,  
a mis padres y mi hermana*

## AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos años de intenso trabajo, se ha desarrollado esta tesis para lo cual ha resultado imprescindible el apoyo de muchas personas y organizaciones que han colaborado de forma crítica, en el acceso a los procesos, la obtención de datos o su comprensión y procesado.

En primer lugar, deseo agradecer a mis directores de tesis, Dr. Juan Ignacio Latorre Biel y Dr. Emilio Jiménez Macías por la confianza que depositaron en mí así como por su apoyo técnico y moral sin cuya tutela, no habría sido posible acometer esta investigación.

También a la Universidad Pública de Navarra por permitir que desarrollase esta investigación bajo su tutela.

Junto con ellos, resulta imprescindible agradecer la constante ayuda del Dr. Julio Blanco Fernández, la Dra. Mercedes Pérez de la Parte, el Dr. Jorge Luis García Alcázar y el Dr. Eduardo Martínez Cámara, cuya colaboración ha sido fundamental para el desarrollo, comprensión, tratamiento y procesado de datos y documentos.

Deseo agradecer a Double Cork SLU, a Espadans Cork S.L. y a Corktansa, S.U.L. por haberme abierto las puertas de su casa y permitido aprender y experimentar sobre los procesos de fabricación de corcho existentes.

Son muchos otros los partícipes de esta tesis a los que debo agradecer su apoyo y colaboración y para los que guardaré un sitio especial en mi recuerdo.

Por último, deseo especialmente agradecer el apoyo y el cariño de mi mujer Noelia, de mis hijos Gabriel y Miguel, de mis padres Juan y Marisa y de mi hermana María Eugenia, que me han dado ánimos y han estado a mi lado en los buenos y malos momentos y son los cuales, este proceso habría sido poco menos que imposible de acometer.

## Resumen

El uso de tapones de corcho ha estado ligado a lo largo de la historia, a la producción vinícola. Sus cualidades únicas y diferenciales, no han podido ser emuladas por otros materiales. Sin embargo, la escasez de materia prima junto con el incremento de la demanda de tapones, ha hecho que en los últimos años, otras alternativas hayan surgido entre las que nuevos cierres (tapón corona, screwcap,...) así como nuevos materiales (sintéticos) o derivados del corcho (tapón aglomerado, microgranulado y tapon técnico). La presente tesis doctoral busca cubrir la carencia en el estudio del impacto generado por la actividad de fabricación de tapones de corcho natural, en sus diferentes geometrías y tecnologías de fabricación. De esta forma, se ha realizado una toma de datos directa en diversas fábricas de producción e tapones naturales y se ha realizado un análisis de ciclo de vida (ACV) para, de forma comparativa, conocer los impactos asociados a cada una de las tipologías comercializadas de tapón de corcho natural. Asimismo, se ha analizado los límites de los tratamientos de higienización y limpieza aromática habitualmente usados en la industria con el objeto de determinar el impacto de los mismos, tanto en el porcentaje de rechazo de tapones y en la calidad de los mismo, como sobre los consumos e impactos ambientales asociados a la producción de tapones con estas tecnologías. Como principales resultados, se ha detectado que los sistemas de producción tradicionales, tienen un menor impacto derivado de la producción unitaria de tapones. Esto se debe principalmente al mayor rendimiento por kg de materia prima obtenido por estos procesos. Por otro lado, los sistemas de producción de tapón de una pieza, si bien ofrecen calidades medias tanto visuales como mecánicas muy inferiores a las obtenidas para tapones de dos piezas, al ofrecer un mayor rendimiento de producción unitario, también implican un menor impacto ambiental derivado de la producción unitaria. Debemos resaltar, que la diferencia en la producción entre los tapones de una y dos piezas, radica fundamentalmente en la presencia de dos “espaldas” y dos “barrigas (cortezas exteriores e interiores respectivamente, del alcorcho), que deben ser eliminadas para obtener un tapón, siendo de esta manera el residuo en estas fases muy superior en el caso de la fabricación e tapones de 2 piezas. En todo caso, puesto que la fase que mayores impactos supone es aquella dedicada al preprocesado del corcho (y muy especialmente al proceso de cocido y hervido del

mismo) y puesto que este proceso es común para todo proceso de fabricación, las diferencias entre procesos son relativamente pequeñas.

**Palabras clave:** tapón, corcho, cierre para vino tranquilo, vinos de crianza, impacto ambiental, análisis del ciclo de vida



## Abstract

The use of cork stoppers has been linked throughout history to wine production. Its unique and differential qualities have not been emulated by other materials. However, the scarcity of raw material together with the increase in the demand for stoppers, has led to the emergence of other alternatives in recent years, among which new closures (crown cork, screwcap,...) as well as new materials (synthetic) or cork derivatives (agglomerated, microgranulated and technical cork). This doctoral thesis seeks to fill the gap in the study of the impact generated by the manufacturing activity of natural cork stoppers, in its different geometries and manufacturing technologies. In this way, a direct data collection has been carried out in several natural cork stopper production factories and a life cycle analysis (LCA) has been performed in order to, in a comparative way, know the impacts associated with each of the commercialized types of natural cork stoppers. Likewise, the limits of the sanitization and aromatic cleaning treatments commonly used in the industry have been analyzed in order to determine their impact, both on the percentage of rejection of stoppers and on their quality, and on the consumption and environmental impacts associated with the production of stoppers with these technologies. As main results, it has been detected that the traditional production systems have a lower impact derived from the unit production of stoppers. This is mainly due to the higher yield per kg of raw material obtained by these processes. On the other hand, the one-piece closure production systems, although they offer average visual and mechanical qualities that are much lower than those obtained for two-piece closures, by offering a higher unit production yield, also imply a lower environmental impact derived from unit production. It should be emphasized that the difference in production between one-piece and two-piece corks lies fundamentally in the presence of two "backs" and two "bellies" (outer and inner bark, respectively, of the cork oak), which must be eliminated to obtain a cork, and thus the waste in these phases is much higher in the case of the manufacture of two-piece corks. In any case, since the phase with the greatest impact is the one dedicated to the pre-processing of the cork (and especially the boiling and boiling process) and since this process is common to all manufacturing processes, the differences between processes are relatively small.

**Key words:** Tap, cork, wine closures, wine aging, environmental impacts, life cycle analysis



## Tesis Doctoral

# ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE TAPONES DE CORCHO PARA UTILIZACIÓN COMO CIERRE PARA VINO TRANQUILO

Autor:

**Francisco Javier Flor Montalvo**

Directores:

**Dr. Juan Ignacio Latorre Biel**

**Dr. Emilio Jiménez Macías**

## Compendio de publicaciones

La memoria de la presente tesis doctoral se presenta en la modalidad de compendio de artículos publicados en revistas científicas internacionales con revisión por pares e indexadas en el Journal Citations Reports (JCR). Las referencias completas de los artículos publicados que constituyen el cuerpo de la tesis son las siguientes:

**Publicación 1:** Flor-Montalvo, F.J., Martínez-Cámara, E., García-Alcaraz, J.L., (...), Latorre-Biel, J.-I., Blanco-Fernández, J. Environmental Impact Analysis of Natural Cork Stopper Manufacturing. Agriculture (Switzerland), 2022. 12(5): 636. DOI: 10.3390/agriculture12050636

**Publicación 2:** Flor-Montalvo, F.J., Ledesma, A.S.-T., Cámara, E.M., (...), García-Alcaraz, J.L., Blanco-Fernandez, J. 2-piece cork stoppers as alternative for valorization of thin cork planks: Analysis by LCA methodology. Foods, 2021. 10(4): 873. DOI: 10.3390/foods10040873

**Autorización de los directores** para la presentación de la tesis “Estudio comparativo de diferentes tipologías de tapones de corcho para utilización como cierre para vino tranquilo” en la modalidad de compendio de publicaciones.

Vº Bº de los directores de la tesis

Fdo: Juan Ignacio Latorre Biel

Fdo: Emilio Jiménez Macías

**TÍTULO:** Estudio comparativo de diferentes tipologías de tapones de corcho para utilización como cierre para vino tranquilo

Programa de doctorado en ciencias y tecnologías industriales.

Línea de investigación en tecnologías energéticas y químicas industriales

**DOCTORANDO:** Francisco Javier Flor Montalvo

**DIRECTORES:** Dr. Juan Ignacio Latorre Biel

Dr. Emilio Jiménez Macías

*A Noelia, Gabriel, Miguel,  
a mis padres y mi hermana*

## AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos años de intenso trabajo, se ha desarrollado esta tesis para lo cual ha resultado imprescindible el apoyo de muchas personas y organizaciones que han colaborado de forma crítica, en el acceso a los procesos, la obtención de datos o su comprensión y procesado.

En primer lugar, deseo agradecer a mis directores de tesis, Dr. Juan Ignacio Latorre Biel y Dr. Emilio Jiménez Macías por la confianza que depositaron en mí así como por su apoyo técnico y moral sin cuya tutela, no habría sido posible acometer esta investigación.

También a la Universidad Pública de Navarra por permitir que desarrollase esta investigación bajo su tutela.

Junto con ellos, resulta imprescindible agradecer la constante ayuda del Dr. Julio Blanco Fernández, la Dra. Mercedes Pérez de la Parte, el Dr. Jorge Luis García Alcázar y el Dr. Eduardo Martínez Cámara, cuya colaboración ha sido fundamental para el desarrollo, comprensión, tratamiento y procesado de datos y documentos.

Deseo agradecer a Double Cork SLU, a Espadans Cork S.L. y a Corktansa, S.U.L. por haberme abierto las puertas de su casa y permitido aprender y experimentar sobre los procesos de fabricación de corcho existentes.

Son muchos otros los partícipes de esta tesis a los que debo agradecer su apoyo y colaboración y para los que guardaré un sitio especial en mi recuerdo.

Por último, deseo especialmente agradecer el apoyo y el cariño de mi mujer Noelia, de mis hijos Gabriel y Miguel, de mis padres Juan y Marisa y de mi hermana María Eugenia, que me han dado ánimos y han estado a mi lado en los buenos y malos momentos y son los cuales, este proceso habría sido poco menos que imposible de acometer.



## Resumen

Desde que a finales del siglo XVII Dom Pierre Perignon utilizó tapones de corcho para su champán, la utilización de este material se extendió como cierre tanto para vinos espumosos como para vinos tranquilos. El corcho posee cualidades únicas e inigualables que, hasta el momento, aún no han sido logrados imitar o mejorar entre las que podemos destacar la combinación de ligereza, elasticidad, alto coeficiente de rozamiento, impermeabilidad, alto poder calorífico, bajo contenido en agua, buen aislante térmico pero ante todo, es un material 100% natural, reciclable y renovable, atributos hoy en día imprescindibles para una sociedad comprometida por la reducción de la contaminación y sostenible con el medio ambiente. Es por ello que, a pesar de que en los últimos años han surgido nuevos cierres (tapón corona, screwcap,...) así como nuevos materiales (sintéticos), el corcho sigue ocupando un lugar privilegiado dentro del sector. También los propios tapones de corcho han evolucionado existiendo en la actualidad diferentes granulometrías (tapón natural de una, y dos piezas, tapones aglomerados, microgranulados, tapón 1+1,...) y calidades, influyendo de forma considerable tanto en el coste como en el resultado final del producto. Cada uno de estos productos tiene procesos de fabricación diferentes y distintas fuentes y niveles de aprovechamiento de materias primas, a pesar de estar todos fabricados con corcho. El conocimiento de las características y recursos invertidos en la fabricación de estos tapones se torna necesaria para realizar una adecuada caracterización y selección acorde con las características y tipologías de los vinos para los que serán utilizados.

**Palabras clave:** tapón, corcho, cierre para vino tranquilo, vinos de crianza, impacto ambiental, análisis del ciclo de vida

## Abstract

Since late 17th century Don Pierre Perignon used cork stoppers for his champagne, this material uses as closure were extended for both wines and sparkling wines. Cork has unique and different qualities that, have not yet been imitated or improved, among which we can highlight the combination of lightness, elasticity, high coefficient of friction, impermeability, high calorific value, low water content, good thermal insulation but above all, it is a 100% natural, recyclable and renewable material, witch are today essential attributes for a society committed to reducing pollution and sustainable with the environment. That is why, although new closures have been developed last years (crown cap, screwcap, ...) as well as new materials (synthetic closures), cork is still the most used closure in wine sector. Ccork stoppers have evolved with the developing of different granulometries (natural stopper of one, and two pieces, agglomerated stoppers, microgranulates, stopper 1 + 1, ...) and qualities, influencing considerably both the cost and the final result of the product. Each of these products has different manufacturing processes and different sources and levels of use of raw materials, despite being all manufactured with cork. The knowledge of the characteristics and resources invested in the manufacture of these plugs becomes necessary to carry out an adequate characterization and selection according to the characteristics and typologies of the wines for which they will be used.

**Key words:** Tap, cork, wine closures, wine aging, environmental impacts, life cycle analysis

## ÍNDICE

1. Objetivos .....	6
2. Antecedentes .....	9
3. Metodología de análisis .....	17
3.1. Consideraciones previas .....	17
3.2. Consideraciones previas .....	18
3.3. Metodología para la realización de un proyecto con aporte de ACV.....	20
4. Producción sostenible de tapones de corcho de una pieza .....	33
4.1. Objetivos y alcance.....	33
4.2. Unidad funcional .....	33
4.3. Límites del sistema .....	34
4.4. Asunciones.....	35
4.5. Inventario.....	36
4.6. Inventario.....	38
5. Producción sostenible de tapones de corcho de dos piezas .....	42
5.1. Objetivos y alcance.....	42
5.2. Objetivos y alcance.....	42
5.3. Límites del sistema .....	42
5.5. Inventario.....	45
5.6. Resultados.....	48
6. Conclusiones .....	53
7. Futuras líneas de investigación.....	56
8. Referencias.....	60
9. Publicaciones científicas .....	64

## FIGURAS

Figura 1. Metodología .....	22
Figura 2. Límites del sistema .....	34
Figura 2. Límites del sistema .....	43

## TABLAS

Tabla 1. Metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida. ....	25
Tabla 2 . Impactos Globales .....	39
Tabla 3. Impacto global para cada geometría y metodología productiva, asociada por categorías de impacto.....	49



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

## Tesis doctoral

Programa de doctorado en ciencias y tecnologías industriales.

Línea de investigación en tecnologías energéticas y químicas industriales

“ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE TAPONES DE  
CORCHO PARA UTILIZACIÓN COMO CIERRE PARA VINO TRANQUILO”

SECCIÓN 1 – OBJETO Y ANTECEDENTES DE LA TESIS

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

DIRECTORES DE LA TESIS: DR. Juan Ignacio Latorre Biel

Dr. Emilio Jiménez Macías

DOCTORANDO: Francisco Javier Flor Montalvo

Tudela, Noviembre 2022

# 1. Objeto de la tesis

---

## 1. Objetivos

El presente documento de tesis doctoral está orientado a el estudio de los aspectos medioambientales asociados a la producción de tapones de corcho para el cierre de botellas de vino tranquilo y espumoso así como al análisis de las etapas que componen su ciclo de vida.

De esta forma, se ha realizado a lo largo del desarrollo de la investigación, el análisis del ciclo de vida completo asociado al proceso productivo del corcho, considerando cada una de las fases que lo componen en dos modelos de producto:

- Tapones de corcho natural de una sola pieza.
- Tapones de corcho natural de dos piezas encoladas

Además se han incluidos dos modalidades de fabricación:

- Perforación
- Torneado

Para la realización del estudio se han recogido datos de las instalaciones de cada uno de los procesos objetos de estudio, situadas en La Rioja, España.

En este estudio se ha realizado un modelo de análisis de ciclo de vida (ACV) para cuantificar los impactos ambientales asociado a estos procesos. La identificación y análisis de las entradas y salidas, tanto de materiales como energéticas, de las diferentes actividades involucradas en el proceso productivo, han permitido desarrollar un modelo de ACV completo. Dentro de este ámbito de actuación, esta investigación se plantea con el fin de ampliar y complementar los estudios anteriormente citados.

Además, se analiza la relación entre el aprovechamiento de la plancha de corcho y el impacto ambiental generado en la producción de tapones.



Para la realización del estudio, se han analizado varios lotes para cada tipo de tapón definidos por su diámetro y proceso de producción, en todos los casos con un mismo origen de la plancha de corcho, lo que permite fijar un punto medio de aprovechamientos tipo, garantizando la fiabilidad de los datos y, por lo tanto, la validez de los resultados obtenidos.

Por último, la investigación analiza la valorización de residuos de corcho relacionando producto residual-precio-impacto ambiental.

## 2. Antecedentes

---

## 2. Antecedentes

El corcho es un producto ampliamente utilizado en muy diversos sectores.

Su origen forestal y no leñoso es peculiar, dado que se obtiene de la corteza del árbol denominado Alcornoque (*Quercus suber*), que resulta extraída sin dañar el propio espécimen.

El alcornoque es originario de Europa y del Norte de África, siendo los países con mayor producción de corcho aquellos ubicados en el mar mediterráneo, entre los que se deben destacar Portugal, España, Argelia, Marruecos, Italia, Francia y Túnez [1]. Según el Instituto Nacional de estadística (INE), en España la producción de corcho en 2016 ascendió a 60,431.51 toneladas [2]

El corcho extraído, es clasificado en función de la calidad, espesor y densidad de las planchas (corteza del Alcornoque) que determinarán sus usos en base a su alta elasticidad y peculiares propiedades mecánicas.

De esta forma, se puede encontrar corcho como parte de productos cotidianos como bolsos, paraguas, accesorios de decoración, juegos, objetos acústicos y materiales de aislamiento.

Su peculiar microestructura y su baja densidad lo convierte en un excelente aislante térmico y acústico. También posee una baja permeabilidad a líquidos y gases y unas excelentes durabilidad y estabilidad mecánica [3].

Destacable resulta también su utilización como bioabsorbente siendo también usado en tecnologías ligadas a la absorción de energía espacial.

En todo caso, su uso más conocido es el correspondiente a cierre para botellas de vino.

Si bien durante siglos ha sido el cierre por excelencia para todo tipo de vinos y licores, las exigencias y requisitos de calidad, seguridad y protección medioambiental presentes en todos los alimentos para consumo humano, hacen necesaria la actualización

de las tecnologías y medios de procesado existentes, apareciendo en los últimos años, numerosas alternativas a este tipo de cierres.

En todo caso, la industria del corcho es parte fundamental de la industria vitivinícola y muy especialmente en aquellos vinos con larga crianza y alto valor añadido, puesto que sus características todavía no han podido ser emuladas por otro tipo de cierres.

En el proceso de fabricación de vino, la relevancia del tapón de corcho aparece en la etapa del embotellado, lo cual es debido a su gran elasticidad que permite adaptarse al contorno del cuello de la botella, deformándose y permitiendo su extracción sin rotura. Además de retener el vino en su envase, el tapón de corcho facilita la penetración de una cantidad mínima de oxígeno, teniendo un impacto positivo en el desarrollo del vino [4]. Por ello la calidad del corcho es fundamental, ya que independientemente del varietal, de que se trate de vinos tintos, blancos o rosados, espumosos o tranquilos, de que el vino a conservar sea joven o fruto de una crianza en barrica, siempre se buscará evitar que aparezcan sabores y olores no deseados.

A este respecto, sin ánimo de menospreciar sus características mecánicas particulares y excelentes para el proceso de vinificación y crianza el corcho cuenta también con algunos problemas.

El más destacado y conocido corresponde a la posibilidad de cesiones aromáticas negativas, tales como el Trichloroanisole-TCA [5] o a una excesiva permeabilidad gaseosa que puede derivar en la oxidación del vino y su consiguiente degradación [6].

Por otro lado, al no tratarse de un material inerte y debido a su naturaleza y origen, resulta evidente que se trata de un material heterogéneo. Esto implica que tanto su composición como sus características dependerán de parámetros como el origen, la edad del árbol, la zona del árbol de la que se ha extraído la plancha, el periodo entre extracciones de corcho o la altura de la lámina utilizada respecto de la base, entre otros [7,8].

Si atendemos a las normas alimentarias a las que en la actualidad están sujetas la industria del corcho y la industria vitivinícola destacaremos las Regulaciones Europeas (EC), IFS (International Food Standard), ISO 22000 y BRC (British Retail Consortium). Todas han sido diseñadas como una herramienta para comprobar y verificar la competencia de los fabricantes

de alimentos y para garantizar que todo producto alimentario cumple con los requisitos de seguridad alimentaria.

Resulta evidente que dichas normas suponen un gran avance y garantía para el consumidor en una doble dimensión.

- Por un lado, atendiendo a la dimensión interna, el fabricante se asegura de que dispone de un proceso productivo que garantiza todos los estándares de seguridad alimentaria.
- Por otro lado, atendiendo a la dimensión externa, el consumidor recibe una garantía de que los productos que consume son seguros y que al consumirlos no van a dañar su salud.

Además, hay que sumar que estos estándares son exigidos por ciertas empresas de distribución sin los cuales no se pueden comercializar productos a través de éstas.

Como se ha citado anteriormente, existen numerosos modelos de cierre atendiendo a los materiales utilizados, a la geometría considerada pero también a el proceso de producción.

En función de ello, se determinan diferentes calidades y gamas que en última instancia determinarán su calidad, clase comercial y valor económico.

Entre los más populares destacaremos los tapones técnicos (aglomerados y microgranulados), los tapones naturales colmatados, los multipieza (1+1, 0+2,...) que utilizan arandelas, los de cava y espumosos (caracterizados por su gran diámetro, diferentes modelos comerciales como los ProCork, los T-Cork o Hélix y por último y más importantes, los tapones naturales, que corresponden con aquellos usados durante siglos en la industria.

Los tapones Naturales se obtienen del corte y perforado o torneado de planchas de alcornoque sin otro procesado que no sea mecánico. Es por ello que se los conoce por este nombre, “naturales”, dado que la composición de un tapón es integralmente de corcho, sin presencia de otros materiales.

Por otro lado, existen otras características del corcho natural que también son tomadas en cuenta para determinar su idoneidad como sistemas de tapamiento, entre las que se mencionan el color, densidad, elasticidad, porosidad y la presencia o ausencia de alteraciones [9-11].

En la industria española del corcho, se tienen 9 clases en la categoría natural, las cuales se clasifican comercialmente por observación visual de calidad ampliada (1ª a 9ª), donde intervienen dos atributos: el calibre de la pieza expresada en número de líneas (una línea corresponde a 2.25 mm) y el aspecto (determinado por la presencia de alteraciones). Los tapones de corcho natural también se clasifican en función de sus dimensiones, por ejemplo, los fabricados bajo las normas UNE 56921 tienen medidas de 44 mm x 24 mm, 46 mm x 24 mm, 49 x 24 mm y 54 mm x 24 mm

Los tapones naturales, habitualmente escasos y con un elevado valor económico, son percibidos tanto por bodegas como por consumidores como aquellos de mayor calidad y mejores características. Así, representan la calidad del vino y resaltan el esfuerzo para conservarlo adecuadamente.

A modo ilustrativo, solo las botellas con tapón de corcho natural pueden garantizar la fecha de caducidad del vino, existiendo múltiples estudios que reflejan que utilizar tapones de otros materiales, como por ejemplo materiales poliméricos, no otorgan dicha garantía pudiendo ocasionar en el largo plazo, traspaso al vino de algunos productos orgánicos que pueden suponer un riesgo para la salud [12-14].

Si atendemos al objeto principal de esta tesis, no existen excesivas investigaciones desde el punto de vista de la evaluación de impactos ambientales de los tapones de corcho a través de Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Rives et al. [15] evalúan los impactos ambientales causados por la extracción de corcho en España y realizan un balance de dióxido de carbono en bosques con una vida útil de aproximadamente 200 años. A la vez, estos autores realizan una evaluación impactos ambientales (basada en encuestas a fabricantes) de la producción de tapones de corcho natural [16], granulado [17] o para botellas de cava [17]. Demertzi et al. [18] Realizan un exhaustivo análisis con el fin de evaluar los impactos ambientales derivados de la producción

de tapones de corcho natural en Portugal, además de identificar las etapas y procesos para sugerir acciones de mejora y escenarios alternativos.

En referencia a los tapones de dos piezas, debemos señalar que, si bien el tapón natural es un magnífico cierre para la producción de vinos de crianza y vinos singulares, solamente aquellos tapones de calidades elevadas y habitualmente asociados a vinos de categorías medias y altas son aceptados por el mercado actual.

Existen unas serias limitaciones respecto de la producción de corcho total anual y de su recurrencia que, junto con el desarrollo de nuevos productos sustitutivos tanto de corcho (aglomerado, tapón técnico, microgranulados,..) como de otros materiales (cierres poliméricos, tapón rosca,) ha hecho que muchos productos migren a esta tipología de cierres.

En todo caso y ante un creciente mercado de vinos embotellados y de calidad, la demanda de tapones de alta gama es mayor si bien la oferta no puede incrementarse.

Tampoco una adecuada política silvícola permitiría en el medio plazo incrementar de forma sustancial la cantidad de corcho disponible debido al gran periodo de maduración del alcornoque antes de producir su primera extracción de corcho útil para el sector vinícola.

En estas circunstancias, surge la oportunidad de fabricar tapones de dos piezas a partir de las planchas de corcho con un espesor menor y que no pueden utilizarse para la consecución de tapones de una pieza.

Un tapón de dos piezas es un tapón formado por dos mitades semicilíndricas encoladas por la parte central.

Mantiene las principales características del tapón natural de una pieza, con un coste algo más contenido y con algunas ventajas adicionales:

- Mayor aprovechamiento de las materias primas en la producción de tapones de alto valor añadido.

- Materias primas menos costosas y no existencia de problemas de aprovisionamiento de las mismas al competir, para su adquisición, con otros productos de menor valor añadido.
- Mayor disponibilidad de materias primas en el mercado al competir únicamente con procesos de bajo valor añadido (laminado de corcho y triturado de corcho para aglomerar/microgranular).
- El corcho de rama, al encontrarse alejado de las fuentes de contaminación tradicionales del corcho (se encuentra lejos de la humedad, principal causa de la aparición del TCA), lo que implica unos menores niveles de contaminación que el corcho convencional.
- Densidad y capacidades mecánicas de los tapones fabricados con este proceso, es mucho mayor que las fabricadas por procesos convencionales (el corcho “delgado” tiene el mismo número de paredes celulares por años de crecimiento, pero al ser su espesor mucho menor,
- el número de paredes celulares por cm lineal es mucho mayor).
- Al trabajar con planchas base de menor espesor (un 22% del espesor requerido para el perforado de un tapón convencional), resulta mucho más sencillo tratar dichas láminas en profundidad mediante tratamientos térmicos y minimizar la aparición de TCA.

Sin embargo, dado que el proceso de fabricación es diferente al utilizado para la consecución de tapones de una pieza, el impacto de fabricación de este tipo de tapones también será sustancialmente diferente.





Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

## Tesis doctoral

Programa de doctorado en ciencias y tecnologías industriales.

Línea de investigación en tecnologías energéticas y químicas industriales

“ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE TAPONES DE  
CORCHO PARA UTILIZACIÓN COMO CIERRE PARA VINO TRANQUILO”

SECCIÓN 2 – METODOLOGÍA Y DESARROLLO

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

DIRECTORES DE LA TESIS: DR. Juan Ignacio Latorre Biel

Dr. Emilio Jiménez Macías

DOCTORANDO: Francisco Javier Flor Montalvo

Tudela, Noviembre 2022

## 3. Metodología de análisis

---

## 3. Metodología de análisis

### 3.1. Consideraciones previas

ACV es una herramienta para el análisis de la carga ambiental de productos procesos en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de recursos hasta la producción de materiales, partes de productos y el producto mismo, y el uso del producto para la gestión después de que se descarta, ya sea por reutilización, reciclaje o eliminación final (en efecto, por lo tanto, "desde la cuna hasta la tumba").

La carga ambiental abarca todos los tipos de impactos sobre el medio ambiente, incluida la extracción de diferentes tipos de recursos, la emisión de sustancias peligrosas y diferentes tipos de uso de la tierra. El término "producto/proceso" se toma en su sentido más amplio, incluidos los bienes físicos y los servicios; Incluye bienes y servicios tanto a nivel operativo como estratégico. Es importante tener en cuenta que en los estudios de ACV comparativos, no son los propios productos los que forman la base de la comparación, sino la función proporcionada por estos.

ACV es, en la medida de lo posible, de carácter cuantitativo; cuando esto no sea posible, los aspectos cualitativos pueden, y deberían, tenerse en cuenta, de modo que se proporcione una imagen lo más completa posible de los impactos ambientales involucrados.

Un análisis desde la cuna hasta la tumba implica un enfoque "holístico", que lleva los impactos ambientales a un marco coherente, donde y cuando estos impactos hayan ocurrido u ocurrirán. Una razón fundamental para elegir este enfoque se relaciona con el hecho de que el consumo final de productos es la fuerza motriz de la economía. Por lo tanto, este consumo final ofrece oportunidades centrales para la gestión ambiental indirecta a lo largo de toda la cadena o red de procesos unitarios relacionados con un producto.

Otra razón fundamental es que un enfoque de la cuna a la tumba evita el "cambio de problema". Es importante que en el ecodiseño no resuelva un problema ambiental simplemente cambiándola a otra etapa en el ciclo de vida del producto. Por ejemplo, fabricar un automóvil en aluminio en lugar de acero significa que se reduce el consumo de gasolina, pero la producción de aluminio requiere más energía que la del acero. Solo cuando se tienen en cuenta todos estos hechos, se puede juzgar si un automóvil fabricado en aluminio es verdaderamente más ecológico que uno fabricado en acero.

Los proyectos abarcados y que sirven y servirán de soporte a este Proyecto de Investigación están relacionados con:

- Analizar los orígenes de los problemas relacionados con un producto/proceso en particular.
- Comparar las variantes de mejora de un producto/proceso dado.
- Diseño de nuevos productos y sus procesos productivos.
- Elegir entre una serie de productos comparables entre sí.

### 3.2. Consideraciones previas

La característica principal de ACV es su naturaleza 'holística', que es a la vez su mayor fortaleza y, en

al mismo tiempo, su limitación. El amplio alcance de analizar el ciclo de vida completo de un producto solo se puede lograr a costa de simplificar otros aspectos.

En primer lugar, el ACV no puede abordar los impactos localizados. Es posible reducir algunos de los resultados e identificar las regiones en las que se producen ciertas emisiones, después de lo cual se pueden tomar en cuenta las diferencias en la sensibilidad de estas regiones en el contexto de ACV. Pero el ACV no proporciona el marco para un estudio de evaluación de riesgos local completo, que identifica qué impactos se pueden esperar debido al funcionamiento de una instalación en una localidad específica.

Lo mismo es cierto para el aspecto del tiempo. El ACV suele ser un estado estacionario, en lugar de un enfoque dinámico. Sin embargo, los futuros desarrollos tecnológicos se toman cada vez más en cuenta en estudios de ACV más detallados.

El modelo ACV se centra en las características físicas de las actividades industriales y otros procesos económicos; No incluye mecanismos de mercado ni efectos secundarios en el desarrollo tecnológico

En general, ACV considera todos los procesos como lineales, tanto en la economía como en el entorno. Nuevamente, se está progresando en la reducción de esta limitación, pero en el fondo, ACV es una herramienta basada en el modelado lineal.

Además, ACV se centra en los aspectos ambientales de los productos, y no dice nada sobre sus características económicas, sociales y otras. Los impactos ambientales se describen a menudo como "impactos potenciales" porque no se especifican en el tiempo y el espacio y están relacionados con una unidad funcional (a menudo) arbitrariamente definida. Además, implica una serie de supuestos técnicos y elecciones de valores. El proceso de estandarización ISO juega un papel importante, lo que ayuda a evitar la arbitrariedad. Un objetivo importante es hacer que estas suposiciones y elecciones sean lo más transparentes posible; este es también un elemento importante para incrustar ACV en procedimientos.

Finalmente, una característica fundamental se refiere a la naturaleza del ACV como herramienta analítica. Como tal, proporciona información para toma de decisiones. Pero el ACV no puede reemplazar el proceso de toma de decisiones en sí. No se puede decir: "El estudio de ACV ha demostrado que esta decisión debe tomarse", sino que "Basándose en un estudio de ACV y otras pruebas, se tomó la siguiente decisión".

### 3.3. Metodología para la realización de un proyecto con aporte de ACV

En primer lugar, es necesario tener en cuenta que un proyecto ACV es más que un simple estudio. Los resultados del proyecto podrían usarse en la toma de decisiones, realizado por la industria, el gobierno y las organizaciones no gubernamentales. Podrían influir en decisiones sobre inversión, cuestiones políticas o estrategias de empresa. Por lo tanto, es mejor considerar un proyecto ACV como un proceso organizativo, que se puede llevar a cabo de varias maneras.

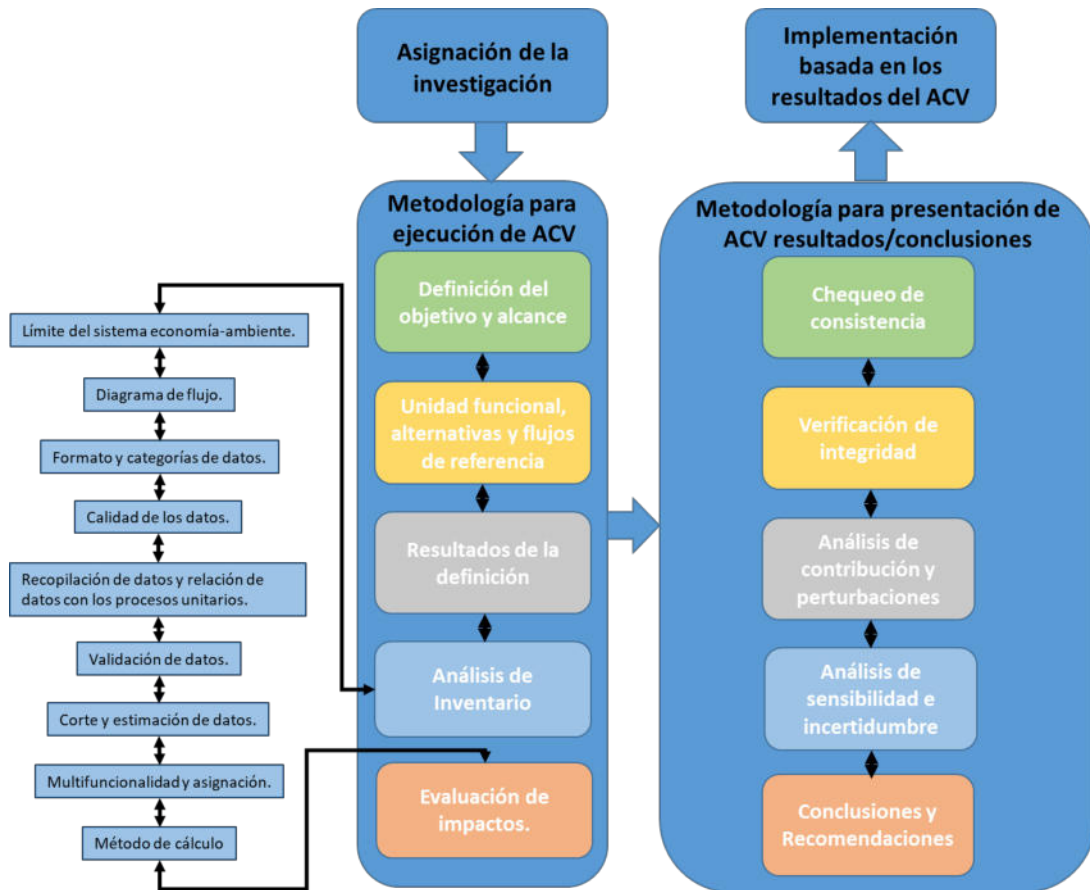
Este enfoque de proceso se basa en la idea de que los resultados de un ACV solo se considerarán autorizados si los actores más importantes han participado en el análisis. Esto debe hacerse de manera correcta, lo que requiere un diseño de proceso que defina:

- Partes y personas que participarán en el proyecto ACV.
- Tareas y responsabilidades de las partes/personas involucradas.
- Puntos en los que las partes/personas involucradas pueden ejercer su influencia (puntos de decisión).
- Cómo funcionará la toma de decisiones en estos puntos.
- Métodos de resolución de “cuellos de botella” durante el proceso.
- Planificación y gestión real del proceso.

La ejecución de un ACV y el proceso que lo acompaña deben estar cuidadosamente sincronizados con su objetivo final. Esto requiere que tanto el destinatario del ACV como otras partes interesadas reflexionen sobre este objetivo. Mientras tanto, los propios investigadores de ACV también deben tener el objetivo en mente, considerando cómo esto podría afectar las condiciones y limitaciones del proyecto en sí. El destinatario del ACV también debe considerar el diseño, la configuración organizativa y la gestión del proceso de acompañamiento.

Un diseño de proceso adecuado se puede definir como un conjunto de reglas acordadas por las partes involucradas; estos cubren quién está involucrado, y también cuándo y cómo se llevará a cabo el proceso. Un proceso adecuado y transparente solo se puede realizar mediante un diseño que maximice todas las ventajas potenciales, manteniendo al mínimo los riesgos del enfoque del proceso.

El diseño del proceso debe ser claro en sus objetivos, lo que significa que debe definirse un punto de partida y un punto final del proceso. Debe organizarse una interacción optimizada entre la ejecución del ACV como tal y el uso práctico de los resultados del ACV.



**Figura 1.** Metodología

La Figura 1 muestra los cuatro pasos en los procesos de implementación de Proyectos basados en ACV:

- Asignación de la investigación.
- Ejecución del ACV.
- Presentación de los resultados del ACV con conclusiones.
- Implementación basada en los resultados del ACV.



Todas las partes involucradas pueden influir en el procedimiento y las elecciones en estos cuatro pasos. Un diseño de proceso debe indicar quién puede tomar decisiones, cuándo deben hacerse y qué se puede decidir en cada paso.

A continuación, se desarrolla la metodología implementada en los pasos anteriormente citados.

### 3.3.1. Metodología para ejecución de ACV

**Etapas 1.** Definición del objetivo. El primer paso es la fase de definición del objetivo del estudio y especificando el uso previsto de los resultados (aplicación del estudio ACV)

**Etapas 2.** Definición del alcance. El paso Definición de Alcance establece las características principales de un estudio de ACV, cubre aspectos tales como la cobertura temporal, geográfica y tecnológica, el modo de análisis empleado y el nivel general de sofisticación del estudio. Este informe debe justificar todas las elecciones principales con respecto al paso "Función, unidad funcional, alternativas y flujos de referencia" y las fases de Análisis de inventario, Evaluación de impacto e Interpretación.

**Etapas 3.** Función, unidad funcional, alternativas y flujos de referencia. En este paso, se definen la función, unidad funcional, alternativas y flujos de referencia. La unidad funcional describe la(s) función (es) primaria (s) cumplida (s) por un sistema de producción, e indica qué parte de esta función se debe considerar en el estudio de ACV previsto. Se usa como base para seleccionar uno o más sistemas de productos alternativos que podrían proporcionar estas funciones. La unidad funcional permite que diferentes sistemas sean tratados como funcionalmente equivalentes y permite que se determinen los flujos de referencia para cada uno de ellos. El flujo de referencia es una medida de las salidas de los procesos en un sistema de producción dado que se requieren para cumplir la función expresada por la unidad funcional.

**Etapla 4.** Resultados de la definición de objetivo y alcance. Los resultados de la fase de Definición de alcance y objetivo consisten en una especificación clara del objetivo del estudio, la unidad funcional y los flujos de referencia para los diversos sistemas de productos alternativos. Además, el alcance del estudio guiará más opciones en las fases posteriores. Estos resultados forman la entrada para la siguiente fase del LCA, el análisis del inventario.

**Etapla 5.** Análisis de Inventario. El análisis del inventario es la fase en la que se define el sistema de producción (o los sistemas de producción si hay más de una alternativa). En este contexto, la definición incluye establecer los límites del sistema (entre economía y entorno, con otros sistemas de productos y en relación con el corte), diseñar los diagramas de flujo con procesos unitarios, recopilar los datos para cada uno de estos procesos, realizar los pasos de asignación para procesos multifuncionales y completar los cálculos finales. Su principal resultado está en una tabla de inventario que enumera las entradas y salidas cuantificadas del entorno asociado a la unidad funcional. El orden lógico de actuación es:

1. Límite del sistema economía-ambiente.
2. Diagrama de flujo.
3. Formato y categorías de datos.
4. Calidad de los datos.
5. Recopilación de datos y relación de datos con los procesos unitarios.
6. Validación de datos.
7. Corte y estimación de datos.
8. Multifuncionalidad y asignación.
9. Método de cálculo.

**Etapla 6.** Evaluación de impactos. La evaluación del impacto del ciclo de vida es la fase en la que el conjunto de resultados del análisis del inventario, principalmente la tabla de inventario, se procesa e interpreta en términos de impacto ambiental y preferencias sociales. Para este fin, se define una lista de categorías de impacto, y se seleccionan los modelos para relacionar las intervenciones ambientales con los indicadores de categoría adecuados para

estas categorías de impacto. Los resultados del modelado real se calculan en el paso de caracterización, y una normalización opcional sirve para indicar la participación de los resultados modelados en un total mundial o regional. Finalmente, los resultados del indicador de categoría se pueden agrupar y ponderar para incluir las preferencias sociales de las diferentes categorías de impacto.

La Tabla 1 muestra la metodología para cuantificar los impactos ambientales.

**Tabla 1.** Metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida.

Metodología	Categorías de impacto	Descripción
Ec99	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carcinogénicos</li> <li>• Respiratorios orgánicos</li> <li>• Respiratorios inorgánicos</li> <li>• Cambio Climático</li> <li>• Radiación</li> <li>• Destrucción capa ozono</li> <li>• Ecotoxicidad</li> <li>• Acidificación y eutrofización</li> <li>• Uso de suelo</li> <li>• Uso de recursos minerales</li> <li>• Uso de combustibles fósiles</li> </ul>	<p>Sucesor del Eco-Indicator 95. Su desarrollo comenzó con el estudio de asignación de pesos para el Eco-Indicator 95.</p> <p>Se cambió el sistema de evaluación de impactos: En lugar de evaluar cada una de las categorías de impacto, se evaluaron los diferentes daños causados por estas categorías de impacto, agrupándolos en tres niveles de daño:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daños a la salud Humana</li> <li>• Daños a la calidad del Ecosistema</li> <li>• Daños a los Recursos.</li> </ul>

<p>RECIPE</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destrucción capa ozono Toxicidad humana</li> <li>• Radiación</li> <li>• Smog fotoquímico</li> <li>• Cambio Climático</li> <li>• Ecotoxicidad al suelo</li> <li>• Acidificación al suelo</li> <li>• Ocupación suelo rural</li> <li>• Ocupación suelo urbano</li> <li>• Transformación suelo natural</li> <li>• Ecotoxicidad marina</li> <li>• Eutrofización marina</li> <li>• Eutrofización agua dulce</li> <li>• Ecotoxicidad agua dulce</li> <li>• Uso de combustibles fósiles</li> <li>• Uso de recursos naturales</li> <li>• Uso de agua</li> </ul>	<p>ReCiPe se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator99.</p> <p>La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator 99 es su facilidad de interpretación.</p> <p>Con ello, se han mejorado los modelos para el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, acidificación, eutrofización, uso del suelo y agotamiento de recursos naturales. A su vez se han actualizado factores de caracterización para algunas categorías de impacto y para el paso de normalización.</p>
<p>CML 2001</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agotamiento de los recursos abióticos</li> <li>• Cambio climático</li> </ul>	<p>Método basado en el anterior CML 1992.</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destrucción capa ozono</li> <li>• Toxicidad humana</li> <li>• Ecotoxicidad</li> <li>• Smog fotoquímico</li> <li>• Acidificación</li> <li>• Eutrofización</li> <li>• Uso de recursos</li> </ul>	<p>El paso de normalización es opcional para ACVs simplificados, pero obligatorio para ACVs exhaustivos. Dispone de valores de referencia para la normalización de los indicadores de las categorías de impacto: A nivel mundial en 1990, a nivel europeo en 1995 y a nivel holandés en 1997.</p>
IPCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambio climático</li> </ul>	<p>Este método, cuya definición comenzó en 1988, recoge los factores de caracterización para el potencial del calentamiento global directo debido a emisiones al aire.</p>
EDIP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambio climático</li> <li>• Destrucción capa ozono</li> <li>• Acidificación</li> <li>• Eutrofización</li> <li>• Smog fotoquímico</li> <li>• Ecotoxicidad acuática</li> <li>• Ecotoxicidad del suelo</li> <li>• Toxicidad humana</li> <li>• Residuos</li> <li>• Uso de recursos</li> </ul>	<p>Método cuyo desarrollo comenzó en 1996 en Dinamarca. Los factores de normalización están basados en equivalentes - persona en el año 1990. Para la categoría de uso de recursos, la normalización y ponderación están incluidas dentro de la fase de caracterización, ya que esta categoría se evalúa de manera distinta manera en este método.</p> <p>Los factores de ponderación son definidos como distancia al objetivo por persona para el año 2000. Para la</p>

		<p>categoría uso de recursos, estos factores están considerados en las fases anteriores, por lo que en este paso se consideran cero.</p>
EPS2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salud humana</li> <li>• Capacidad de producción del ecosistema</li> <li>• Reserva de recursos abióticos</li> <li>• Diversidad biológica</li> <li>• Valores culturales</li> </ul>	<p>La metodología EPS2000 (Environmental Priority Strategies in product design) es un método orientado al daño causado. En él se tiene en cuenta la voluntad de pagar para restaurar los cambios causados. Por ello la unidad del indicador final es el ELU (Environmental Load Unit).</p> <p>En este método no se aplica el paso de normalización.</p>
TRACI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destrucción capa ozono</li> <li>• Cambio Climático</li> <li>• Smog fotoquímico</li> <li>• Acidificación</li> <li>• Eutrofización</li> <li>• Efectos cancerígenos a la salud humana</li> <li>• Efectos no cancerígenos a la salud humana</li> </ul>	<p>Desarrollado en 1995, supone una herramienta informática para la evaluación de las 12 categorías de impacto que constituyen el método. Muchas de los mecanismos ambientales que soportan las categorías de impacto están importados de otras metodologías, como Ec99 y CML2001.</p> <p>Aunque TRACI tiene definidos los pasos de normalización y ponderación, a día de hoy no dispone del histórico</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polución a la salud humana</li> <li>• Ecotoxicidad</li> <li>• Agotamiento de combustibles fósiles</li> <li>• Uso del suelo</li> <li>• Uso de agua</li> </ul>	<p>suficiente de información que le permita realizar estos pasos con suficiente fiabilidad.</p>
--	---	---

### 3.3.2. Metodología para presentación de los resultados del ACV con conclusiones

La Interpretación del Ciclo de Vida es la fase en la que los resultados del análisis y todas las opciones y supuestos realizados durante el curso del análisis se evalúan en términos de solidez y robustez, y se extraen conclusiones generales. Los elementos principales de la fase de Interpretación son una evaluación de los resultados (en términos de coherencia e integridad), un análisis de los resultados (por ejemplo, en términos de solidez) y la formulación de las conclusiones y recomendaciones del estudio.

**Etapas 1. Chequeo de consistencia.** El objetivo de la verificación de consistencia es determinar si las suposiciones, métodos, modelos y datos son consistentes con el objetivo y el alcance del estudio, tanto a lo largo del ciclo de vida de un producto como a través de varias opciones. Todos los demás análisis de los resultados y los análisis de sensibilidad son inútiles si los supuestos y los modelos utilizados en el ACV no concuerdan con el objetivo y el alcance del estudio o inconsistente entre las diferentes opciones.

**Etapas 2. Verificación de integridad.** La verificación de integridad asegura que toda la información y los datos relevantes necesarios para la fase de Interpretación estén disponibles y completos. En la verificación de errores, el estudio se verifica para falsas suposiciones, opciones de modelo y datos. Tener una visión experta de los resultados del ACV y cómo se generaron puede descubrir errores y datos incompletos.

**Etapas 3. Análisis de contribución.** El análisis de contribución calcula la contribución general a los resultados de los diversos factores. Las contribuciones generalmente se expresan como porcentajes del total. El análisis de contribuciones responde preguntas sobre la contribución de flujos, procesos o impactos ambientales específicos a un puntaje ambiental dado.

**Etapas 4. Análisis de perturbaciones.** El análisis de perturbaciones implica el estudio de los efectos de pequeños cambios dentro del sistema en los resultados de un ACV. Los efectos de estos pequeños cambios se calculan simultáneamente para todos los flujos dentro del sistema. El análisis se puede realizar en diferentes niveles de agregación: tabla de inventario, resultados de indicadores, resultados de indicadores normalizados o resultados de ponderación. La principal diferencia entre el análisis de contribución y el análisis de perturbación radica en el hecho de que toma en cuenta no solo los flujos ambientales, sino también los flujos económicos entre los procesos unitarios. Esto es importante, porque los multiplicadores de los flujos económicos pueden exceder la unidad cuando los lazos internos están presentes. El análisis de perturbaciones puede ser muy importante en un análisis de mejora y en un análisis de sensibilidad destinado a identificar puntos importantes y refinar el estudio de ACV.

**Etapas 5. Análisis de sensibilidad e incertidumbre.** Para utilizar el ACV como herramienta para la toma de decisiones, se necesita información sobre la solidez de los resultados. Este elemento de la fase de interpretación evalúa la influencia en los resultados de las variaciones en los datos del proceso, las elecciones del modelo y otras variables. En el análisis de sensibilidad, estos cambios se introducen deliberadamente para determinar la solidez de los resultados con respecto a estas variaciones. El análisis de incertidumbre utiliza datos empíricos sobre los rangos de incertidumbre de datos específicos para calcular el rango de error total de los resultados.



**Etapas 6. Conclusiones y Recomendaciones.** En este último paso de la fase de Interpretación, se extraen conclusiones y se hacen recomendaciones en función de la información recopilada en las fases previas del ACV y combinada con los resultados de los pasos anteriores de la fase de Interpretación.

## 4. Producción sostenible de tapones de corcho de una pieza

---

## 4. Producción sostenible de tapones de corcho de una pieza

### 4.1. Objetivos y alcance

Para la realización de la presente investigación, se ha realizado un análisis puerta a puerta (gate to gate) a partir de los datos obtenidos de la medición de cada uno de los procesos productivos necesarios para la fabricación de tapones de corcho de diversas dimensiones mediante la metodología de perforado y de torneado. De esta forma, se ha considerado que las fases del ciclo de vida para el presente estudio abarcarán desde la entrada de plancha bruta a las instalaciones hasta envasado final.

Para cada uno de los procesos estudiados, se ha realizado la recopilación de datos directamente sobre las instalaciones de fabricación, considerando todas las etapas de fabricación del corcho y sus procesos asociados. Se han cuantificado las materias entrantes usadas, los materiales descartados y su clasificación según aprovechamiento, los consumos energéticos, los consumos de agua y otros insumos, además de la mano de obra destinada al proceso. Este estudio permitirá identificar aquellas actividades críticas del proceso productivo.

Para el análisis de proceso productivo se ha utilizado el software Simapro 8.3 y la metodología de cálculo CML-IA baseline V3.04 / EU25. Como categorías de impacto se han seleccionado las siguientes: Abiotic Depletion (AD); Global Warming-GWP100 (GW); ozone layer depletion (OLD); human toxicity (HT); fresh water aquatic ecotoxicity (FWAE); marine aquatic ecotoxicity (MAE); terrestrial ecotoxicity (TE); photochemical oxidation (PO); acidification (AC); eutrophication (EU).

### 4.2. Unidad funcional

Para la presente investigación, se ha definido la unidad funcional como un kg de tapones de corcho natural procesados y embalados.

### 4.3. Límites del sistema

Los límites del sistema incluyen todos los procesos productivos necesarios para la consecución de una unidad funcional a partir de planchas brutas no seleccionadas y hasta el embalado final (ver Figura 2).

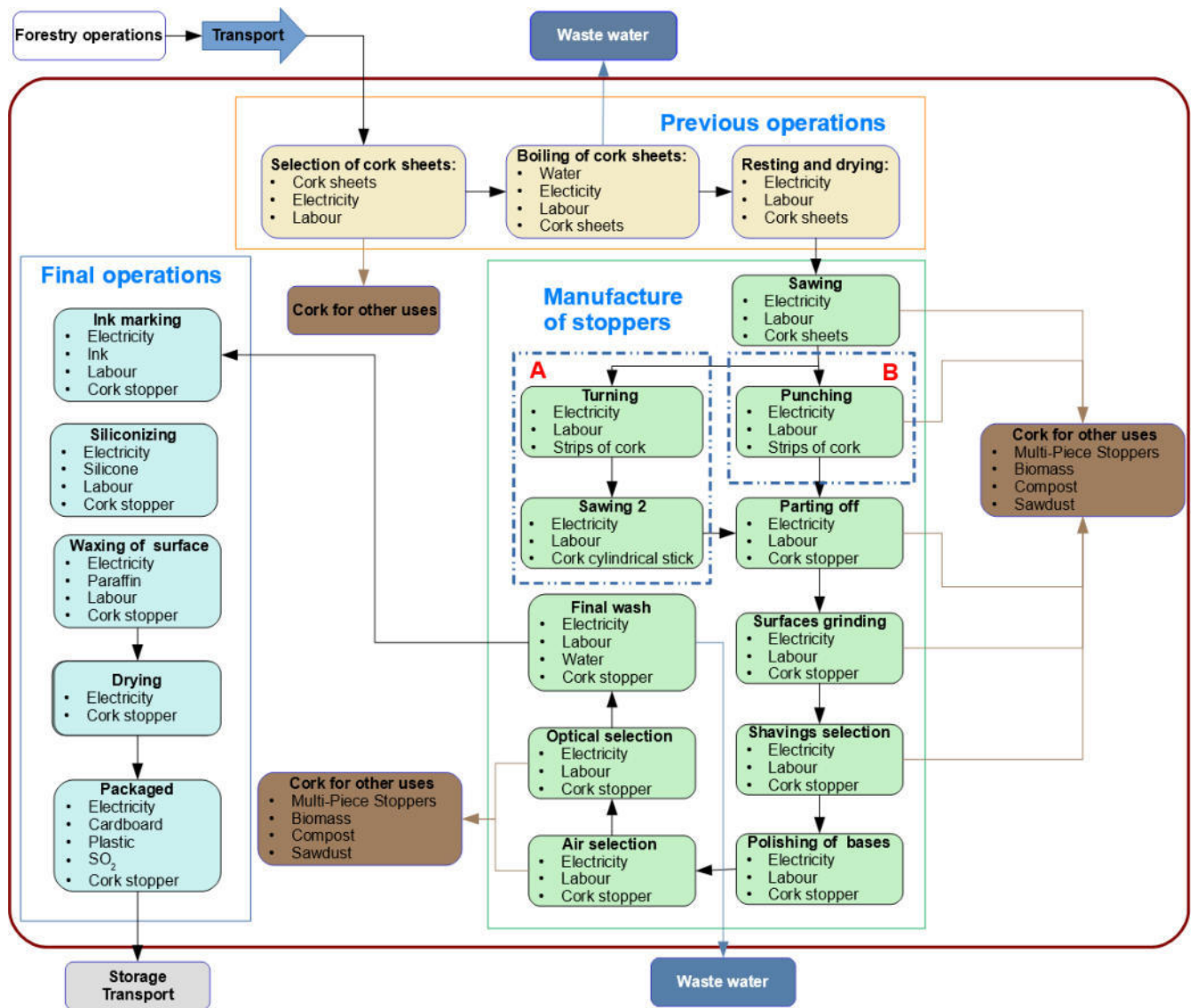


Figura 2. Límites del sistema

Las siguientes actividades se han incluido dentro de los límites del sistema:

- Consumo de electricidad en equipos y maquinaria de la planta.
- Consumos de agua.
- Emisiones producidas por la mano de obra.
- Embalaje completo de la unidad funcional.
- Consumo de materiales y recursos a lo largo de todo el proceso productivo.
- Obtención de subproductos de corcho para otros fines valorizables económicamente.

En cuanto a los límites del sistema establecidos para todos los procesos, las siguientes actividades están fuera de estos límites:

- El transporte de planchas de corcho y materiales empleados en el proceso desde su lugar de origen.
- La instalación y desmantelamiento de la planta de producción.
- Mantenimiento de la maquinaria e instalaciones del proceso productivo.
- Gestión y tratamiento de residuos producidos en el proceso.
- Almacenaje final y transporte del producto final al cliente.

#### 4.4. Asunciones

En cuanto a la información técnica de estudio, los datos son los siguientes:

- Características de lote: Plataforma de 365 kg de carga media
- Número de lotes estudiados: 10 lotes para cada proceso de fabricación y diámetro del tapón de corcho.
- Densidad de corcho: 166.07 kg/m<sup>3</sup>
- Volumen del tapón: 1.99051E-05 m<sup>3</sup>/tapón para diámetro 24 mm y 2.33609E-05 m<sup>3</sup>/tapón para diámetro 26 mm

Horas de producción: un turno de ocho horas con cinco días

## 4.5. Inventario

El proceso productivo de fabricación de tapones naturales consta de varias fases que se agrupan en tres grandes bloques.

### 4.5.1. Fase 1: Preparación de planchas de corcho bruto

**Selection of cork sheets:** Una vez finalizado proceso de extracción de la corteza del alcornoque, las planchas de corcho son seleccionadas para eliminar aquellas que no cumplen los requisitos dimensionales o de calidad.

**Boiling of cork sheets:** El proceso de hervido se realiza en agua caliente, en ocasiones con adición de aditivos fenólicos, con el objetivo de limpiar el corcho, extraer sustancias cuyos efectos son considerados negativos (hidrosolubles y fenosolubles) y mejorar las características mecánicas de la plancha bruta (principalmente, al hidratar el corcho, mejora la elasticidad y suavidad a la vez que se incrementa su espesor final cerca de un 20% una vez eliminada el agua residual de aporte).

**Resting and drying:** Tras el proceso de cocido de las planchas brutas, se procede a dejar dichas planchas reposar, permitiendo así que el corcho se estabilice y ajuste su humedad entorno al 14 %, que es cuando tendrá las condiciones óptimas para su procesado. El periodo de reposo será de al menos 15 días, aunque en ocasiones y en función de las características del corcho, puede alargarse varios meses.

### 4.5.2. Fase 2: Fabricación

En esta etapa, se realizan diversos procedimientos mecánicos para obtener, a partir de la plancha bruta, tapones cilíndricos con las dimensiones deseadas. En el caso de los tapones perforados, inicialmente se procede a seleccionar las planchas, descartando aquellas que por sus dimensiones o por defectos o contaminación, no son aptas para la fabricación de tapones.

**Sawing:** Se corta la plancha longitudinalmente en tiras con una longitud de corte ligeramente superior a la dimensión final del tapón.

El flujo se descompone al existir dos procedimientos para el procesado de los tapones: perforado y torneado (See Figure 2).

**Flujo A: Turning:** se procede a tornear dichas tiras en cilindros de longitud superior a dos tapones. El diámetro torneado es superior al diámetro nominal del producto final. **Sawing 2:** Se procede al aserrado de tapones con longitudes ligeramente superiores a las del tapón finalizado.

**Flujo B: Punching** se procede a perforar dichas tiras obteniendo tapones brutos. También en este caso, el diámetro de perforado es superior al diámetro nominal del producto final.

Los tapones brutos serán entonces sometidos a procesos de **Parting off, Surfaces grinding, Shavings selection** and **Polishing of bases**.

El proceso final de selección de tapones se realiza de forma automática. Se utilizan equipos de selección por aire (**Air selection**) para elementos con baja densidad y de inspección óptica (**Optical selection**) para la selección final.

**Final wash:** Los tapones obtenidos y clasificados por categorías son sometidos a un proceso de lavado para asegurar su adecuación organoléptica.

#### 4.5.3. Fase 3: Operaciones Finales

La última etapa de producción de los tapones serán los procesos de acabado superficial.

- **Ink marking:** Pudiendo este proceso realizarse mediante fuego o con tinta. Para esta investigación se han obtenidos datos por el procedimiento de marcado con tinta.

- **Siliconizing:** Consiste en la aplicación de un igualador para ajustar el tono de los tapones y de silicona.
- **Waxing of surface:** Consiste en la aplicación de parafina para mantener la estanqueidad ante líquidos de los tapones y a la vez permite regular y estabilizar la fuerza de extracción del corcho en botella.
- **Drying:** Donde se produce el secado acelerado de los tapones terminados.
- **Packaged:** Finalmente los tapones terminados serán envasados, introduciendo un gas oxidante en el envase (CO<sub>2</sub>) para evitar la contaminación de los tapones en el transporte y almacenamiento.

#### 4.6. Inventario

Se aplicó la metodología CML-IA baseline V3.05 / EU25 a las dos técnicas de fabricación de tapones de corcho y en las dos dimensiones más comúnmente empleadas en la industria vitivinícola (diámetros 24 mm y 26 mm, longitud 44 mm). La Tabla 2 muestra los resultados globales obtenidos en cada una de las categorías de impacto.



**Tabla 2 . Impactos Globales**

Impact category	Size	Natural cork stoppers			
		24x44		26x44	
	Unit	Punched	Turned	Punched	Turned
<b>Abiotic depletion</b>	kg Sb eq	2.52E-05	2.60E-05	2.62E-05	2.96E-05
<b>Abiotic depletion (fossil fuels)</b>	MJ	8.96E+01	9.27E+01	9.23E+01	1.04E+02
<b>Global warming (GWP100a)</b>	kg CO2 eq	8.26E+00	8.55E+00	8.51E+00	9.63E+00
<b>Ozone layer depletion (ODP)</b>	kg CFC-11 eq	8.36E-07	8.67E-07	8.59E-07	9.73E-07
<b>Human toxicity</b>	kg 1.4-DB eq	4.30E+00	4.45E+00	4.45E+00	5.04E+00
<b>Fresh water aquatic ecotoxicity</b>	kg 1.4-DB eq	4.72E+00	4.88E+00	4.89E+00	5.53E+00
<b>Marine aquatic ecotoxicity</b>	kg 1.4-DB eq	1.31E+04	1.36E+04	1.35E+04	1.53E+04
<b>Terrestrial ecotoxicity</b>	kg 1.4-DB eq	8.34E-02	8.61E-02	8.67E-02	9.80E-02
<b>Photochemical oxidation</b>	kg C2H4 eq	3.19E-03	3.30E-03	3.30E-03	3.74E-03
<b>Acidification</b>	kg SO2 eq	4.62E-02	4.79E-02	4.74E-02	5.37E-02
<b>Eutrophication</b>	kg PO4 <sup>---</sup> eq	2.01E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.35E-02

Analizando los datos obtenidos se aprecia los tapones de corcho de tamaño 24 mm x 44 mm y obtenidos por punzonado presentan menor impacto en todas las categorías analizadas. Asimismo, los tapones de corcho de 26 mm x 44 mm obtenidos por torneado presenta el mayor impacto en todas las categorías analizadas. También, al analizar tapones de igual diámetro y

longitud, la Tabla 5 muestra que siempre se cumple la regla de que los tapones perforados presentan menos impactos en todas las categorías que los tapones torneados.

La explicación al fenómeno anterior está relacionada directamente con el aprovechamiento global de las planchas de corcho. Por ejemplo, analizando la categoría *Global Warming*, donde los tapones de corcho torneados de 26 mm x 44 mm tienen el mayor impacto ambiental con 9.63E+00 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de tapones. Los tapones de corcho torneados de 24 mm x 44 mm presentan un impacto ambiental un 12% menor con un aprovechamiento de un 13% más. Los tapones de corcho perforados de 26 mm x 44 mm tienen un aprovechamiento un 13% mayor con un impacto ambiental de un 11% menor. La mayor diferencia se presenta en los tapones de corcho perforados de 24 mm x 44 mm, donde con un 17% más de aprovechamiento, se consigue una reducción de un 14% en el impacto ambiental.

## 5. Producción sostenible de tapones de corcho de dos piezas

---

## 5. Producción sostenible de tapones de corcho de dos piezas

### 5.1. Objetivos y alcance

En el presente artículo se ha llevado a cabo un análisis puerta a puerta (gate to gate) considerando todos los procesos productivos.

Para cada uno de dichos procesos productivos, se ha realizado la obtención de datos primarios para cada uno de los procesos midiendo directamente sobre cada uno de los puestos de trabajo, los consumos de materiales y agua, los tiempos de trabajo así como los residuos producidos, sus destinos y aprovechamiento.

De esta forma, el presente estudio permitirá la detección de las etapas críticas del proceso productivo y la identificación de la evolución del impacto de la actividad a lo largo de la propia actividad productiva.

El análisis de proceso productivo ha requerido la utilización del software Simapro 8.3 y la metodología de cálculo CML-IA baseline V3.04 / EU25.

### 5.2. Objetivos y alcance

Tras el análisis realizado, se ha definido como unidad funcional para el presente estudio un kg de tapones de 2 piezas totalmente procesados, marcados, incluyendo los procesos de postratamiento y el envasado.

### 5.3. Límites del sistema

Se han dividido los procesos productivos en tres bloques principales:

- operaciones iniciales a realizar sobre plancha bruta de corcho
- operaciones de mecanizado para la obtención de tapones brutos

- operaciones de post-tratamiento y de personalizado y envasado.

Los límites del sistema han sido definidos para que incluyan todas las actividades y procesos necesarios para la fabricación de tapones terminados y consecuentemente para permitir obtener la unidad funcional. Esto incluye todos los procesos desde necesarios para la transformación de planchas brutas no clasificadas en tapones terminados envasados (ver Figura 3).

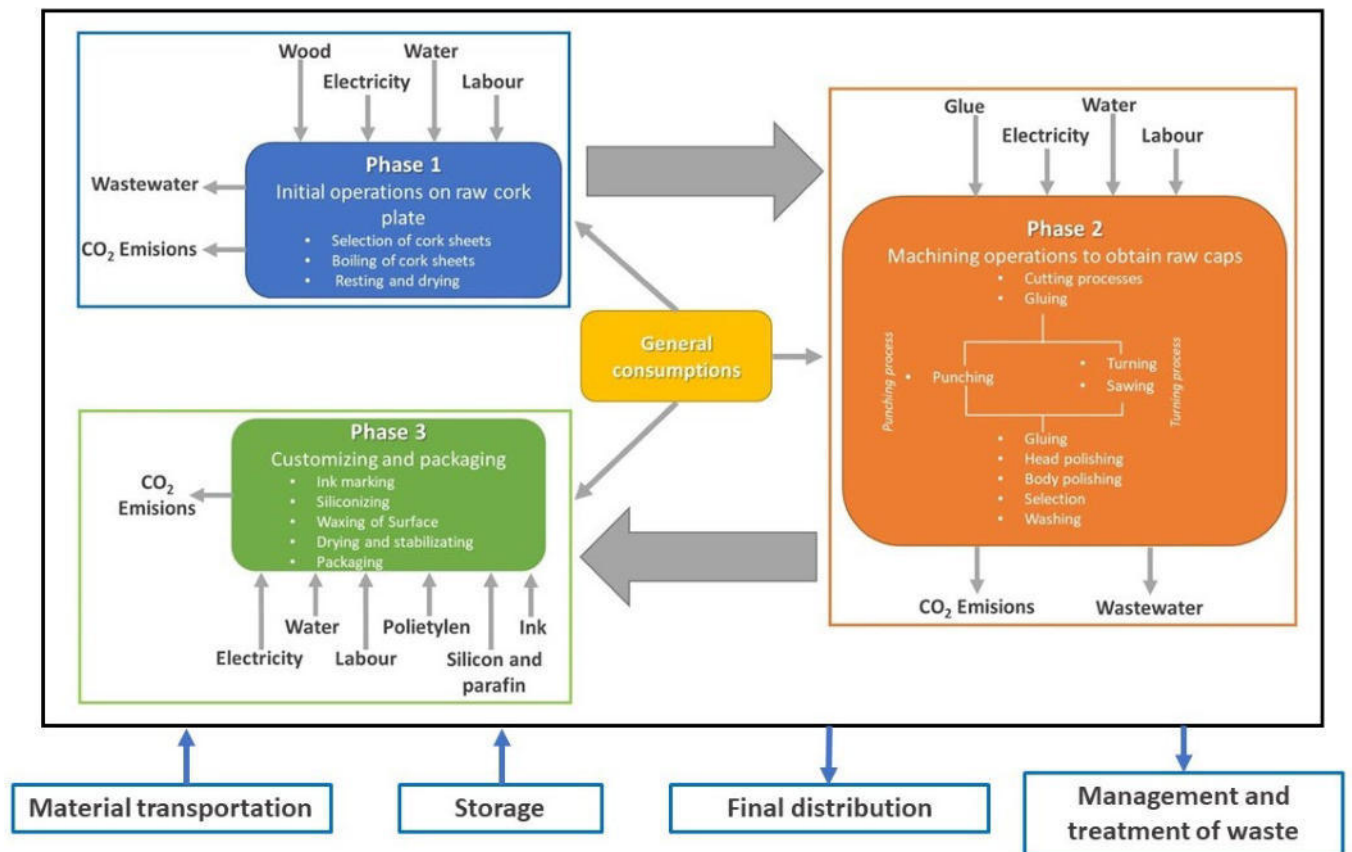


Figura 3. Límites del sistema

En función de lo anterior, se han considerado dentro de los límites del sistema las siguientes actividades:

- Consumo eléctrico de todo equipo y máquina usada en proceso productivo

- Mano de obra y emisiones asociadas.
- Consumo de materiales a lo largo del proceso productivo.
- Consumo de otros recursos a lo largo del proceso productivo.
- Embalaje completo de la unidad funcional.
- Valorización de subproductos y residuos de corcho para otras aplicaciones con retorno económico.

Se concreta que quedan excluidos específicamente de proceso productiva las siguientes actividades:

- El transporte de materias primas, cualesquiera que sea su origen hasta la planta productiva.
  - Instalación y desmantelamiento de planta productiva.
  - Mantenimiento de maquinaria e instalaciones del proceso.
  - Gestión y tratamiento de residuos producidos en el proceso.
  - Almacenaje y transporte de producto terminado a instalaciones del cliente.

#### 5.4. Asunciones

Se tendrán en cuenta los siguientes aspectos respecto del proceso analizado:

- Características de lote: Plataforma de corcho bruto. Carga media 365 kg/plataforma.
  - Nº de lotes estudiados: para cada proceso analizado y cada dimensión y diámetro, se han considerado 10 lotes consistente cada uno de ellos en una plataforma de corcho bruto.
  - Densidad de corcho: la densidad media del corcho trabajado ha sido de 191,37 kg/m<sup>3</sup>
  - Volumen de tapones: 1.99051E-05 m<sup>3</sup>/tapón para diámetro 24 mm y longitud 44 mm. y 2.33609E-05 m<sup>3</sup>/tapón para diámetro 26 mm. y longitud 44 mm.

- Personal de producción: turno de fabricación de ocho horas diarias y cinco días laborables por semana.

## 5.5. Inventario

Tras un análisis detallado del proceso productivo (Figura 3), se ha segmentado el mismo en tres bloques principales de procesos:

- operaciones iniciales a realizar sobre plancha bruta de corcho
- operaciones de mecanizado para la obtención de tapones brutos
- operaciones de post-tratamiento y de personalizado y envasado.

### 5.5.1. Fase 1: Operaciones iniciales a realizar sobre plancha bruta de corcho

**Selection of cork sheets:** Las planchas brutas enviadas tras el proceso de extracción del corcho, deben ser seleccionadas. Se eliminarán aquellas planchas que presenten contaminación que pudiera afectar de forma significativa a los tapones (verde, picado, tierra, podredumbre, mancha amarilla,...).

Aquellas planchas que tampoco cumplen con los criterios dimensionales adecuados para el proceso productivo previsto son también segregadas.

**Boiling of cork sheets:** Las planchas en bruto seleccionadas se someten a un proceso de cocido en agua caliente con o sin adición de aditivación fenólica. En ocasiones también reciben un tratamiento de vapor con el objeto de mejorar sus condiciones organolépticas.

Mediante este proceso se logra higienizar la plancha minimizando la posterior aparición de problemas y transferencias de olores y sabores a la vez que se consigue una importante mejora de las propiedades mecánicas de las planchas tratadas al lograr homogeneizar la presencia de agua en la microestructura del corcho y con ello su comportamiento mecánico. AL hidratar la plancha se logra un incremento cercano al 20 % en su volumen (una vez eliminada el agua de aporte en exceso) incrementando sustancialmente su elasticidad y suavidad.

**Resting and drying:** Una vez se ha procedido al cocido de las planchas, éstas deben dejarse reposar con el objetivo de eliminar la humedad en exceso hasta alcanzar un 14% aproximadamente y de estabilizar su estructura. Si viene este proceso tiene una duración mínima de 15 días, en función de las características del corcho y de su estado puntual, puede alargarse mucho más alcanzando en ocasiones varios meses.

El secado y reposo se realizará bajo cubierta pero en un pabellón abierto y que permita el paso de aire.

Los procesos de secado artificial no son recomendables para el tratamiento del corcho.

### 5.5.2. Fase 2: Operaciones de mecanizado para la obtención de tapones brutos

En esta fase, se procede a mecanizar las planchas brutas de corcho hasta obtener tapones cilíndricos con las dimensiones requeridas.

Existen dos procesos de fabricación principales y diferentes que se han analizado a lo largo del presente artículo:

- Fabricación de tapones perforados
- Fabricación de tapones torneados.

En el caso de la fabricación de los tapones perforados, se procede inicialmente al corte transversal de láminas de corcho.

Tras ello se eliminará la “barriga” o superficie interior de la corteza del alcornoque, consiguiendo así una superficie plana y pulida, adecuada para ser encolada.

Una vez realizado dicho corte, se encolarán dos piezas manteniéndolas en una prensa con aporte de presión y temperatura durante 24 h.

Tras finalizar el proceso de encolado, las tiras encoladas son sometidas a un proceso de perforado y las operaciones subsiguientes (tronzado, pulido de testas, pulido de cuerpo,



seleccionado,..) de forma análoga al proceso realizado en el proceso de fabricación de una pieza.

En el caso de los tapones torneados, la principal diferencia radica en que, tras obtener tiras a partir de la plancha bruta, se realizan dos cortes a cada tira eliminan la “barriga” pero también la “espalda” (parte exterior de la corteza del alcornoque) del corcho.

Tras ello, se procede a encolar las tiras obtenidas mediante una prensa con aportación de presión y temperatura y, tras 24 horas de estabilización de la cola, las tiras encoladas se extraen de la prensa y se tornean obteniendo barras.

Las barras son cortadas en tapones mediante una tronadora múltiple tras lo cual se obtienen tapones cilíndricos que son sometidos al resto de procesos habituales citados anteriormente (pulido de testas, pulido de cuerpo, seleccionado,..).

### 5.5.3. Fase 3: Operaciones de post-tratamiento y de personalizado y envasado.

En este último bloque, se parte de tapones brutos con la dimensión deseada y se los somete a los procesos destinados a su acondicionamiento organoléptico, y estético así como a su personalización.

**Ink marking:** Si bien es posible marcar los tapones con fuego o tinta, dado que el mercado se inclina cada vez más por el marcaje a tinta de los tapones se ha considerado este proceso. A través de una marcadora rotativa con continuo, los tapones reciben la impresión deseada en el cuerpo. No es habitual la decoración de las cabezas dado que estarán en contacto con el vino.

**Siliconizing:** En esta fase se aplicará una película de silicona líquida a la superficie del tapón mejorando su estanqueidad y propiciando que el tapón no se deteriore a lo largo de los años en contacto con el vino.

Este proceso se realiza un bombo rotativo perforado con control de temperatura.

**Waxing of surface:** Los tapones reciben una capa de parafina con el objetivo de que la extracción del tapón sea adecuada y no implique un esfuerzo excesivo. Este proceso se realiza un bombo rotativo con control de temperatura.

**Drying and stabilizing:** una vez finalizados los procesos de siliconado y parafinado, se procede al secado de los tapones y su estabilización para evitar eventual contaminación biológica.

**Packaging:** Los tapones terminados son envasados en bolsas de Polietileno e introduciendo un gas oxidante ( $\text{SO}_2$ ) con el objetivo de evitar eventual contaminación de los tapones hasta su utilización.

## 5.6. Resultados

Los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto estudiadas y asociados a las diferentes geometrías y metodologías productivas propuestas puede apreciarse en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Impacto global para cada geometría y metodología productiva, asociada por categorías de impacto.

		<b>24x44 2P Perforado</b>	<b>26x44 2P Perforado</b>	<b>24x44 2P Torneado</b>	<b>26x44 2P Torneado</b>
<b>Abiotic depletion</b>	kg Sb eq	0,002735461	0,002731983	0,003004334	0,00299546
<b>Abiotic depletion (fossil fuels)</b>	MJ	10690,65995	10545,34663	11749,76879	11510,02109
<b>Global warming (GWP100a)</b>	kg CO2 eq	977,7305994	963,2864969	1076,812504	1052,989073
<b>Ozone layer depletion (ODP)</b>	kg CFC-11 eq	0,000102725	0,000100916	0,00011299	0,000110023
<b>Human toxicity</b>	kg 1,4-DB eq	490,8382666	485,8388178	540,5864976	532,2016483
<b>Fresh water aquatic ecotox.</b>	kg 1,4-DB eq	526,3757405	521,1066613	580,335491	571,7369036
<b>Marine aquatic ecotoxicity</b>	kg 1,4-DB eq	1534271,083	1510568,815	1693274,685	1654770,983
<b>Terrestrial ecotoxicity</b>	kg 1,4-DB eq	8,938554382	8,890603038	9,803742104	9,725492703
<b>Photochemical oxidation</b>	kg C2H4 eq	0,37385754	0,369816267	0,404236078	0,397468484
<b>Acidification</b>	kg SO2 eq	5,719579397	5,605312106	6,306237612	6,119246576
<b>Eutrophication</b>	kg PO4--- eq	2,247685829	2,225486034	2,476569152	2,440110841

Un análisis pormenorizado de estos datos, permite afirmar que los procesos de fabricación de tapones mediante torneado generan para todas las categorías, mayores impactos que el sistema tradicional de torneado.

Por otro lado, las geometrías de tapones con diámetro 26, generan impactos ligeramente inferiores a las producidas por la fabricación de tapones de diámetro 24 mm. si bien, este efecto es mucho más liviano que el asociado a las diferentes metodologías de fabricación de tapones.



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

## Tesis doctoral

Programa de doctorado en ciencias y tecnologías industriales.

Línea de investigación en tecnologías energéticas y químicas industriales

“ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE TAPONES DE  
CORCHO PARA UTILIZACIÓN COMO CIERRE PARA VINO TRANQUILO”

SECCIÓN 3 – CONCLUSIONES Y RESULTADOS

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

DIRECTORES DE LA TESIS: DR. Juan Ignacio Latorre Biel

Dr. Emilio Jiménez Macías

DOCTORANDO: Francisco Javier Flor Montalvo

Tudela, Noviembre 2022

## 6. Conclusiones

---

## 6. Conclusiones

La primera parte de la investigación ha realizado un estudio ambiental de la fabricación de tapones de corcho natural de diversas dimensiones mediante la tecnología de perforado y de torneado.

Se presentan los impactos medioambientales analizando el aprovechamiento de la materia prima en relación con las dimensiones de los tapones (24mm x 44mm y 26mm x 44mm), el método de fabricación y los subproductos valorizables generados en el proceso. Los resultados mostrados se han obtenido al analizar 10 lotes productivos por diámetro y tipo de procedimiento de producción.

De los dos métodos productivos analizados (punzonado y torneado), la investigación muestra como el método de punzonado presenta un mayor aprovechamiento que el de torneado. El método de punzonado de tapones de 24mm x 44mm tiene un aprovechamiento del 10.47%, mientras que en los de 26mm x 44mm se reduce al 10.10%. Por otra parte, en los tapones torneados de 24mm x 44mm el aprovechamiento es 10.13%, reduciéndose al 8.97% en los de 26mm x 44mm.

Así mismo, la investigación muestra los productos valorizables obtenidos en el proceso. Entre todos los productos destacan los retales destinado a microgranulate (72.57% a 73.22% de los lotes analizados) y en menor medida los destinados a tapones de dos o cuatro piezas (6.05% a 7.12% de los lotes analizados), a biomass (6.50% a 6.91%) o a Sawdust (3.35% a 4.34%).

En cuanto a impacto ambiental, se aprecia que los tapones de corcho de tamaño 24mm x 44mm obtenidos por punzonado presentan menor impacto en todas las categorías analizadas (en la categoría Global Warming presenta un impacto de 8.26E+00 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de tapones.), mientras que los tapones de corcho de 26mm x 44mm obtenidos por torneado presentan el mayor impacto en todas las categorías analizadas (en la categoría Global Warming presenta un impacto de 9.63E+00 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de tapones).

Es importante señalar como conclusión, que existe una clara relación entre impacto ambiental y aprovechamiento de los lotes productivos, y que el aprovechamiento es función

del método productivo y del tamaño del tapón. Esta investigación ha demostrado que es importante considerar el lote productivo como elemento a tener en cuenta a la hora de evaluar los impactos ambientales, ya que no existe un lote productivo ideal que permita obtener un 100% de aprovechamiento destinado a corcho natural.

La segunda parte de la investigación ha realizado un análisis de ciclo de vida gate to gate del proceso completo de fabricación de tapones de 2 piezas en diámetros 24 y 26 mm y longitudes 44 mm. fabricados por las metodologías de torneado y perforado.

A través de dicha investigación se ha determinado que la etapa 1, correspondiente a los procesos de procesado inicial de la plancha, su cocido y su estabilizado, es aquella que genera mayores impactos, muy por encima de la fase 2 correspondiente a los procesos de mecanizado del tapón a partir de la plancha o de la fase 3 correspondiente a los procesos de post-tratamiento y personalizado del tapón y su empaquetado para entrega al cliente.

El análisis comparativo entre diferentes metodologías de producción y geometrías de tapón arroja muchas similitudes en la fase 1 debido a que el proceso de tratamiento de la plancha de corcho es análogo. No obstante, debemos resaltar que los datos no son iguales debido a que el calibre de las planchas necesarias para la fabricación de tapones de 26 mm es mayor que en el caso de tapones de 24 mm por lo que, para un mismo peso inicial, el número de planchas es menor y consecuentemente los consumos también lo son.

Como conclusión e lo anterior, se establece una relación entre el volumen de aprovechamiento de las planchas brutas de corcho y los impactos generados por la actividad.

Atendiendo a los impactos generados por los propios procesos de mecanizado y postratamiento de los tapones, debemos concluir que si bien el impacto generado para diferentes metodologías y para diferentes diámetros es similar por cada kg de corcho neto producido, el impacto de los tapones de mayor diámetro será a su vez también mucho mayor debido a que el volumen de dichos tapones es también considerablemente superior (más precisamente un 17,36% mayor).



## 7. Futuras líneas de investigación

---

## 7. Futuras líneas de investigación

En la actualidad, el corcho sigue siendo uno de los cierres preferidos por los bodegueros para la conservación de vinos y espumosos.

Debido a la escasez de materia prima y al coste de los tapones, en los últimos años han surgido alternativas a los tapones de corcho natural como son los tapones sintéticos o los aglomerados y microgranulados.

En todo caso, cualquier cierre debe cumplir con una serie de características comunes:

- Elasticidad. >El diámetro del tapón de corcho es, por término general, mucho mayor que el diámetro interno del cuello de la botella. El tapón debe ajustarse perfectamente al cuello de la botella de la botella.
- Debe permitir la extracción suave del tapón
- No debe romperse en la extracción del citado tapón.
- Debe ser inerte química y biológicamente.
- Debe permitir el intercambio de gases con la atmósfera exterior a la botella para que pueda lograrse el envejecimiento y evolución de los vinos (Silva et al. 2003).

El corcho tiene unas propiedades que lo caracterizan y que lo hacen especialmente interesante. Entre estas, podemos destacar la compresibilidad y recuperación elástica. Estas características le permiten reducir su diámetro en el proceso de cerrado de la botella manteniendo suficiente presión sobre el vidrio para evitar la fuga del vino del interior.

Sin embargo, el uso de tapones de corcho implica la aparición de varios problemas.

El primero de ellos radica en su heterogeneidad. (Karbowski et al. 2010) que dificulta la posibilidad de obtener tapones idénticos a partir de una materia prima diferente por su propio origen vegetal.

Por otro lado, los tapones de corcho presentan otros problemas como la presencia de tricloroanisoles (TCA) (Chatonnet et al. 2003) que aportan aromas negativos al vino que entra

en contacto con el tapón contaminado o la permeabilidad a gases que, si bien es necesaria para la crianza del vino, en exceso puede provocar la oxidación de dicho vino (Brajkovich et al. 2005).

Ante esta situación, si bien el corcho natural se sigue utilizando de forma recurrente para el cierre de botellas de vino y espumosos, han aparecido nuevas tecnologías que se encuentra en la actualidad diferentes posibilidades (Silva et al. 2003) sin embargo, el corcho natural se sigue utilizando en gran cantidad.

Existen diferentes tipos de tecnologías destinadas a reducir o eliminar la contaminación por TCA. Por un lado y puesto que existen determinados microorganismos presentes en el corcho que por reacción de biometilación de triclorofenoles a tricloroanisoles actúan como responsables de la aparición de metabolitos que son el origen de los compuestos como el TCA, la eliminación y/o reducción de estos microorganismos contribuirán a la disminución del defecto de contaminación.

En todo caso, si el compuesto ya se ha formado no tendrán efectividad, por lo que las técnicas destinadas a este efecto, si bien pueden ser adecuadas a nivel preventivo, son ineficientes como medida correctiva.

Por otro lado, tenemos un grupo de técnicas dirigidas a eliminar o reducir la presencia de TCA en sí misma, siendo aquellas basadas en la aplicación de vapor sobre las planchas de corcho o sobre los propios tapones terminados, las más habituales en la industria corchera.

La aplicación de los tratamientos citados, implica un cambio en el análisis de ciclo de vida realizado afectando tanto al inventario como también al aprovechamiento de corcho bruto.

Por otro lado, también implica una variación de la geometría, las características mecánicas y de las características organolépticas de los tapones de corcho.

En función de lo anterior y a partir de las investigaciones ya desarrolladas y las conclusiones de la presente tesis, se abren varias líneas de investigación relacionadas algunas de las cuales actualmente se encuentra en fase de desarrollo investigador.

Dentro de dichas líneas, las más destacables son las siguientes:

1. Análisis de ciclo de vida asociado a la fabricación de tapones de corcho de grandes dimensiones para vinos espumosos, licores o formatos especiales de vinos tranquilos.
2. Análisis de la influencia de los tratamientos higienizantes, basados en vapor, así como en otras tecnologías, tanto sobre las características mecánicas como sobre las características organolépticas de los tapones de corcho.
3. Análisis del ciclo de vida social asociado a la fabricación de tapones de corcho natural.

En la actualidad, parte de estas investigaciones ya han sido desarrolladas encontrándose en estadio de publicación de los resultados obtenidos tal y como queda reflejado en el capítulo 9 de la presente tesis doctoral.

El resto de las líneas y aspectos de investigación reseñados, serán desarrollados conforme a las circunstancias y disponibilidades de los investigadores participantes.

## 8. Referencias

---

## 8. Referencias

1. Dehane B Caracterización del crecimiento y de la calidad de corcho de los alcornoques del Noroeste de Argelia (región de Orán). Revista Ecosistemas 28 (1):97-105.(2019). doi:
2. MAPA (2017) Annual Statistics of other forest uses-Estadística Anual de otros aprovechamientos forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España - Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Spain
3. Pereira H (2007) Cork: Biology, Production and Uses. 1° edition edn. Elsevier Science, Berlin, Germany
4. Silva A, Lambri M, De Faveri M Evaluation of the performances of synthetic and cork stoppers up to 24 months post-bottling. European Food Research and Technology 216 (6):529-534.(2003). doi:
5. Chatonnet P, Labadie D, Boutou S Study of chloroanisoles assay and tca assay validation in wine and cork stoppers soaked in dilute alcohol solution using SIDA-HSSPME-GC-MS/EI-SIM. OENO One 39 (3):137-147.(2005). doi:
6. Brajkovich M, Tibbits N, Peron G, Lund CM, Dykes SI, Kilmartin PA, Nicolau L Effect of screwcap and cork closures on SO2 levels and aromas in a Sauvignon blanc wine. Journal of agricultural and food chemistry 53 (26):10006-10011.(2005). doi:
7. Conde E, Cadahía E, García-Vallejo MC, Fernández de Simón B, González Adrados JR Low molecular weight polyphenols in cork of Quercus suber. Journal of agricultural and food chemistry 45 (7):2695-2700.(1997). doi:
8. Mazzoleni V, Caldentey P, Silva A Phenolic compounds in cork used for production of wine stoppers as affected by storage and boiling of cork slabs. American journal of enology and viticulture 49 (1):6-10.(1998). doi:
9. Benito Lázaro D Revisión y desarrollo de modelos de clasificación del corcho en plancha.(2014). doi:

10. Sánchez-González M, Pérez-Terrazas D Assessing the percentage of cork that a stopper should have from a mechanical perspective. *Food Packaging Shelf Life* 18:212-220.(2018). doi:10.1016/j.fpsl.2018.10.009
11. Sánchez-González M, Pérez-Terrazas D Dataset of mechanical properties from different types of wine stopper: Micro-agglomerated, natural cork and synthetic. *Data Brief* 21:2103-2109.(2018). doi:10.1016/j.dib.2018.11.051
12. Garza JAV, Caballero HS El corcho, un material irremplazable. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* (28):48-51.(2003). doi:
13. Liu D, Xing RR, Li Z, Yang DM, Pan QH Evolution of volatile compounds, aroma attributes, and sensory perception in bottle-aged red wines and their correlation. *Eur Food Res Technol* 242 (11):1937-1948.(2016). doi:10.1007/s00217-016-2693-1
14. Reynolds D, Rahman I, Bernard S, Holbrook A What effect does wine bottle closure type have on perceptions of wine attributes? *International Journal of Hospitality Management* 75:171-178.(2018). doi:10.1016/j.ijhm.2018.05.023
15. Rives J, Fernandez-Rodriguez I, Rieradevall J, Gabarrell X Environmental analysis of raw cork extraction in cork oak forests in southern Europe (Catalonia--Spain). *Journal of environmental management* 110:236-245.(2012). doi:10.1016/j.jenvman.2012.06.024
16. Rives J, Fernandez-Rodriguez I, Rieradevall J, Gabarrell X Integrated environmental analysis of the main cork products in southern Europe (Catalonia – Spain). *Journal of Cleaner Production* 51:289-298.(2013). doi:10.1016/j.jclepro.2013.01.015
17. Rives J, Fernandez-Rodriguez I, Gabarrell X, Rieradevall J Environmental analysis of cork granulate production in Catalonia – Northern Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 58:132-142.(2012). doi:10.1016/j.resconrec.2011.11.007

18. Demertzi M, Silva RP, Neto B, Dias AC, Arroja L. Cork stoppers supply chain: potential scenarios for environmental impact reduction. *Journal of Cleaner Production* 112:1985-1994.(2016). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.072>

19. Karbowiak T, Mansfield A, Barrera-García, V.D., Chassagne D. Sorption and diffusion properties of volatile phenols into cork. *Food Chemistry*. Vol. 122, Issue 4, 2010. Pag. 1089-1094. ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.089>.



## 9. Publicaciones científicas

---

## 9. Publicaciones científicas

### 9.1. Publicación 1

**TÍTULO:** 2-piece cork stoppers as alternative for valorization of thin cork planks: Analysis by LCA methodology

**AUTORES:** Flor-Montalvo, F.J., Ledesma, A.S.-T., Cámara, E.M., (...), García-Alcaraz, J.L., Blanco-Fernandez, J.

**REVISTA:** Foods **ISSN:** 2304-8158

**AÑO:** 2021 **Nº:** 10(4),873

**DOI:** 10.3390/foods10040873

**FACTOR DE IMPACTO JCR:** 5.561 (Q1)

**CATEGORÍA:** FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY



Article

## 2-Piece Cork Stoppers as Alternative for Valorization of Thin Cork Planks: Analysis by LCA Methodology

Francisco Javier Flor-Montalvo <sup>1,\*</sup>, Agustín Sánchez-Toledo Ledesma <sup>1</sup>, Eduardo Martínez Cámara <sup>2</sup>, Emilio Jiménez-Macías <sup>3</sup>, Jorge Luis García-Alcaraz <sup>4</sup> and Julio Blanco-Fernandez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Higher School of Engineering and Technology, International University of La Rioja (UNIR), 26004 Logroño, La Rioja, Spain; agustin.sancheztoledo@unir.net

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of La Rioja, Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño, La Rioja, Spain; eduardo.martinez@unirioja.es (E.M.C.); julio.blanco@unirioja.es (J.B.-F)

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, University of La Rioja, Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño, La Rioja, Spain; Emilio.jimenez@unirioja.es

<sup>4</sup> Department of Industrial Engineering and Manufacturing, Autonomous University of Ciudad Juárez, Ciudad Juárez CHIH 32315, Mexico; jorge.garcia@uaej.mx

\* Correspondence: franciscojavier.flor@unir.net; Tel.: +34-640-522-344



**Citation:** Flor-Montalvo, F.J.; Ledesma, A.S.-T.; Cámara, E.M.; Jiménez-Macías, E.; García-Alcaraz, J.L.; Blanco-Fernandez, J. 2-Piece Cork Stoppers as Alternative for Valorization of Thin Cork Planks: Analysis by LCA Methodology. *Foods* **2021**, *10*, 873. <https://doi.org/10.3390/foods10040873>

**Academic Editors:**  
Susana Guzmán-Puyol, José Jesús Benítez and José Alejandro Heredia-Guerrero

Received: 10 February 2021  
Accepted: 13 April 2021  
Published: 16 April 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** Natural stoppers are a magnificent closure for the production of aging wines and unique wines, whose application is limited by the availability of raw materials and more specifically of cork sheets of different thickness and quality. The growing demand for quality wine bottle closures leads to the search for alternative stopper production. The two-piece stopper is an alternative since it uses non-usable plates in a conventional way for the production of quality caps. The present study has analyzed the impact of the manufacture of these two-piece stoppers using different methodologies and for different dimensions by developing an LCA (Life Cycle Assessment), concluding that the process phases of the plate, its boiling, and its stabilization, are the phases with the greatest impact. Likewise, it is detected that the impacts in all phases are relatively similar (for one kg of net cork produced), although the volumetric difference between these stoppers represents a significant difference in impacts for each unit produced.

**Keywords:** life cycle assessment; cork stoppers; thin cork planks; valorization

### 1. Introduction

#### 1.1. The Cork Oak

The cork oak is a tree that belongs to the *Quercus* genus; hence, its name *Quercus suber* L. It is a tree with green leaves throughout the year that, for an adult specimen, has an average height of between 10 and 15 m and a diameter between 0.3 and 1 m [1,2]

The cork oak is a species associated with the Mediterranean Sea. The climate is dry in summer, with high temperatures and little rainfall, while winters have mild temperatures and abundant rainfall, although they tend to be irregular, alternating periods of great abundance of water with others of drought [3].

Within the Mediterranean climate zones, the cork oak is more common in those areas with a great oceanic influence that favors a damping of both the effects of drought and temperature. This fact, combined with the great light needs of the cork oak, determine the presence of this arboreal species in very specific areas. Likewise, it is a species that does not proliferate outside the areas and conditions outlined, which makes cork a unique, scarce and valuable product [4]. In these forests it can be found both as a min tree species and together with other Mediterranean trees [5].

The bark of the cork oak is very thick, grayish in color, and usually cracked. During the “saca” or extraction of the cork, the trunk without the bark presents a reddish-yellowish color [6,7]. The main use of the cork oak is the product known as cork. Cork is the bark

of the cork oak and has peculiar characteristics, among which are its lightness, flexibility, high coefficient of friction, impermeability, which, provided that it is natural, recyclable, and renewable, makes it a very interesting material for various applications [7,8].

### 1.2. The Cork Manufacture

Modern cork manufacture dates back to the mid-18th century. Initially, and until the end of the 19th century, it was a business destined to the wine sector and more specifically to the manufacture of cork stoppers for still and sparkling wines.

The stoppers manufactured were in any case natural stoppers made from cork sheet. At the beginning of the 20th century, and faced with the impossibility of meeting the demands for stoppers for closing wines and sparkling wines, new products appeared, among which the agglomerated cork stopper stands out. The main advantage of these stoppers was the possibility of manufacturing them from cork sheets that, due to their thickness and geometry, could not be used to obtain natural stoppers, which allowed increasing the number of stoppers available on the market.

The effect of the appearance of the agglomerate had two immediate consequences in the productive manufacturing structures. In the first place, the great cork transforming powers during the 19th century, Spain and to a lesser extent Portugal, reduced their weight with the entry of new competitors. This led to a reindustrialization of the cork sector in Spain and to a lesser extent in Portugal [9,10]. On the other hand, the demand for cork for non-oenological uses, although it primarily used thin cork (also known as branch cork), it also diverted part of the cork traditionally used for the manufacture of natural stoppers, reducing the availability of this type of stoppers [11]. Currently, Spain and Portugal account for more than 80% of the cork extracted (Portugal exports 62.4% of all the cork in the world, followed by Spain with 18.5% according to 2017 data) and more than 60% of the world's cork oak area available.

Although in the last 4 years the vineyard area in the world has experienced a decrease, the wine area in 2018 stabilized at around 7.4 million hectares and the volume of exports from all countries reached a volume of 108.0 M hL and a value of EUR 31 300 M. Of these, bottled wines accounted for 53% of the total international wine trade by volume, although these bottled wines represent 70% of all exported wines in terms of total economic value [11].

Based on the foregoing, it can be deduced how the market is being segmented into wines of increasing quality and usually associated with careful and/or unique aging, while the weight of lower added value wines, usually associated with the bulk sales, decreases.

### 1.3. The Natural Stopper and the Two-Piece Natural Stopper

Based on the data presented, it is evident that, although the natural stopper is a magnificent closure for the production of aging wines and singular wines, only those stoppers of high quality and usually associated with wines of medium and high categories are accepted by the current market.

There are serious limitations regarding the total annual cork production and its recurrence that, together with the development of new substitute products for both cork (agglomerate, technical stopper, microgranulates, etc.) and other materials (polymeric closures, screw cap, etc.) has made many products migrate to this type of closures.

In any case, and in the face of a growing market for quality and bottled wines, the demand for high-end stoppers is greater, although the supply cannot be increased.

Nor would an adequate forestry policy allow a substantial increase in the amount of cork available in the medium term due to the long maturation period of the cork oak forest before producing its first extraction of cork useful for the wine sector.

Under these circumstances, the opportunity arises to manufacture two-piece stoppers from cork sheets that are less thick and which cannot be used to make one-piece stoppers.

A two-piece stopper is a stopper made up of two semi-cylindrical halves glued together in the middle.

It maintains the main characteristics of the natural one-piece stopper, at a slightly lower cost and with some additional advantages:

- Greater use of raw materials in the production of high added value caps.
- Less expensive raw materials and the absence of supply problems when competing for their acquisition with other products with lower added value.
- Greater availability of raw materials in the market by competing only with low value-added processes (cork rolling and cork crushing to agglomerate/microgranulate).
- Branch cork, since it is far from the traditional sources of cork contamination (it is far from humidity, the main cause of the appearance of 2,4,6-Trichloroanisole—TCA—main cause of olfactory defects in wine associated with the use of cork stoppers), which implies lower levels of contamination than conventional cork [12].
- Density and mechanical capacities of the stoppers manufactured with this process, is much higher than those manufactured by conventional processes (“thin” cork has the same number of cell walls for years of growth, but since its thickness is much smaller, the number of cell walls per linear cm is much higher).
- When working with base plates of less thickness (22% of the thickness required for the perforation of a conventional stopper), it is much easier to treat said plates in depth using heat treatments and minimize the appearance of TCA.

However, since the manufacturing process is different from that used to produce 1-piece stoppers, the manufacturing impact of this type of two-piece stoppers will also be substantially different.

#### 1.4. Research Context

There exist Life Cycle Assessments associated with the stopper manufacturing phases [13–15], which carry out an exhaustive analysis in order to assess the environmental impacts derived from the production of natural cork stoppers in Portugal, in addition to identifying the stages and processes to suggest improvement actions and alternative scenarios, as well as LCA environmental impact analysis for the production of natural cork stoppers [13,16], granules [17], or for champagne bottles [18]. However, the impact of this (two-piece) type of manufacturing process has not been analyzed, which, as it has been indicated, would allow the market to supply high quality stoppers with excellent properties without the limitations associated with the current availability of cork.

In order to complement the information available regarding the Life Cycle Analysis of two-piece cork stoppers, an environmental study is carried out for the manufacture of two-piece natural cork stoppers in the most common dimensions demanded by the market and independently analyzing the different production methods that exist today: drilling and turning.

All the processes will be analyzed from the reception of the raw cork sheet to the achievement of the finished and personalized cork stoppers, ready to be used in the winery to close the wines.

To obtain the primary data, 10 batches of stoppers were measured on the manufacturing process for each type of cap, analyzing diameter, and length.

In the case of caps of the same diameter, the analysis of the initial phases up to the initial cutting of the plate has been carried out jointly.

#### 1.5. Justification and Object of the Research

Based on the above, it is evident that there is a growing demand for cork stoppers for aging wines at the same time that the production of quality natural stoppers does not grow in quantity and even decreases with the use of large volumes of cork for manufacturing microgranulated or agglomerated stoppers.

The increase in the availability of raw cork results, as explained above, in a very long process that involves silvicolous work for several decades.



On the other hand, a thick cork sheet is necessary to be able to produce cork stoppers, those with insufficient thickness being used for the production of agglomerated or microgranulated stoppers, for the production of washers or for other productive sectors.

Based on the foregoing, the two-piece stopper is an acceptable alternative given that it makes it possible to take advantage of the cork with less thickness and produce stoppers that are very similar to the one-piece stopper maintaining a large part of its added value. (Figure 1).



**Figure 1.** Perforated cork sheet to obtain one-piece stoppers on the left and 2 thin cork sheets glued together to achieve the same useful thickness and manufacture two-piece stoppers on the right.

However, the production process is different and includes additional phases, so, consequently, its environmental impact will also be different, being the object of this study to determine the comparative impact of the manufacture of two-piece stoppers for different diameters and lengths, and production system.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Objectives and Scope

In this article, a gate to gate analysis has been carried out for 2 different geometries 24 and 26 mm diameter and 44 mm length and for 2 different production processes, turning process and drilling (perforating) process, considering all the production processes.

For each of these production processes, primary data has been obtained for each of the processes, measuring directly on each of the workstations, the consumption of materials and water, the working times, as well as the waste produced, and their destinations and use.

Real measurements have been taken for each of the processes, thus obtaining primary data on material consumption, working hours, electricity and water consumption, as well as all the other data mentioned in the document.

There are two different objectives throughout this research:

- to identify differences between different processes and geometries.
- to identify the critical activities of the production process.

In this way, this study will allow the detection of the critical stages of the production process and the identification of the evolution of the impact of the activity throughout the production activity.

The production process analysis required the use of Simapro 8.3 software and the CML-IA baseline V3.04/EU25 calculation methodology.

For the analysis of the production process, the Simapro 8.3 software and the CML-IA baseline V3.04/EU25 calculation methodology have been used. The following impact categories have been selected:

- Abiotic Depletion (AD);
- Global Warming-GWP100 (GW);
- Ozone layer depletion (OLD);
- Human toxicity (HT);
- Fresh water aquatic ecotoxicity (FWAE);
- Marine aquatic ecotoxicity (MAE);
- Terrestrial ecotoxicity (TE);
- Photochemical oxidation (PO);
- Acidification (AC);
- Eutrophication (EU).

### 2.2. Functional Unit

After the analysis carried out, a kg of fully processed and marked 2-piece stoppers has been defined as the functional unit for the present study, including the post-treatment and packaging processes.

### 2.3. System Limits

The production processes have been divided into three main blocks:

- initial operations to be carried out on raw cork sheet;
- machining operations to obtain raw stoppers;
- post-treatment and customization and packaging operations.

The limits of the system have been defined so that they include all the activities and processes necessary for the manufacture of finished stoppers and consequently to allow obtaining the functional unit. This includes all the processes necessary for the transformation of unsorted raw plates into packaged finished stoppers (see Figure 2).

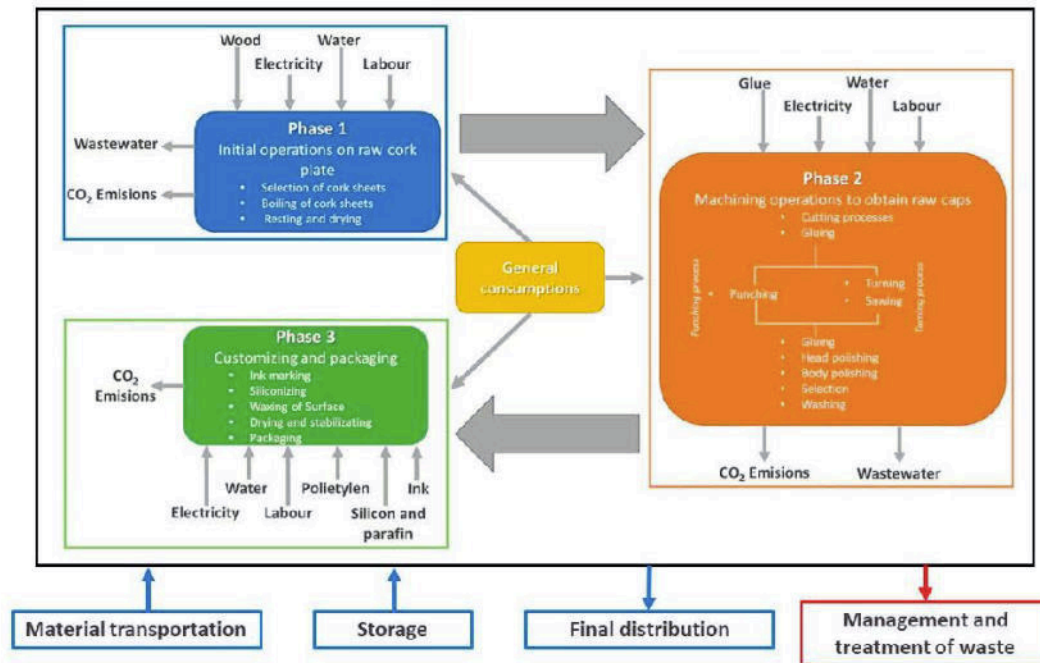
Based on the above, the following activities have been considered within the limits of the system:

- Electricity consumption of all equipment and machines used in the production process.
- Labor and associated emissions.
- Consumption of materials throughout the production process.
- Consumption of other resources throughout the production process.
- Complete packaging of the functional unit.
- Recovery of by-products and cork waste for other applications with economic return.

It is specified that the following activities are specifically excluded from the production process:

- The transport of raw materials, whatever their origin, to the production plant.
- Installation and dismantling of production plant.
- Maintenance of machinery and process facilities.
- Management and treatment of waste produced in the process.
- Storage and transportation of finished product to customer facilities.





**Figure 2.** System limits The flowchart displays processes relations and consumption of material, energy, water, and other consumption flows and has been elaborated according to the reality of material, energy, water, and other consumption flows, and these depend on the existing production process [19,20].

#### 2.4. Assumptions

The following aspects will be taken into account with respect to the analyzed process:

- Lot characteristics: Raw cork platform. Average load 365 kg/platform.
- Number of batches studied: for each process analyzed and each dimension and diameter, 10 batches were considered, each consisting of a raw cork platform.
- Cork density: the average density of the worked cork has been 191.37 kg/m<sup>3</sup>,
- Volume of caps: 1.99051E-05 m<sup>3</sup>/stopper for diameter 24 mm and length 44 mm. and 2.33609E-05 m<sup>3</sup>/stopper for diameter 26 mm and length 44 mm.
- Production staff: eight-hour production shift per day and five working days per week.

#### 2.5. Inventory

After a detailed analysis of the production process (Figure 3), it has been segmented into three main blocks of processes:

- initial operations to be carried out on raw cork sheet;
- machining operations to obtain raw caps;
- post-treatment and customization and packaging operations.

Next, Tables 1–4 show the summary of the inventory for each of the phases and each of the types of stoppers analyzed.





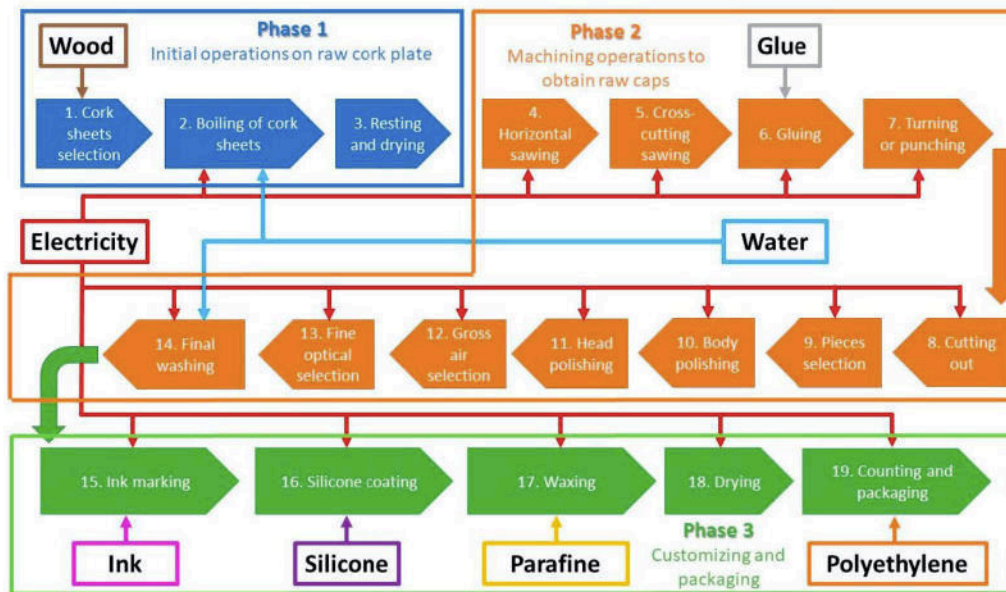


Figure 3. Flowchart.

Table 1. Consumptions for 1000 kg raw material used to produce 2-piece stoppers with dimensions of 24 × 44—Drilled (Perforated) method.

	2-Piece Cork 24 × 44—Perforated		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Raw material (kg)	99.6	798.5229723	-0.642434486
Water (kg)	2961.150685	234.818468	0
Energy (kWh)	394.0489893	339.7169957	4.757206185
Workforce (h)	16.47945205	54.0239726	3.034218613
Glue (kg)	0	6.1983	0
Silicone (kg)	0	0	0.106978801
Paraffin (kg)	0	0	0.535455685

Table 2. Consumption for 1000 kg raw material used to produce 2-piece stoppers with dimensions 26 × 44—Drilled (Perforated) method.

	2-Piece Cork 26 × 44—Perforated		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Raw material (kg)	173.5	734.8957104	-0.492139253
Water (kg)	2961.150685	179.9068018	0
Energy (kWh)	394.0070381	297.2638903	3.801867111
Workforce (h)	16.47945205	54.0239726	2.728139794
Glue (kg)	0	6.1983	0
Silicone (kg)	0	0	0.081962096
Paraffin (kg)	0	0	0.410177157

**Table 3.** Consumptions for 1000 kg raw material used to produce 2-piece stoppers with dimensions of 24 × 44—Turning method.

	2-Piece Cork 24 × 44—Turned		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Raw material (kg)	103.3	799.1195475	−4.939009633
Water (kg)	3281.575342	224.9152031	0
Energy (kWh)	419.7903808	397.2961628	4.556575146
Workforce (h)	15.21917808	23.1369863	0.228126727
Glue (kg)	0	6.1983	0
Silicone (kg)	0	0	0.102467063
Paraffin (kg)	0	0	0.512873306

**Table 4.** Consumptions for 1000 kg raw material used to produce 2-piece stoppers with dimensions of 26 × 44—Turning method.

	2-Piece Cork 26 × 44—Turned		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Raw material (kg)	157.9	743.6385754	−4.058037613
Water (kg)	3281.575342	193.3739137	0
Energy (kWh)	419.7607708	327.4015667	4.256729013
Workforce (h)	15.21917808	23.1369863	0.230178959
Glue (kg)	0	6.595	0
Silicone (kg)	0	0	0.088097455
Paraffin (kg)	0	0	0.440881397

The consumption in each phase has been considered for a process input of 1000 kg of raw cork. The difference between the entrance of raw cork and the consumptions of each phase will correspond to the net use destined to the manufacture of stoppers. The negative values in phase 3 correspond to the reclassification of stoppers and material initially discarded and that later is reprocessed.

#### 2.5.1. Phase 1: Initial Operations to Be Carried Out on Raw Cork Sheet

**Selection of cork sheets:** The raw sheets sent after the cork extraction process must be selected. Those plates that present contamination that could significantly affect the stoppers (green, pitted, earth, rot, yellow stain, etc.) will be eliminated.

Those plates that do not meet the appropriate dimensional criteria for the planned production process are also segregated.

**Boiling of cork sheets:** Selected raw sheets undergo a hot water boiling process with or without the addition of phenolic additives.

**Additive:** Sometimes they also receive a steam treatment in order to improve their organoleptic conditions.

Through this process it is possible to sanitize the plate minimizing the subsequent appearance of problems and transfers of odors and flavors while achieving a significant improvement in the mechanical properties of the treated plates by homogenizing the presence of water in the microstructure of the cork and with it its mechanical behavior. By hydrating the iron, an increase of close to 20% in its volume is achieved (once the excess supply water has been eliminated), substantially increasing its elasticity and softness.

**Resting and drying:** Once the plates have been cooked, they must be left to rest in order to eliminate excess moisture until reaching approximately 14% and to stabilize their structure. Although this process has a minimum duration of 15 days, depending on the characteristics of the cork and its specific state, it can take much longer, sometimes reaching several months.

Drying and resting will be carried out under cover but in an open pavilion that allows the air circulation.



Artificial drying processes are not recommended for treating cork.

#### 2.5.2. Phase 2: Machining Operations to Obtain Raw Caps

In this phase, the raw cork sheets are machined to obtain cylindrical stoppers with the required dimensions.

There are two main and different manufacturing processes that have been analyzed throughout this paper:

- Manufacture of perforated stoppers.
- Manufacture of turned stoppers.

In the case of the manufacture of perforated stoppers, the cross-cutting of cork sheets is initially carried out.

After that, the “belly” or inner surface of the cork oak bark will be removed, thus achieving a flat and polished surface, suitable for gluing.

Once this cut has been made, two pieces will be glued, keeping them in a press with pressure and temperature for 24 h.

After finishing the gluing process, the glued strips are subjected to a drilling process and subsequent operations (parting, head polishing, body polishing, selection, etc.) in a similar way to the process carried out in the manufacturing process of a 1-piece stopper.

In the case of turned plugs, the main difference is that, after obtaining strips from the raw plate, two cuts are made to each strip, eliminating the “belly” but also the “back” (outer part of the bark of the cork oak) from cork.

After that, the strips obtained are glued by means of a press with pressure and temperature input and, after 24 h of stabilization of the glue, the glued strips are extracted from the press and turned into bars.

The bars are cut into plugs using a multiple cutter, after which cylindrical plugs are obtained that are subjected to the rest of the usual processes mentioned above (head polishing, body polishing, selection, etc.).

#### 2.5.3. Phase 3: Post-Treatment and Customization and Packaging Operations

In this last block, raw stoppers with the desired size are started and they are subjected to the processes aimed at their organoleptic and aesthetic conditioning as well as their personalization.

**Ink marking:** Although it is possible to mark the caps with fire or ink, given that the market is increasingly inclined towards ink marking of caps, this process has been considered. Through a continuous rotary marker, the stoppers receive the desired impression on the body. The decoration of the heads is not usual since they will be in contact with the wine.

**Siliconizing:** In this phase, a liquid silicone film will be applied to the surface of the stopper, improving its tightness and ensuring that the stopper does not deteriorate over the years in contact with the wine.

This process is carried out in a perforated rotary drum with temperature control.

**Waxing of surface:** The stoppers receive a layer of paraffin in order to ensure that the removal of the stopper is adequate and does not involve excessive effort. This process is carried out in a rotating drum with temperature control.

**Drying and stabilizing:** once the silicone and waxing processes are finished, the caps are dried and stabilized to avoid possible biological contamination.

**Packaging:** The finished caps are packed in Polyethylene bags with an oxidizing gas (SO<sub>2</sub>) in order to avoid eventual contamination of the caps until they are used.

### 3. Results

Throughout this work, a LCA has been carried out in order to identify the main environmental impacts associated with the manufacture of two-piece natural cork stoppers from thin sheet cork.



For this, a gate-to-gate approach has been considered, thus analyzing all the environmental impacts of the production process for stoppers of 24 and 26 mm diameter and 44 mm lengths and through drilling and turning technologies for each of the cases.

To carry out the mentioned LCA, SimaPro 8.3 software was used and the CML-IA baseline V3.04/EU25 methodology was applied to calculate the environmental impact.

For the present case, the proposed functional unit has been 1 kg of fully processed and marked two-piece stoppers, including post-treatment processes and packaging.

The closure manufacturing activities have been divided into three different phases, for which all the impact categories have been determined.

To facilitate the understanding of the results obtained, the global impact of the product is first shown, and subsequently, for each of the proposed plug manufacturing geometries and methodologies, the impacts for each of the phases analyzed are presented.

### 3.1. Global Analysis of the Environmental Impact

The results obtained for each of the impact categories studied and associated with the different geometries and productive methodologies proposed can be seen in Table 5.

**Table 5.** Global impact for each geometry and production methodology, by impact categories.

		24 × 44 2P	26 × 44 2P	24 × 44 2P	26 × 44 2P
		Perforated	Perforated	Turned	Turned
Abiotic depletion	kgSb eq	0.002735461	0.002731983	0.003004334	0.00299546
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	10690.65995	10545.34663	11749.76879	11510.02109
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	977.7305994	963.2864969	1076.812504	1052.989073
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.000102725	0.000100916	0.00011299	0.000110023
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	490.8382666	485.8388178	540.5864976	532.2016483
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	526.3757405	521.1066613	580.335491	571.7369036
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	1534271.083	1510568.815	1693274.685	1654770.983
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	8.938554382	8.890603038	9.803742104	9.725492703
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.37385754	0.369816267	0.404236078	0.397468484
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	5.719579397	5.605312106	6.306237612	6.119246576
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	2.247685829	2.225486034	2.476569152	2.440110841

A detailed analysis of these data drives to affirm that the manufacturing processes of stoppers by turning generate, for all categories, greater impacts than the traditional turning system.

On the other hand, the geometries of stoppers with a diameter of 26 generate slightly lower impacts than those produced by the manufacture of stoppers with a diameter of 24 mm. However, this effect is much lighter than that associated with the different cap manufacturing methodologies.

### 3.2. Analysis of the Impacts Generated in Stage 1 for Each of the Geometries Studied

Stage 1 is composed of three processes: Cork sheets selection, Boiling of cork sheets, and Resting and Drying.

Table 6 shows the impacts generated by these activities for each of the stopper geometries under study.

Based on the previous data, it is concluded that, since the process so far is similar and the same raw plates are processed, the results obtained at this stage are very similar, yielding very similar results and only differentiated by the suitability of each piece of cork for the process and the geometries chosen.

Subsequently, once the selection of plates based on the geometry as well as their machining begins, those values will change substantially.

**Table 6.** Impact of stage 1 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece drilling-perforated stoppers, of 24 mm in diameter and 44 mm in length.

		Cork Sheets Selection	Boiling of Cork Sheets	Resting and Drying	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	$7.659 \times 10^{-6}$	0.00253652	$8.9472 \times 10^{-6}$	0.00255313
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	210.954269	8703.63077	152.098393	9066.68343
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	15.0859119	807.818226	14.7224994	837.626637
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$2.6202 \times 10^{-6}$	$8.0286 \times 10^{-5}$	$1.8379 \times 10^{-6}$	$8.4744 \times 10^{-5}$
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	2.49657001	428.496627	5.32512908	436.318326
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	2.63458208	470.790845	5.22994656	478.655374
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	2388.83562	1300467.37	23257.8208	1326114.03
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	0.50703198	7.95327691	0.04743803	8.50774692
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.07623872	0.25029771	0.00427678	0.33081321
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.08352229	4.48663646	0.1138804	4.68403916
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.02217068	1.99490029	0.0223638	2.03943478

### 3.3. Analysis of the Impacts Generated in Stage 2 for Each of the Geometries Studied

Stage 2 in the case of turned stoppers consists of 11 processes during which the raw plate is converted into machined and finished stoppers, although not yet customized or subjected to the finishing processes.

For the present study, the manufacture of these stoppers has been analyzed using drilling technology and turning technology.

Tables 7 and 8 show the impacts generated by this phase, breaking down the impacts of each of the activities for the manufacture of perforated stoppers of 44 mm in length and 24 and 26 mm in diameter respectively.

From the comparison of the impacts generated by the caps of 24 mm and 26 mm in diameter and 44 mm in length, a significant reduction in such impacts in all categories can be seen in this phase in those stoppers with a larger diameter.

This is due because, in the case of the perforated process, since the process analyzed works in excess thicknesses in the case of the manufacture of two-piece stoppers when working with thin plates, the raw plate and therefore the raw material necessary to obtain these stoppers is practically the same.

Despite the fact that the number of viable stoppers of 26 mm will be lower than those obtained for a diameter of 24 mm, the difference in useful volume of the cap and therefore the use of raw material and other inputs will be much greater, thus reducing the impacts generated by each kg of cork obtained.

In the case of perforated caps, stage 2 consists of 11 processes during which the raw plate is converted into machined and finished stoppers, although not yet customized or subjected to the finishing processes.

**Table 7.** Impact of stage 1 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece drilling-perforated stoppers, of 26mm in diameter and 44mm in length.

		Cork Sheets Selection	Boiling of Cork Sheets	Resting and Drying	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	$7.659 \times 10^{-6}$	0.00253651	$8.9472 \times 10^{-6}$	0.00255312
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	210.954269	8703.47757	152.098393	9066.53024
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	15.0859119	807.803397	14.7224994	837.611808
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$2.6202 \times 10^{-6}$	$8.0284 \times 10^{-5}$	$1.8379 \times 10^{-6}$	$8.4742 \times 10^{-5}$
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	2.49657001	428.491263	5.32512908	436.312962
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	2.63458208	470.785577	5.22994656	478.650106
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	2388.83562	1300443.95	23257.8208	1326090.6
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	0.50703198	7.95322913	0.04743803	8.50769914
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.07623872	0.2502934	0.00427678	0.3308089
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.08352229	4.48652176	0.1138804	4.68392445
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.02217068	1.99487777	0.0223638	2.03941225

**Table 8.** Impact of stage 1 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece turned stoppers, of 24 mm in diameter and 44 mm in length.

		Cork Sheets Selection	Boiling of Cork Sheets	Resting and Drying	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	$7.659 \times 10^{-6}$	0.00279323	$8.9472 \times 10^{-6}$	0.00280984
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	210.954269	9554.66708	152.098393	9917.71975
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	15.0859119	886.657521	14.7224994	916.465933
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$2.6202 \times 10^{-6}$	$8.8029 \times 10^{-5}$	$1.8379 \times 10^{-6}$	$9.2488 \times 10^{-5}$
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	2.49657001	470.925973	5.32512908	478.747672
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	2.63458208	517.560579	5.22994656	525.425108
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	2388.83562	1427495.77	23257.8208	1453142.43
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	0.50703198	8.75342614	0.04743803	9.30789615
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.07623872	0.27479557	0.00427678	0.35531107
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.08352229	4.91662543	0.1138804	5.11402812
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.02217068	2.19302971	0.0223638	2.23756419

Tables 9 and 10 show the impacts generated by this phase, breaking down the impacts of each of the activities for the manufacture of 44 mm long and 24 and 26 mm diameter perforated stoppers, respectively.

**Table 9.** Impact of stage 1 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece turned stoppers, of 26 mm in diameter and 44 mm in length.

		Cork Sheets Selection	Boiling of Cork Sheets	Resting and Drying	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	$7.659 \times 10^{-6}$	0.00279322	$8.9472 \times 10^{-6}$	0.00280983
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	210.954269	9554.55895	152.098393	9917.61162
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	15.0859119	886.647055	14.7224994	916.455466
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$2.6202 \times 10^{-6}$	$8.8028 \times 10^{-5}$	$1.8379 \times 10^{-6}$	$9.2486 \times 10^{-5}$
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	2.49657001	470.922187	5.32512908	478.743887
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	2.63458208	517.556861	5.22994656	525.42139
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	2388.83562	1427479.24	23257.8208	1453125.9
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	0.50703198	8.75339242	0.04743803	9.30786243
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.07623872	0.27479253	0.00427678	0.35530803
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.08352229	4.91654447	0.1138804	5.11394716
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.02217068	2.19301381	0.0223638	2.23754829

As in the previous case and for similar reasons, from the comparison of the impacts generated by the stoppers of 24 mm and 26 mm in diameter and 44 mm in length, a significant reduction in such impacts is observed at this stage in all the categories in those stoppers with a larger diameter.

However, in this case the comparison shows significantly lower differences than those obtained in the case of perforated stoppers.

The difference mainly lies in the fact that in the case of the turning process, the number of caps obtained from 1 kg of raw material is less than that obtained in the case of perforated stoppers, which dampens the effect associated with the diameter and the use of material depending on it.

#### 3.4. Analysis of the Impacts Generated in Stage 3 for Each of the Geometries Studied

Stage 3, the objective of which is the application of final surface treatments, the customization of the stoppers and its packaging, is made up of 5 different processes: ink marking, silicone coating, waxing, drying, and counting and packaging.

Tables 11–14 show the impacts generated by these activities for each of the stopper geometries under study.



Table 10. Impact of stage 2 broken down by activities for the manufacturing process of two-piece perforated caps of 24 mm diameter and 44 mm in length.

d	Horizontal Sawing		Cross-Cutting Sawing		Gluing	Punching	Cutting Out	Pieces Selection
	kg Sb eq	MI	kg Sb eq	MI				
Abiotic depletion (fossil fuels)	9.79204 × 10 <sup>-7</sup>	1.41377 × 10 <sup>-6</sup>	0.000164296	1.09573 × 10 <sup>-6</sup>	2.75878 × 10 <sup>-7</sup>	1.58861 × 10 <sup>-6</sup>		
Global warming (GWP100a)	16.64600967	24.0350876	1355.887713	18.62693063	4.689795459	27.00562884		
Ozone layer depletion (ODP)	1.611265337	2.326344894	116.5679459	1.803010346	0.45395293	2.61403905		
Human toxicity	2.01144 × 10 <sup>-7</sup>	2.90411 × 10 <sup>-7</sup>	1.49206 × 10 <sup>-5</sup>	2.2508 × 10 <sup>-7</sup>	5.66696 × 10 <sup>-8</sup>	3.26325 × 10 <sup>-7</sup>		
Fresh water aquatic ecotox.	0.582794785	0.841439111	45.93881528	0.652148968	0.164194806	0.945496246		
Marine aquatic ecotox.	0.572377785	0.826399046	39.33888883	0.640492317	0.161259953	0.928596242		
Terrestrial ecotoxicity	2545.391196	3675.035809	170901.8665	2848.299754	717.1306705	4129.511593		
Photochemical oxidation	0.005191731	0.007495821	0.350752412	0.005809561	0.001462702	0.008422797		
Acidification	0.000468061	0.000675786	0.036215966	0.000522761	0.00013187	0.000759358		
Eutrophication	0.012463342	0.017994573	0.855607705	0.013946514	0.003511383	0.020219884		
Body polishing	0.002447548	0.003533769	0.172616166	0.002738812	0.000689565	0.003970775		
Head polishing							Total	
Gross air selection								
Fine optical selection								
Final washing								
Abiotic depletion (fossil fuels)	2.52933 × 10 <sup>-7</sup>	3.23329 × 10 <sup>-7</sup>	2.1573 × 10 <sup>-7</sup>	1.95948 × 10 <sup>-7</sup>	6.68326 × 10 <sup>-6</sup>	0.00017782		
Global warming (GWP100a)	4.29973755	5.4396440505	3.667317676	3.331027511	109.2488265	1572.882936		
Ozone layer depletion (ODP)	0.416196927	0.532032856	0.354981282	0.322429776	10.57044332	137.5726375		
Human toxicity	5.19563 × 10 <sup>-8</sup>	6.64167 × 10 <sup>-8</sup>	4.43144 × 10 <sup>-8</sup>	4.02508 × 10 <sup>-8</sup>	1.31696 × 10 <sup>-6</sup>	1.75401 × 10 <sup>-5</sup>		
Fresh water aquatic ecotox.	0.150538458	0.192436521	0.128396754	0.116622872	3.840612413	53.55349602		
Marine aquatic ecotox.	0.147847701	0.188996673	0.126101763	0.11453833	3.778297956	46.82379159		
Terrestrial ecotoxicity	657.4857473	840.4771804	566.7805302	509.3573937	16701.70698	204087.0434		
Photochemical oxidation	0.001341047	0.001714287	0.001143801	0.001038916	0.034737868	0.419110945		
Acidification	0.000120902	0.000154552	0.000103119	9.36635 × 10 <sup>-5</sup>	0.003072618	0.042319658		
Eutrophication	0.003219336	0.004115342	0.002745825	0.002494035	0.081540327	1.017858266		
	0.000632212	0.00080817	0.000559224	0.000489778	0.016154085	0.204620104		

Table 11. Impact of stage 2 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece perforated stoppers with a diameter of 26 mm and 44 mm in length.

	kg Sb eq	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	Horizontal Sawing	Cross-Cutting Sawing	Cluing	Punching	Cutting Out	Pieces Selection
Abiotic depletion (fossil fuels)	7.98965 × 10 <sup>-7</sup>	1.17416 × 10 <sup>-6</sup>	0.000164991	9.77652 × 10 <sup>-7</sup>	2.16819 × 10 <sup>-7</sup>	1.24853 × 10 <sup>-6</sup>									
Global warming (GWP100a)	13.58203958	19.96016537	1266.643883	16.61963209	3.685818907	21.22434939									
Ozone layer depletion (ODP)	1.314685622	1.932061999	106.993319	1.608712096	0.356772125	2.054429809									
Human toxicity	1.6412 × 10 <sup>-7</sup>	2.4119 × 10 <sup>-7</sup>	1.37492 × 10 <sup>-7</sup>	2.00825 × 10 <sup>-7</sup>	4.45379 × 10 <sup>-8</sup>	2.56466 × 10 <sup>-7</sup>									
Fresh water aquatic ecotox.	0.475521881	0.698826957	42.71807642	0.581871277	0.129044503	0.743087406									
Marine aquatic ecotoxicity	0.4670223	0.6986335973	35.80586103	0.571470784	0.126732933	0.729805301									
Terrestrial ecotoxicity	2.076.870353	3052.16867	154931.7793	2541.357722	563.6096687	3245.478836									
Photochemical oxidation	0.004236108	0.006225385	0.318317808	0.005188304	0.001149572	0.006619672									
Acidification	0.000381907	0.00056125	0.033585837	0.000467319	0.00010364	0.000596797									
Eutrophication	0.01016926	0.014944745	0.778614307	0.012443592	0.002759678	0.015891275									
	0.001997036	0.002934845	0.157790129	0.002443669	0.000541945	0.003120724									
	Body polishing	Head polishing	Gross air selection	Fine optical selection	Final washing	Total									
Abiotic depletion (fossil fuels)	1.98786 × 10 <sup>-7</sup>	2.58946 × 10 <sup>-7</sup>	1.72424 × 10 <sup>-7</sup>	1.56613 × 10 <sup>-7</sup>	5.1232 × 10 <sup>-6</sup>	0.000173317									
Global warming (GWP100a)	3.379263359	4.4401963622	2.9311332	2.662250576	88.7488667	1438.889135									
Ozone layer depletion (ODP)	0.327098808	0.426091991	0.28372165	0.257704596	8.103176619	123.6597743									
Human toxicity	4.08336 × 10 <sup>-8</sup>	5.31915 × 10 <sup>-8</sup>	3.54186 × 10 <sup>-8</sup>	3.21708 × 10 <sup>-8</sup>	1.00957 × 10 <sup>-6</sup>	1.58275 × 10 <sup>-5</sup>									
Fresh water aquatic ecotox.	0.118311662	0.154117503	0.10262214	0.09321177	2.944160451	48.75885197									
Marine aquatic ecotoxicity	0.116196933	0.151362773	0.10078785	0.091545683	2.896588302	41.74351486									
Terrestrial ecotoxicity	516.7332817	673.1174421	448.2083569	407.1080007	12803.32936	181259.761									
Photochemical oxidation	0.00103396	0.00137293	0.000914192	0.000830362	0.026623943	0.372532835									
Acidification	9.50198 × 10 <sup>-5</sup>	0.000123777	8.24191 × 10 <sup>-5</sup>	7.48613 × 10 <sup>-5</sup>	0.002355432	0.038428258									
Eutrophication	0.0023530151	0.003295876	0.002194623	0.001993378	0.062507946	0.90734483									
	0.000496687	0.000647243	0.000430979	0.000391459	0.012383488	0.183178388									



Table 12. Impact of stage 2 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece turned stoppers of 24 mm diameter and 44 mm in length.

	Horizontal Sawing		Cross-Cutting Sawing		Gluing	Turning	Cutting Out	Pieces Selection
Abiotic depletion (fossil fuels)	kg Sb eq	$9.7518 \times 10^{-7}$	$2.00757 \times 10^{-6}$	0.0000176169	$1.64611 \times 10^{-6}$	$3.02227 \times 10^{-7}$	$1.6872 \times 10^{-6}$	
Global warming (GWP100a)	Mt	16.57766048	34.12776586	1549.171728	27.98319182	5.137714018	28.68165549	
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1.604644189	3.3039427504	135.2818839	2.708657984	0.497309606	2.776266397	
Human toxicity	kg CFC-11 eq	2.00317 $\times 10^{-7}$	4.12386 $\times 10^{-7}$	$1.72567 \times 10^{-5}$	$3.38137 \times 10^{-7}$	$6.2082 \times 10^{-8}$	$3.46577 \times 10^{-7}$	
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.570025722	1.173492952	45.98672891	0.962210023	0.17666176	0.986226895	
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2534.931459	5218.578897	200465.1493	4278.993676	785.623239	4385.797847	
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.005170397	0.010644124	0.411051441	0.00872769	0.001602404	0.008945534	
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.000466137	0.000959622	0.041652228	0.000786845	0.000144465	0.000806485	
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.012412126	0.025552431	1.000362389	0.020951813	0.003846753	0.021474773	
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.00243749	0.005017979	0.20104305	0.004114511	0.000755424	0.004421721	
	Body polishing		Head polishing		Gross air selection	Fine optical selection	Final washing	Total
Abiotic depletion (fossil fuels)	kg Sb eq	$2.6863 \times 10^{-7}$	$3.22979 \times 10^{-7}$	$2.08448 \times 10^{-7}$	$1.87684 \times 10^{-7}$	$6.4014 \times 10^{-6}$	0.000190176	
Global warming (GWP100a)	Mt	4.566588388	5.490500551	3.543511261	3.190544319	104.6413522	1783.112158	
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.442026992	0.531457893	0.34299733	0.30883158	10.12464405	157.9721475	
Human toxicity	kg CFC-11 eq	$5.51808 \times 10^{-8}$	$6.6345 \times 10^{-8}$	$4.28183 \times 10^{-8}$	$3.85532 \times 10^{-8}$	$1.26142 \times 10^{-6}$	$2.00806 \times 10^{-5}$	
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.157023443	0.188792426	0.124062158	0.111704404	3.678637921	60.91318634	
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	698.2907082	839.5688843	541.8489203	0.109707775	3.618951522	54.05166607	
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.001424275	0.001712435	0.001105187	0.0009951	0.033272829	0.484651415	
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.000128406	0.000154385	$9.96382 \times 10^{-5}$	$8.97133 \times 10^{-5}$	0.002943033	0.048520958	
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.003419135	0.004110894	0.002653128	0.002388851	0.078101434	1.175273728	
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.000671449	0.000807296	0.0003251021	0.000469122	0.015472801	0.235527353	

Table 13. Impact of stage 2 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece turned stoppers of 26 mm diameter and 44 mm in length.

		Horizontal		Cross-Cutting		Gluing	Turning	Cutting Out	Pieces Selection
		Sawing		Sawing					
Abiotic depletion	kg Sb eq	$8.47964 \times 10^{-7}$	$1.64618 \times 10^{-6}$	0.000169818	$1.34947 \times 10^{-6}$	$2.63956 \times 10^{-7}$	$1.48859 \times 10^{-6}$		
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	14.41499739	27.98431493	13.48.693492	22.94035787	4.487133999	25.30529903		
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	1.395312516	2.708766697	11.4.9374131	2.220532379	0.434336133	2.449448966		
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$1.74185 \times 10^{-7}$	$3.38151 \times 10^{-7}$	$1.47406 \times 10^{-5}$	$2.77202 \times 10^{-7}$	$5.42207 \times 10^{-8}$	$3.05779 \times 10^{-7}$		
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0.504684634	0.979761104	45.59073245	0.803166717	0.15709941	0.885965862		
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.495663792	0.962248642	38.62717059	0.788810741	0.154291381	0.870129917		
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2204.240427	4279.165415	167478.2768	3507.878833	686.1410996	3869.509068		
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.0044959	0.00872804	0.343908389	0.007154878	0.001399494	0.007892481		
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.000405328	0.000786877	0.035892957	0.000645048	0.000126171	0.000711547		
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.010792919	0.020952654	0.840047413	0.0171761	0.003359645	0.018946798		
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.00211951	0.004114676	0.169854345	0.003373038	0.000659766	0.003720767		
		Body polishing	Head polishing	Gross air selection	Fine optical selection	Final washing	Total		
Abiotic depletion	kg Sb eq	$2.37007 \times 10^{-7}$	$2.83878 \times 10^{-7}$	$1.89408 \times 10^{-7}$	$1.73351 \times 10^{-7}$	$5.50972 \times 10^{-6}$	0.00018181		
Global warming (GWP100a)	MJ	4.029017249	4.825795701	3.219852168	2.980878765	90.06936077	1348.9505		
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$0.389992314$	$0.467117194$	$0.311668459$	$0.288536816$	$8.714723399$	$134.31785$		
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	$4.8685 \times 10^{-6}$	$5.83129 \times 10^{-6}$	$3.89074 \times 10^{-6}$	$3.60197 \times 10^{-6}$	$1.08576 \times 10^{-6}$	$1.71579 \times 10^{-5}$		
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.138538906	0.16593636	0.110715534	0.102498366	3.114968489	45.53097272		
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	616.0890952	737.9268748	492.357229	455.8151002	13769.5984	198096.9984		
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.001256612	0.00150512	0.001004241	0.000929708	0.028638747	0.406913609		
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.00011329	0.000135694	$9.05374 \times 10^{-5}$	$8.38178 \times 10^{-5}$	0.002333196	0.041524464		
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.00301664	0.003613211	0.002410795	0.002231869	0.067225541	0.989773585		
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.000592407	0.000709561	0.000473431	0.000438294	0.013318027	0.1199373823		

**Table 14.** Impact of stage 3 broken down by activities for the manufacturing process of perforated stoppers of 24 mm in diameter and 44 mm in length.

	Ink Marking	Silicone Coating	Waxing	Drying	Counting and Packaging	Total
Abiotic depletion	$3.99196 \times 10^{-7}$	$1.0427 \times 10^{-6}$	$2.83187 \times 10^{-6}$	$9.31642 \times 10^{-8}$	$1.45415 \times 10^{-7}$	$4.51234 \times 10^{-6}$
Abiotic depletion (fossil fuels)	3.879728885	8.746627243	34.41152473	1.583747734	2.471987204	51.09361579
Global warming (GWP100a)	0.353097735	0.718555749	1.067095298	0.153300273	0.239278204	2.531327259
Ozone layer depletion (ODP)	$4.15944 \times 10^{-8}$	$2.53403 \times 10^{-7}$	$9.6526 \times 10^{-8}$	$1.91374 \times 10^{-8}$	$2.98705 \times 10^{-8}$	$4.40532 \times 10^{-7}$
Human toxicity	0.124486862	0.267216194	0.432748548	0.05544872	0.086546943	0.966447267
Fresh water aquatic ecotox.	0.122416704	0.262765725	0.371938444	0.054457617	0.084999984	0.896578474
Marine aquatic ecotoxicity	476.0119299	1337.515368	1636.314337	242.1756096	377.9989673	4070.016211
Terrestrial ecotoxicity	0.006125014	0.001765573	0.002541001	0.000493956	0.000770989	0.011696533
Photochemical oxidation	0.0000110929	0.000201278	0.000298421	$4.45326 \times 10^{-5}$	$6.95086 \times 10^{-5}$	0.00072467
Acidification	0.002352501	0.004387312	0.007905528	0.001185797	0.001850847	0.017681985
Eutrophication	0.000331177	0.001008274	0.001495183	0.000222866	0.000363469	0.00363097
	kg Sb eq	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
	MJ	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg FeO <sub>4</sub> -eq		

From the above data, it can be deduced that the differences between the impacts generated by stoppers of equal dimensions are very small.

However, there are profound differences between stoppers of different diameters regardless of the manufacturing methodology.

This is because these processes mainly consist of the superficial application of treatments or products, so the perimeter/volume relationship is critical.

Likewise, the analysis of the packaging activity is greatly affected by the difference in the net volume of stoppers within the same container bag, since a fixed number of stoppers is included in one of these bags regardless of their geometry, resulting in an impact smaller to greater diameter or length of the plug.

#### 4. Discussion

Throughout this paper, a door-to-door LCA of the complete two-piece stopper manufacturing process in 24 and 26 mm diameters and 44 mm length is presented, manufactured by both turning or drilling (perforating) techniques.

The LCA has been developed based on real data from a production plant during the manufacturing process of 10 cork platforms weighing 365 kg/platform for each of the defined geometries.

In this way, precise primary data on the environmental impact of each of the individual activities that define the production process have been obtained.

To help accurately identify the influence of each of the manufacturing stages on the impacts generated for each of the geometries and production methodologies proposed, Tables 15–18 show the influence of each of these phases on each of the proposed study elements.

From the above results it can be deduced that, for all the manufacturing processes, stage 1, mainly due to the boiling processes with a considerable consumption of water and energy derived from the heating for boiling the cork sheets, is the one that generates greater impacts.

Stages 2 and 3, although have an influence on the impacts generated, they are much lower.

It is also important to note that the impacts of phase 1 are very similar between the different proposed production methodologies and identical between different geometries manufactured with a single production methodology.

From these data, it can be deduced that there is an important relationship between the volume of use of the raw cork sheets and the impacts generated by the activity since, as it is not possible to classify the sheets until the end of their stabilization process, independently of the selected geometry there will be a consumption of resources directly associated with the processing of each unit of raw cork.

On the other hand, the difference in impacts in phase 1 associated with the turning or drilling processes lies in the different input geometries used which, ultimately, imply slight changes in the consumption of water and energy for boiling the cork.

Throughout this research, a kg of fully processed and marked two-piece stoppers has been defined as the functional unit for the present study, including the post-treatment and packaging processes.

Although this presentation of the results allows them to be analyzed in a homogeneous way and allows their application from the point of view of all the actors in the value chain of the product, it makes their interpretation difficult for wine producers, since a transformation is necessary for each of the geometries shown.

To this effect, Tables 19–22 show the global impacts for a unit of cork stopper of the chosen geometry.



**Table 15.** Impact of stage 3 broken down by activities for the manufacturing process of perforated stoppers of 26 mm in diameter and 44 mm in length.

	Ink Marking	Silicone Coating	Waxing	Drying	Counting and Packaging	Total
Abiotic depletion (fossil fuels)	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq
Global warming (GWP100a)	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq
	3.66576 × 10 <sup>-7</sup>	8.06203 × 10 <sup>-7</sup>	2.18252 × 10 <sup>-6</sup>	7.44507 × 10 <sup>-8</sup>	1.16206 × 10 <sup>-7</sup>	3.54596 × 10 <sup>-6</sup>
	3.32520477	6.8259552703	26.58505866	1.265626713	1.975449103	39.97729495
	0.29942208	0.562594226	0.839177953	0.122507465	0.191215356	2.014917081
	3.48937 × 10 <sup>-8</sup>	1.95653 × 10 <sup>-7</sup>	7.6657 × 10 <sup>-8</sup>	1.52933 × 10 <sup>-8</sup>	2.38705 × 10 <sup>-8</sup>	3.46367 × 10 <sup>-8</sup>
	0.10507273	0.209094418	0.339365866	0.044310959	0.069162608	0.767006223
	0.103349234	0.20560664	0.292642674	0.043518935	0.06792638	0.2713043863
	391.2179863	1043.809816	1287.826663	193.5307715	302.0718391	3218.457075
	0.005952063	0.001391593	0.002016564	0.000394737	0.000616124	0.01037108
	9.53368 × 10 <sup>-5</sup>	0.000157716	0.000234918	3.55875 × 10 <sup>-5</sup>	5.53467 × 10 <sup>-5</sup>	0.000579106
	0.001937313	0.00345472	0.006224117	0.000947611	0.001479075	0.014042836
	0.000449642	0.000790828	0.001178395	0.000186092	0.00029046	0.002895417

**Table 16.** Impact of stage 3 broken down by activities for the manufacturing process of 2-piece turning stoppers of 24 mm in diameter and 44 mm in length.

	Ink Marking	Silicone Coating	Waxing	Drying	Counting and Packaging	Total
Abiotic depletion (fossil fuels)	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq
Global warming (GWP100a)	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq	kg PO <sub>4</sub> -eq
	3.8197 × 10 <sup>-7</sup>	9.98725 × 10 <sup>-6</sup>	2.71244 × 10 <sup>-6</sup>	8.9235 × 10 <sup>-8</sup>	1.39282 × 10 <sup>-7</sup>	4.32165 × 10 <sup>-6</sup>
	3.714262026	8.377745836	32.96024856	1.516954549	2.367733291	48.93694427
	0.333064796	0.688251284	1.02209148	0.146834967	0.229186853	2.424429382
	3.98266 × 10 <sup>-8</sup>	2.42716 × 10 <sup>-7</sup>	9.24551 × 10 <sup>-8</sup>	1.83303 × 10 <sup>-8</sup>	2.86107 × 10 <sup>-8</sup>	4.21939 × 10 <sup>-7</sup>
	0.119190935	0.255946583	0.414497754	0.053110218	0.082896901	0.9256442391
	0.117209847	0.251683809	0.356252263	0.052160914	0.081415184	0.8588720818
	455.8481318	1281.106819	1567.304201	231.9620636	362.0571892	3898.278405
	0.005858016	0.001691112	0.002433836	0.000473124	0.000738473	0.011194562
	0.000106196	0.00019279	0.000285836	4.26545 × 10 <sup>-5</sup>	6.65771 × 10 <sup>-5</sup>	0.000694053
	0.002252817	0.004202281	0.007572119	0.001135787	0.001772789	0.016955794
	0.000508569	0.000965751	0.001432125	0.000223046	0.00034814	0.003447763

Table 17. Impact of stage 3 broken down by activities for the manufacturing process of turning stoppers of 26 mm in diameter and 44 mm in length.

		Ink Marking	Silicone Coating	Waxing	Drying	Counting and Packaging	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	$3.71742 \times 10^{-7}$	$8.74484 \times 10^{-7}$	$2.36019 \times 10^{-6}$	$8.33581 \times 10^{-8}$	$1.30109 \times 10^{-7}$	$3.81988 \times 10^{-6}$
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	3.540389412	7.471756116	28.81803365	1.417048464	2.211795222	43.45902287
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	0.321234641	0.617759411	0.925509406	0.1337164469	0.214092689	2.215760616
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$3.77256 \times 10^{-8}$	$2.11928 \times 10^{-7}$	$8.53306 \times 10^{-8}$	$1.7123 \times 10^{-8}$	$2.67264 \times 10^{-8}$	$3.78833 \times 10^{-7}$
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0.1113103466	0.2229467166	0.373274436	0.049612398	0.000689838	0.842894806
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.111229897	0.225633927	0.322901711	0.048725615	0.076053209	0.784544449
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	429.2607484	1142.563523	1421.374297	216.685125	338.212321	3548.095925
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.005803787	0.001537816	0.002243281	0.000441964	0.000689838	0.010716686
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.000101307	0.000173314	0.000259334	3.98453 $\times 10^{-5}$	$6.21924 \times 10^{-5}$	0.000635992
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.002122634	0.0003814283	0.006871913	0.001060985	0.001656034	0.015525848
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.000483303	0.000869852	0.001302323	0.000208336	0.000325212	0.003188745

**Table 18.** Impacts generated by each stage of the activity of manufacturing 2-piece stoppers with dimensions of 24 × 44 by drilling.

Impact Category	Unit	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.0026	0.0002	$5.00 \times 10^{-6}$	0.002805
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	9066.7	1572.9	51.094	10690.694
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	837.63	137.57	2.5313	977.7313
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$8.00 \times 10^{-6}$	$2.00 \times 10^{-5}$	$4.00 \times 10^{-7}$	0.0001004
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	436.32	53.553	0.9664	490.8394
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	478.66	46.824	0.8966	526.3806
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	$1.00 \times 10^6$	204087	4070	1208157
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	8.5077	0.4191	0.0117	8.9385
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.3308	0.0423	0.0007	0.3738
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	4.684	1.0179	0.0177	5.7196
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	2.0394	0.2046	0.0036	2.2476

**Table 19.** Impacts generated by each stage of the 2-piece stopper manufacturing activity with dimensions of 26 × 44 by drilling.

Impact Category	Unit	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.0027	0.0026	0.0002	0.0055
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	10545	9066.5	1438.8	21050.3
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	963.29	837.61	123.66	1924.56
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.0001	$8.00 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-5}$	0.0002
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	485.84	436.31	48.759	970.909
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	521.11	478.65	41.744	1041.504
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	$2.00 \times 10^6$	$1.00 \times 10^6$	181260	3181260
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	8.8906	8.5077	0.3725	17.7708
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.3698	0.3308	0.0384	0.739
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	5.6053	4.6839	0.9073	11.1965
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	2.2255	2.0394	0.1832	4.4481

**Table 20.** Impacts generated by each stage of the activity of manufacturing 2-piece stopper with dimensions of 24 × 44 by turning.

Impact Category	Unit	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.003	0.0028	0.0002	0.006
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	11750	9917.7	1783.1	23450.8
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	1076.8	916.47	157.92	2151.19
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.0001	$9.00 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-5}$	0.00021
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	540.59	478.75	60.913	1080.253
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	580.34	525.43	54.052	1159.822
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	$2.00 \times 10^6$	$1.00 \times 10^6$	236234	3236234
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	9.8037	9.3079	0.4847	19.5963
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.4042	0.3553	0.0482	0.8077
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	6.3062	5.114	1.1753	12.5955
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	2.4766	2.2376	0.2355	4.9497



**Table 21.** Impacts generated by each stage of the 2-piece stopper manufacturing activity with dimensions of 26 × 44 by turning.

Impact Category	Unit	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.003	0.0028	0.0002	0.006
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	11510	9917.6	1549	22976.6
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	1053	916.46	134.32	2103.78
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.0001	$9.00 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-5}$	0.00021
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	532.2	478.74	52.615	1063.555
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	571.74	525.42	45.531	1142.691
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	$2.00 \times 10^6$	$1.00 \times 10^6$	198097	3198097
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	9.7255	9.3079	0.4069	19.4403
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.3975	0.3553	0.0415	0.7943
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	6.1192	5.1139	0.9898	12.2229
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	2.4401	2.2375	0.1994	4.877

**Table 22.** Global impact of each geometry and production methodology, by impact category and for one cork stopper unit.

		24 × 44 2P Perforated	26 × 44 2P Perforated	24 × 44 2P Turned	26 × 44 2P Turned
Abiotic depletion	kg Sb eq	$1.042 \times 10^{-5}$	$1.22135 \times 10^{-5}$	$1.14442 \times 10^{-5}$	$1.33914 \times 10^{-5}$
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	40.72334221	47.14373321	44.75774719	51.45638001
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	3.724415328	4.306441809	4.101842571	4.70746365
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$3.91305 \times 10^{-7}$	$4.51152 \times 10^{-7}$	$4.30407 \times 10^{-7}$	$4.91866 \times 10^{-7}$
Human toxicity	kg 1.4-DB eq	1.869723178	2.1719775	2.059226375	2.37924588
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1.4-DB eq	2.005094121	2.32964494	2.210640027	2.555991092
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	5844.414344	6753.106912	6450.098008	7397.773112
Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq	0.034049143	0.039746083	0.037344855	0.043478517
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.001424115	0.00165329	0.001539834	0.001776912
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.021787279	0.025058952	0.024022004	0.027356533
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.008561986	0.009949196	0.009433858	0.010908692

## 5. Conclusions

Throughout the present study, a gate to gate LCA of the complete manufacturing process of two-piece stoppers in diameters 24 and 26 mm and 44 mm in length has been carried out, manufactured by both turning or drilling methodologies.

Through this work and attending to first objective of the research, it has been determined that stage 1, corresponding to the initial processing procedures of the plate, its boiling and stabilization, is the one that generates the greatest impacts, well above stage 2, corresponding to the machining processes of the stopper from the plate, or from phase 3, corresponding to the post-treatment and personalized processes of the stopper and its packaging for delivery to the customer.

The comparative analysis between different production methodologies and stopper geometries and attending to second objective of the research, shows many similarities in phase 1 because the treatment process of the cork sheet is analogous. However, it must be emphasized that the data are not the same because the caliber of the plates necessary for the manufacture of 26 mm stopper is greater than in the case of 24 mm stopper; therefore, for the same initial weight, the number of plates is lower and consequently the consumption is also lower.

As a conclusion to the above, a relationship is established between the volume of use of the raw cork sheets and the impacts generated by the activity.

Considering the impacts generated by the machining and post-treatment processes of the stoppers, it can be concluded that although the impact generated for different methodologies and for different diameters is similar for each kg of net cork produced, the impact of the larger diameter stoppers will in turn also be much greater because the volume of such stoppers is also considerably higher (more precisely 17.36% higher).



**Author Contributions:** Conceptualization, F.J.F.-M., E.M.C. and J.B.-F.; data curation, F.J.F.-M., J.B.-F., J.L.G.-A. and A.S.-T.L.; formal analysis, A.S.-T.L., J.L.G.-A. and E.J.-M.; investigation, F.J.F.-M., E.M.C. and J.B.-F.; methodology, E.J.-M., E.M.C. and J.B.-F.; resources, J.B.-F. and A.S.-T.L.; validation, F.J.F.-M., E.M.C., J.L.G.-A. and E.J.-M.; visualization, A.S.-T.L.; writing—original draft, F.J.F.-M., J.B.-F. and E.J.-M.; writing—review and editing, A.S.-T.L., E.M.C., J.L.G.-A. and E.J.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** The data presented in this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy.

**Acknowledgments:** The authors appreciate the collaboration from institutions, service users, managers and workers, engineers, technicians, and other people that responded our survey, providing information for this paper.

**Conflicts of Interest:** The authors declare that there is no conflict of interest. Since there are no funders, they had no role in the design of the study, in the collection, analysis, or interpretation of the data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

## References

- Gil, L.; Varela, M.C. *Technical Guidelines for Genetic Conservation of Cork Oak (Quercus Suber)*; Bioversity International: Rome, Italy, 2008.
- Praciak, A. *The CABI Encyclopedia of Forest Trees*; CABI: Wallingford, UK, 2013.
- Cardoso, P.; Gaspar, C.; Pereira, L.C.; Silva, I.; Henriques, S.S.; da Silva, R.R.; Sousa, P. Assessing spider species richness and composition in Mediterranean cork oak forests. *Acta Oecol.* **2008**, *33*, 114–127. [[CrossRef](#)]
- Vessella, F.; López-Tirado, J.; Simeone, M.C.; Schirone, B.; Hidalgo, P.J. A tree species range in the face of climate change: Cork oak as a study case for the Mediterranean biome. *Eur. J. For. Res.* **2017**, *136*, 555–569. [[CrossRef](#)]
- Magri, D.; Fineschi, S.; Bellarosa, R.; Buonamici, A.; Sebastiani, F.; Schirone, B.; Simeone, M.C.; Vendramin, G.G. The distribution of *Quercus suber* chloroplast haplotypes matches the palaeogeographical history of the western Mediterranean. *Mol. Ecol.* **2007**, *16*, 5259–5266. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Moreira, F.; Duarte, I.; Catry, F.; Acácio, V. Cork extraction as a key factor determining post-fire cork oak survival in a mountain region of southern Portugal. *For. Ecol. Manag.* **2007**, *253*, 30–37. [[CrossRef](#)]
- Paulo, J.A.; Tomé, M. Does debarking intensity during the first cork extraction affect future cork thickness? *Ann. For. Sci.* **2017**, *74*, 1–9. [[CrossRef](#)]
- Gil, L. New cork-based materials and applications. *Materials* **2015**, *8*, 625–637. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Silva, J.S.; Catry, F. Forest fires in cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. *Int. J. Environ. Stud.* **2006**, *63*, 235–257. [[CrossRef](#)]
- Sierra-Pérez, J.; Boschmonart-Rives, J.; Gabarrell, X. Production and trade analysis in the Iberian cork sector: Economic characterization of a forest industry. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, *98*, 55–66. [[CrossRef](#)]
- Mendes, A. *A Economia do Sector da Cortiça em Portugal: Evolução das Actividades de Produção e de Transformação ao Longo dos Séculos XIX e XX*; Universidade Católica Portuguesa: Porto, Portugal, 2002.
- Chatonnet, P.; Labadie, D.; Boutou, S. Study of chloroanisoles assay and tca assay validation in wine and cork stoppers soaked in dilute alcohol solution using SIDA-HSSPME-GC-MS/EI-SIM. *OENO One* **2005**, *39*, 137–147. [[CrossRef](#)]
- Demertzi, M.; Dias, A.C.; Matos, A.; Arroja, L.M. Evaluation of different end-of-life management alternatives for used natural cork stoppers through life cycle assessment. *Waste Manag.* **2015**, *46*, 668–680. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Environmental analysis of raw cork extraction in cork oak forests in southern Europe (Catalonia–Spain). *J. Environ. Manag.* **2012**, *110*, 236–245. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Integrated environmental analysis of the main cork products in southern Europe (Catalonia–Spain). *J. Clean. Prod.* **2013**, *51*, 289–298. [[CrossRef](#)]
- Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe (Catalonia–Spain). *J. Clean. Prod.* **2011**, *19*, 259–271. [[CrossRef](#)]
- Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Gabarrell, X.; Rieradevall, J. Environmental analysis of cork granulate production in Catalonia–Northern Spain. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *58*, 132–142. [[CrossRef](#)]
- Rives, J.; Fernández-Rodríguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Environmental analysis of the production of champagne cork stoppers. *J. Clean. Prod.* **2012**, *25*, 1–13. [[CrossRef](#)]
- Flor, F.J.; Leiva, F.J.; García, J.; Martínez, E.; Jiménez, E.; Blanco, J. Environmental impact of oak barrels production in Qualified Designation of Origin of Rioja. *J. Clean. Prod.* **2017**, *167*, 208–217. [[CrossRef](#)]
- Flor, F.J.; Leiva, F.J.; García, J.L.; Martínez, E.; Jiménez, E.; Blanco, J. Environmental impact of wine aging process in oak barrels in wineries of La Rioja (Spain). *Am. J. Enol. Vitic.* **2018**, *69*. [[CrossRef](#)]

## 9.2 Publicación 2

**TÍTULO:** Environmental Impact Analysis of Natural Cork Stopper Manufacturing

**AUTORES:** Flor-Montalvo, F.J., Martínez-Cámara, E., García-Alcaraz, J.L., (...), Latorre-Biel, J.-I., Blanco-Fernández, J.

**REVISTA:** Agriculture (Switzerland) **ISSN:** 2077-0472

**AÑO:** 2022 **Nº:** 12(5),636

**DOI:** 10.3390/agriculture12050636

**FACTOR DE IMPACTO JCR:** 3.408 (Q1)

**CATEGORÍA:** AGRONOMY



Article

## Environmental Impact Analysis of Natural Cork Stopper Manufacturing

Francisco Javier Flor-Montalvo <sup>1,\*</sup>, Eduardo Martínez-Cámara <sup>2</sup>, Jorge Luis García-Alcaraz <sup>3</sup>, Emilio Jiménez-Macías <sup>4</sup>, Juan-Ignacio Latorre-Biel <sup>5</sup> and Julio Blanco-Fernández <sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Higher School of Engineering and Technology, International University of La Rioja (UNIR), 26004 Logroño, La Rioja, Spain
- <sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of La Rioja, 26004 Logroño, La Rioja, Spain; eduardo.martinez@unirioja.es (E.M.-C.); julio.blanco@unirioja.es (J.B.-F.)
- <sup>3</sup> Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Autonomous University of Ciudad Juarez, Ciudad Juárez 32315, Mexico; jorge.garcia@uacj.mx
- <sup>4</sup> Department of Electrical Engineering, University of La Rioja, 26004 Logroño, La Rioja, Spain; emilio.jimenez@unirioja.es
- <sup>5</sup> Department of Mechanical Engineering, Public University of Navarra, Av de Tarazona s/n, 31500 Tudela, Navarra, Spain; juanignacio.latorre@unavarra.es
- \* Correspondence: franciscojavier.flor@unir.net; Tel.: +34-626-531-881

Citation: Flor-Montalvo, F.J.; Martínez-Cámara, E.; García-Alcaraz, J.L.; Jiménez-Macías, E.; Latorre-Biel, J.-I.; Blanco-Fernández, J. Environmental Impact Analysis of Natural Cork Stopper Manufacturing. *Agriculture* **2022**, *12*, 636. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050636>

Academic Editors: Riccardo Testa, Giuseppina Migliore, Giorgio Schifani, József Tóth and Jacopo Bacenetti

Received: 23 February 2022

Accepted: 26 April 2022

Published: 28 April 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** For both wine makers and customers, natural cork stoppers are a symbol of quality. Moreover, they are essential for maintaining the organoleptic properties of bottled wines throughout their lifespan. This research relied on the life-cycle assessment (LCA) methodology to analyze the relationship between the efficient usage of cork planks and the environmental impact of the cork stopper manufacturing industry. The goals of this research were to analyze and determine the environmental impact of producing 1 kg of natural cork stoppers. The analysis considered cork stoppers of two sizes—24 × 44 mm and 26 × 44 mm—and two manufacturing methods—punching and turning. Our findings indicated that the 24 × 44 mm cork stoppers produced with the punching method had a slightly lower environmental impact (1.36 kg CO<sub>2</sub> eq/kg) across the ten analyzed impact categories. Conversely, 26 × 44 mm turned corks had the highest impact on the environment (1.49 kg CO<sub>2</sub> eq/kg). Additionally, a comparison of same-sized punched and turned cork stoppers showed that the former had a lower environmental impact. This phenomenon is directly related to plank usage. In conclusion, there is a clear relationship between environmental impact and the efficient usage of raw material. In turn, an efficient usage of raw material depends on both the manufacturing method and stopper size.

**Keywords:** environmental impact; natural cork stoppers; manufacturing process; LCA

### 1. Introduction

#### 1.1. Cork and Wine

Cork is a non-wood product material primarily obtained from *Quercus suber*—also known as the cork oak tree, which is endemic to Europe and North Africa. Top cork manufacturers include Portugal, Spain, Algeria, Morocco, Italy, France, and Tunisia [1]. According to Spain's National Institute of Statistics (INE, by its Spanish acronym), cork production in Spain surged to 60,431.51 tons in 2016 [2].

Cork quality depends on the quality of the bark of the tree. Cork's properties make it suitable as a material for a wide range of every-day products, including handbags, decorations, toys, acoustic instruments, and insulation materials. In fact, cork's microstructure and low density make it a near-impermeable and stable thermoacoustic insulator [3]. Additionally, cork is used in bio-absorbent technologies and energy-absorbing

technologies within the space industry. Finally, since ancient times, cork has been widely used to manufacture bottle stoppers.

Nowadays, food products for human consumption are required to comply with special and strict quality, safety, and environmental regulations. Cork stoppers are a fundamental part of the wine industry; they play a crucial role in the closure of sparkling and still wines. However, in recent years, alternative wine closures have gained popularity over traditional natural closures, particularly due to their economic and organoleptic advantages.

In the wine-making process, cork stoppers are important at the bottling stage. Due to their elasticity, cork stoppers exert pressure against the glass surface and form an excellent seal without causing any damage to wine bottles. Moreover, cork stoppers allow oxygen to slightly ingress into the bottle, thus having a positive impact on wine aging [4]. From this perspective, the quality of cork stoppers is highly important for both young and aged wines and helps them preserve their organoleptic properties.

Despite their remarkable advantages, cork stoppers also have certain drawbacks. For instance, cork causes cork taint, which is one of the most frequent organoleptic defects in wines. Cork taint is caused by chemical compounds—chiefly trichloroanisole (TCA)—that are present in the cork stopper and are transferred into the wine after bottling [5]. Additionally, cork stoppers can result in excessive gas permeability that causes wine to oxidize and ultimately degrade [6].

Cork is an inherently heterogeneous and buoyant material. Its properties and characteristics chiefly depend on aspects such as geographical location, tree age, cork age (e.g., first harvest and second harvest), and the state of the planks cut out from the trees [7,8]. Common food standards and regulations to be complied with in the cork manufacturing industry include those from the European Council (EC), the International Food Standard (IFS), and the British Retail Consortium (BRC). All these policies serve as tools to audit food manufacturers in terms of the quality and safety assured in their food products. By complying with international food standards, regulations, and norms, food manufacturers can commercialize their products, ensure the quality of their production processes, and guarantee customers safe food products that pose no known health risks.

Cork stoppers are available in many models, thus varying in terms of shape, the type of cork material used, and the production process. All these variables determine the quality, class, and economic value of a cork stopper. The most common types of cork stoppers include multi-piece corks, colmated corks, technical corks, agglomerated corks, the Pro-Cork, T-Corks, champagne corks, the Helix cork, and (most importantly) natural corks. For both wine makers and customers, cork stoppers are a symbol of quality and are essential for maintaining the organoleptic properties of bottled wines throughout their lifespan. In fact, research has proven that wine stoppers manufactured with other materials, such as plastic, cause spillages and may be a source of health risks for consumers [9–11].

Natural cork stoppers are directly manufactured from the cork material (raw material), which makes them 100% natural, as the name suggests. Additional characteristics that make natural cork stoppers ideal for wine closure include color, density, elasticity, porosity, and the absence of alterations [12–14]. In the Spanish industry, cork material is visually classified into nine quality grades based on two important criteria: thickness (one layer = 2.25 mm) and appearance (the presence or absence of alterations). Additionally, natural cork stoppers can be classified according to their dimensions. For instance, cork stoppers manufactured under the Spanish UNE 56921/2020 norms can be of four possible sizes: 44 × 24 mm, 46 × 24 mm, 49 × 24 mm, and 54 × 24 mm.

Despite the importance of cork stoppers in the wine industry, few life-cycle assessments (LCA) have been conducted to study the environmental impact of cork stopper manufacturing. In their work, Rives et al. [15] analyzed the environmental impact of raw cork extraction in Spain and determined the carbon dioxide balance of the forestry systems under study, with a tree lifespan of approximately 200 years. Additionally, Rives et

al. [16] analyzed the environmental impact of natural cork production, and Rives et al. [17] analyzed cork granule production. From a similar perspective, Demertzi et al. [18] conducted a comprehensive analysis of the environmental impact of the cork stopper supply chain in Portugal and identified the key stages and processes involved in order to suggest both improvement actions and alternative production scenarios.

### 1.2. Research Context

The goals of this research were to analyze and determine the environmental impact of producing 1 kg of natural cork stoppers. The analysis considered not only the final product (i.e., cork stoppers) but also the co-products and by-products that are generated throughout the production process. Moreover, because cork planks entering factories may vary in visual quality and thickness, it would be impossible to conduct a reliable LCA of cork stopper production without considering both co-products and by-products.

- Co-Products:
  - Thin cork planks (used to manufacture multi-piece corks).
  - Thin cork planks (used to manufacture agglomerated corks).
- By-Products:
  - Granules (used to manufacture agglomerated corks).
  - Waste from bark and stoppers (used as biomass).
  - Sawdust (used to produce colmated corks).

The analysis considered cork stoppers of two sizes— $24 \times 44$  mm and  $26 \times 44$  mm—and two manufacturing methods—punching and turning. Ten lots per cork size and manufacturing methods were analyzed. To have a point of reference, all the lots were manufactured from the same cork plank, which increased the reliability of the results.

It was necessary to consider that the cork diameter selection is made based on the origin and density, among other factors. An enologist determines the closure to control the amount of air in contact with the wine and, consequently, its evolution (it should be considered that the bottle neck size can be the same for a 24 mm and a 26 mm cork; in this case, what changes is the mass amount in the bottle neck; this effect could be achieved in other ways, such as varying the density of the selected cork.).

This research is useful for cork producers and wine makers. The information contained in this study is needed by cork producers because many wine producers demand the carbon footprint of their product to comply with the requirements of wine distributors.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Goals and Scope

This research was a gate-to-gate study that used the measures obtained at each stage of the cork stopper production process as its basis. The LCA stages considered in this study ranged from the moment raw cork planks arrive in the manufacturing facilities to the packaging of cork stoppers. At each process stage, the data were directly gathered from the production facilities. The amount of incoming raw material that was used, both in the production process and discarded from it, was recorded. Similarly, aspects such as energy consumption, water consumption, and the use of other production materials were measured. This study allowed us to identify the key operations in the manufacture of natural cork stoppers.

To conduct the analysis, the SimaPro 8.3 software and the baseline V3.04/EU25 CML-IA calculation method were used. Furthermore, ten impact categories were considered: abiotic depletion (AD), global warming (GWPI100—GW), ozone layer depletion (OLD), human toxicity (HT), freshwater aquatic ecotoxicity (FWAE), marine aquatic ecotoxicity (MAE), terrestrial ecotoxicity (TE), photochemical oxidation (PO), acidification (AC), and eutrophication (EU).



## 2.2. Functional Unit

A functional unit was defined as 1 kg of fully processed and packaged natural cork stoppers.

## 2.3. System Boundaries

The system boundaries (Figure 1) were all processes and operations needed to manufacture and package a functional unit of natural cork stoppers obtained from raw cork planks.

The input flows through the system boundaries are as follows:

- Electricity.
- Water.
- Auxiliary materials (ink, silicone, ... plastic, SO<sub>2</sub>).
- Cork planks at the factory gate.

The output flows are as follows:

- Cork stoppers packaged.
- Treated wastewater.
- By-product 1, by-product 2, and co-product 1.

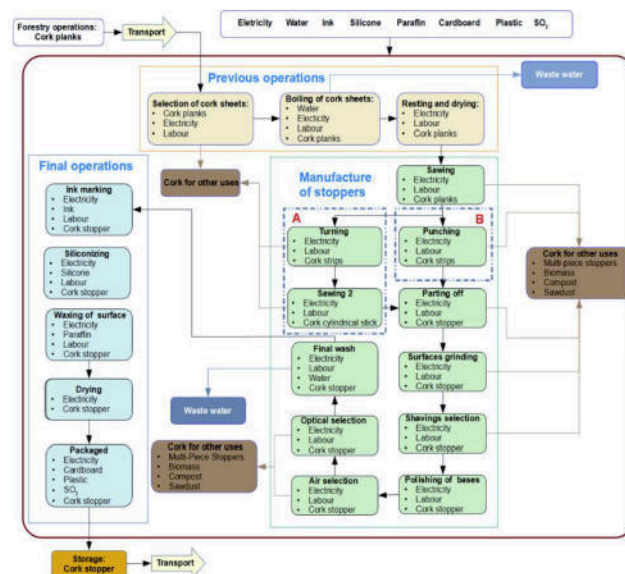


Figure 1. System boundaries.

## 2.4. Technical Specifications

The technical specifications of the study are as follows:

- Lot characteristics: medium load platform (365 kg).
- Number of lots studied: 10 per manufacturing technique and stopper size.
- Cork density: 166.07 kg/m<sup>3</sup>.
- Cork stopper volume: 1.99051×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup> (for 24 × 44 mm) and 2.33609×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup> (for 26 × 44 mm).
- A functional unit comprises approximately 300 units of 24 × 44 mm stoppers and 260 units of 26 × 44 mm stoppers.

### 2.5. Inventory

The process of manufacturing natural cork stoppers comprises multiple operations, grouped into three major phases. Table 1 summarizes the inventory required for producing ten lots of cork stoppers per manufacturing method and stopper size. The data were obtained from cork-producing and transforming industries located in Extremadura and la Rioja (Spain). The datasets used to process inventory data were:

- Cork, raw {RoW}| cork forestry | Cut-off, U.
- Tap water {RER}| market group for | Cut-off, U.
- Electricity, medium voltage {ES}| market for | Cut-off, U.
- Printing ink, offset, without solvent, in 47.5% solution state {GLO}|market for | Cut-off, U.
- Silicone product {GLO}| market for | Cut-off, U.
- Paraffin {GLO}| market for | Cut-off, U.
- Carton board box production, with offset printing {GLO}| market for |Cut-off, S.
- Packaging film, low density polyethylene {GLO}| market for | Cut-off, U.
- Sulfur dioxide, at plant/RER.

#### 2.5.1. Phase 1: Preparing Raw Cork Planks

**Selecting cork plank:** Once cork is extracted from the bark, the freed cork portions, known as planks, are visually inspected to remove those that do not comply with the required quality and visual specifications.

**Boiling cork plank:** The planks are boiled at 100 °C to soften and clean them. Sometimes, manufacturing companies add phenolic additives to better clean the cork, extract soluble substances, and increase cork thickness (up to 20%), flexibility, and elasticity (in this study, we analyzed 365 kg batches of cork boiled in a 10 kW stainless-steel electric boiler for 60 min). Water was reused in two consecutive boils. Subsequently, wastewater is drained out from the boilers and treated.

**Treating wastewater:** Wastewater to be treated contains wood particles (capacity:  $5.00 \times 10^9$  L/year). The wastewater treatment comprises three stages—mechanical treatment, biological treatment, and chemical treatment, including sludge digestion (fermentation).

**Resting and drying:** Once boiled, cork planks are stored in warehouses and left to rest. The planks gradually dry until they reach the right thickness and humidity for industrial processing. This phase usually lasts for 15 days, though it may extend to several months, depending on the characteristics of the planks.

#### 2.5.2. Phase 2: Manufacturing

This phase involves multiple mechanical processes. At this phase, cylindrical cork stoppers with the desired dimensions are manufactured from the treated cork planks. The manufacturing phase initiates by discarding tainted or flawed planks that are not suitable for producing cork stoppers.

**Cutting:** Cork planks are cut lengthwise into strips. The width of a strip is slightly greater than the width of a cork stopper.

Following the cutting of the planks, the production flow can be of two forms: either punching corks or turning corks, as seen in Figure 2.

**Flow A; Cylindrical turning:** The cork strips are placed in a turning lathe and shaped as rods (see Figure 2). The width of a rod is slightly greater than that of the actual cork stopper.

**Cutting 2:** The rods are cut into two pieces, each slightly longer than a cork stopper.





Figure 2. Turning of cork strips (Source: authors).

Table 1. Inventory summary.

Inventory		Punching 24 × 44 mm	Turning 24 × 44 mm	Punching 26 × 44 mm	Turning 26 × 44 mm
Item	Unit				
<b>Phase 1</b>					
Cork planks	kg	9.552	9.905	9.871	11.152
Electricity	kWh	0.079	0.080	0.081	0.092
Water	l	19.497	20.217	20.148	22.763
<b>Phase 2</b>					
Electricity	kWh	0.624	0.412	0.515	0.333
Water	l	0.003	0.003	0.002	0.002
<b>Phase 3</b>					
Electricity	kWh	0.055	0.054	0.044	0.043
Ink	g	0.190	0.190	0.190	0.190
Silicon	g	1.210	1.210	1.030	1.030
Paraffin	g	6.050	6.050	5.160	5.160
Cardboard	g	34.200	34.200	34.200	34.200
Plastic	g	4.300	4.300	4.300	4.300
SO <sub>2</sub>	g	0.860	0.860	0.860	0.860

**Flow B; Punching:** Cork strips are fed through a machine that punches hollow metal tubes through them, removing cylinders of cork stoppers (see Figure 3). The punched diameter is greater than the diameter of a cork stopper.

The stoppers then undergo parting off, grinding, shaving selection, and polishing. Then, at the selection process, also known as the choosing operation, the finished stoppers are sorted into different grades. This is achieved optically by a machine (optical sorting) and then again by eye (visual sorting).

**Final wash:** The cork stoppers are washed after the selection or choosing process to disinfect them and ensure their optimal organoleptic properties.







Figure 3. Punched cork stoppers (Source: authors).

### 2.5.3. Phase 3: Final Operations

At the last phase of the production process, the cork stoppers undergo surface finishing.

**Ink printing or heat marking:** The printing method depends on customer specifications. In this research, we studied the ink printing process.

**Siliconizing:** The surface of cork stoppers is treated with silicon to give the stoppers a homogenous color.

**Waxing:** The surface of cork stoppers is treated with paraffin to make stoppers easier to insert in and extract from a bottle.

**Drying:** The finished cork stoppers are left to dry.

**Packaging:** The finished cork stoppers are packed in plastic bags with  $SO_2$  to prevent microbiological proliferation during their transportation and storage. Each cork package contains 1000 units of stoppers and weighs approximately 3.5 kg (packaging included).

**Wastewater treatment:** This process involves removing wood particles (capacity:  $5.00E+09$  L/Year) from the water used to boil the cork planks. Wastewater treatment comprises three stages—mechanical treatment, biological treatment, and chemical treatment, including sludge digestion (fermentation).

**Construction and demolition of building infrastructures and machinery manufacturing and maintenance:** The study was conducted within a  $1000\text{ m}^2$  industrial plant with machinery undergoing standard maintenance when needed.

## 3. RESULTS

### 3.1. Environmental Impact of Raw Material Utilization, Products, By-Products, and Co-Products

Table 2 summarizes the analysis results per cork size and manufacturing method. Both mean percentages and standard deviation values were computed. The table also summarizes the results for the co-products and by-products. As discussed in Section 2.4, the analysis considered ten lots of 365 kg of raw cork.

To date, no study had integrated recoverable by-products into the LCA of cork stopper production, even though such by-products greatly contribute to the environmental footprint of the cork industry. According to Rives et al. (2011), only approximately 27% of collected cork is used to manufacture cork stoppers, and the environmental impact of the resulting waste has not been thoroughly assessed. From a similar perspective, Rives et al. (2013) found that in the cork industry, 19% of the cork collected from forests is actually used in natural stoppers, 41% in champagne stoppers, and 14% in cork granules, and the remaining 26% becomes cork waste. Such findings were obtained after studying separate batches, each destined for the production of a different kind of cork stopper. A study of

this nature may not be highly convenient, since the main goal of conducting an LCA in the cork industry should be to find a way to produce cork stoppers with the highest possible added value while causing the least damage to the environment.

Table 2 also demonstrates that the production of natural cork stoppers has a low resource exploitation rate. Hence, since only a small percentage of a cork batch is suitable for manufacturing natural cork stoppers, an LCA of the main product (i.e., stoppers) would not be reliable to comprehensively understand the environmental impact of natural cork production, since 100% of the environmental impact would be associated with only 10% of the final product. In addition, as Table 2 demonstrates, it is important to identify which production stages influence the batch usage rate, as material losses are generated at three clearly differentiated stages.

Table 2. Use rate of raw material.

Item	Cork Stopper Size/Production Method/Usage			
	24 × 44 mm Punching	26 × 44 mm Punching	24 × 44 mm Turning	26 × 44 mm Turning
Cork stoppers	10.47% ± 0.93%	10.10% ± 0.91%	10.13% ± 0.91%	8.97% ± 0.82%
<b>Materials for Co-Products and by-Products</b>				
Thin plank	6.16% ± 0.58%	7.41% ± 0.69%	6.05% ± 0.57%	7.12% ± 0.66%
Granules	72.75% ± 1.98%	72.65% ± 1.99%	72.57% ± 1.99%	73.22% ± 1.96%
Biomass	6.64% ± 0.62%	6.50% ± 0.61%	6.91% ± 0.64%	6.77% ± 0.63%
Sawdust	3.98% ± 0.38%	3.35% ± 0.32%	4.34% ± 0.43%	3.93% ± 0.38%

As shown in Figure 4, with the punching method, most of the co-product and by-product material was generated during the initial selection of the raw cork planks (19%), then when cutting the planks into strips (32%), and (finally) when punching the corks out of the strips (34%). As for the turning method (see Figure 5), most of the co-product and by-product material appeared during the initial selection of the raw cork planks (19%), then when cutting the planks into strips (19% for 24 × 44 mm stoppers and 33% for 26 × 44 mm stoppers), and (finally) when turning the strips into rods (from 20% to 24%). In conclusion, Figures 4 and 5 show that most of the waste is generated during the early phase of the manufacturing process; that is, during those stages involving the selection and handling of cork planks. In fact, the suitability of a cork plank for manufacturing natural cork stoppers depends on a strict set of quality requirements, such as average plank thickness, porosity, structural defects, stains, and hardness.

One of the challenges of conducting an LCA in the cork industry is successfully calculating the environmental impact of the main product (i.e., cork stoppers) and each of the by-products and co-products generated throughout the production process. According to the ISO 14044: 2006 standard, if it is impossible to identify a relevant underlying physical relation between the secondary material and the primary material as the basis for percentage allocation, this percentage must be assigned in a way that reflects other relationships among such materials. For instance, input and output data could be allocated between co-products and waste with respect to their commercial value. This is known as economic allocation.

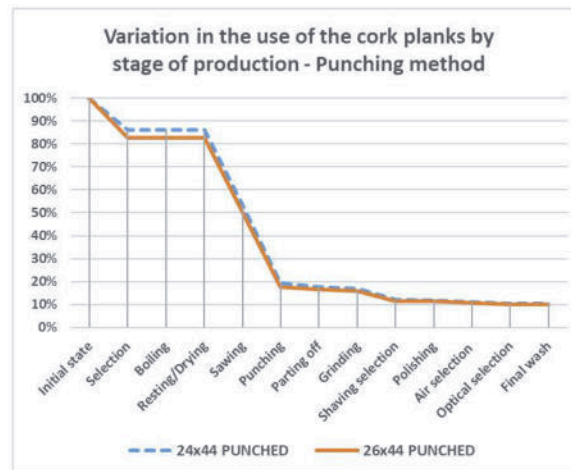


Figure 4. Variation in cork plank usage by production stage—punching method.

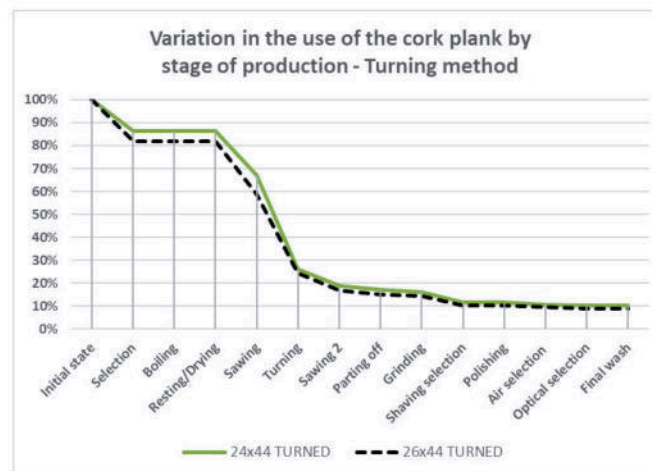


Figure 5. Variation in cork plank usage by production stage—turning method.

As shown in Table 3, the environmental impact percentages were allocated in a way that reflected the relation between cork products and by-products with respect to their commercial value. Applying the economic allocation procedure demonstrated that the greatest impact percentage was allocated to the product generating the greatest added value; that is, natural cork stoppers. Multiple researchers have relied on this allocation procedure. For instance, Ardente and Cellura [19] conducted an extensive study to compare economic allocation with other feasible allocation alternatives. Likewise, economic allocation was used by Ayer et al. [20] to assess the environmental impact of co-products generated in the seafood industry, as well as by Lauri et al. [21] to study wood products. Finally, Thomassen and de Boer [22] used economic allocation to evaluate the environmental effects of a dairy production system.



**Table 3.** Commercial value of natural cork stoppers and by-products.

Item	Cork Stopper Size/€ per kg	
	24 × 44 mm	26 × 44 mm
Cork stoppers	53.80	64.70
Co-products and by-products/€ per kg		
Thin plank		2.05
Granules		1.45
Biomass		0.06
Sawdust		0.27

As previously mentioned, both market price and the percentage of recoverable product, co-products, and by-products to estimate environmental impact allocation percentages were considered. Table 4 shows the results, as estimated using Equation (1), which is widely used in LCA studies [19,23]:

$$R_i = \frac{p_i \cdot \epsilon_i}{\sum_0^n p_i \cdot \epsilon_i} \quad (1)$$

where  $R_i$  stands for the percentage of environmental impact allocated to each product;  $p_i$  is the percentage of product, co-product, or by-product generated in the production process; and  $\epsilon_i$  is the sale price.

Table 4 also summarizes the results from the environmental impact allocation analysis obtained by applying the distribution criterion. This criterion considers the usage and sale costs of products, co-products, and by-products. As can be observed, natural cork stoppers (the main product) demonstrated the highest environmental impact, having the highest added value. There was a slight variation of 2% across the batches, which depended on stopper size and manufacturing method. Additionally, 15.59–15.84% of the total environmental impact was allocated to cork granules, which have low sale costs. Additionally, the thin plank co-product assumed a stable allocation of around 2%. The environmental impact percentages allocated to the remaining by-products (biomass and sawdust) were merely residual.

**Table 4.** Environmental impact allocation of product, co-products, and by-products.

Item	24 × 44 mm Punching	26 × 44 mm Punching	24 × 44 mm Turning	26 × 44 mm Turning
Cork stoppers	82.49%	84.29%	82.05%	82.60%
Co-products and by-products				
Thin plank	1.85%	1.96%	1.87%	2.06%
Granules	15.45%	13.59%	15.84%	15.11%
Biomass	0.06%	0.05%	0.06%	0.06%
Sawdust	0.16%	0.12%	0.18%	0.15%

### 3.2. Environmental Impact

#### 3.2.1. Analysis of Global Environmental Impact

The CML-IA baseline V3.05/EU25 method was used to analyze the environmental impact of producing two types of cork stoppers (sizes 24 × 44 mm and 26 × 44 mm) with two different manufacturing methods, turning and punching. Table 5 summarizes the results found in the global warming (GWP100a) category. Table 6 illustrates the environmental impact by phase. The remaining results can be found in the supplementary data file.



**Table 5.** Global environmental impact of natural cork stopper production (kg CO<sub>2</sub> eq/kg).

	24 × 44 mm		26 × 44 mm	
	Punching	Turning	Punching	Turning
Cork stopper×10rs	1.36×10 <sup>0</sup>	1.43×10 <sup>0</sup>	1.38×10 <sup>0</sup>	1.49×10 <sup>0</sup>
Co-products and by-products				
Thin plank	3.05×10 <sup>-2</sup>	3.25×10 <sup>-2</sup>	3.16×10 <sup>-2</sup>	3.72×10 <sup>-2</sup>
Granul×10s	2.54×10 <sup>-1</sup>	2.76×10 <sup>-1</sup>	2.19×10 <sup>-1</sup>	2.73×10 <sup>-1</sup>
Biomass	9.88×10 <sup>-4</sup>	1.04×10 <sup>-3</sup>	8.05×10 <sup>-4</sup>	1.08×10 <sup>-3</sup>
Sawdust	2.63×10 <sup>-3</sup>	3.13×10 <sup>-3</sup>	1.93×10 <sup>-3</sup>	2.71×10 <sup>-3</sup>

As can be observed, the 24 × 44 mm punched cork stoppers had the lowest environmental impact, whereas the 26 × 44 mm turned cork stoppers had the highest impact. After comparing same-sized punched and turned cork stoppers, it was found that the former had a slightly lower environmental impact. This behavior was directly related to efficient plank usage. For instance, in terms of global warming, the 26 × 44 mm turned cork stoppers were found to have a greater environmental impact (i.e., 1.49×10<sup>0</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg) than the 26 × 44 mm punched stoppers.

The environmental impact of cork co-products and by-products has effects on subsequent production operations. The co-products generated by the turning method were found to have a greater environmental impact than those generated by the punching method. For example, 1 kg of thin plank is used to manufacture multi-piece cork stoppers, and it was found to generate a maximum environmental impact of 3.72×10<sup>-2</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg. On the other hand, granules used in the manufacture of agglomerated corks were found to have an environmental impact of 2.76×10<sup>-1</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg. Finally, residues for biomass seemed to have a low impact on the environment.

The results of this study significantly differ from those reported in similar works. For instance, Rives et al. [24] estimated the environmental impact of natural cork stopper manufacturing to be 1.82×10<sup>0</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg, with a variability range between 51% and 157%. However, the authors did not consider cork co-products and by-products in their analysis, so they allocated the entire environmental impact estimates only to the main product: the cork stoppers. On the other hand, in their analysis of the environmental impact of cork stoppers versus that of aluminum and plastic closures, Amorim and Sggs [25] considered the CO<sub>2</sub> absorption phase from cork oak trees for 100 years, thus resulting in negative findings. For the study, the researchers used survey data collected among cork manufacturers in Portugal. It is also worth mentioning that neither Rives, Fernandez-Rodriguez, Rieradevall, and Gabarrell [24] nor Amorim and Sggs [25] integrated water treatment in their LCA studies. Moreover, in both works, 100% of closure waste is destined to landfills.

### 3.2.2. Environmental Impact Analysis by Phases

In addition to conducting a global environmental impact analysis, the environmental impact of each individual phase of the cork stopper production process was also examined. To this end, the key phase operations were identified and their importance determined with respect to their environmental impact. Table 6 summarizes the results of the analysis in terms of global warming impact per stopper size and manufacturing method.

Phase I, initial operations: This phase of the cork production process comprises the selection, boiling, and resting of cork planks. At this phase, boiling had the greatest environmental impact in terms of global warming, namely 68%, ranging from 1.02×10<sup>0</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg of natural cork stoppers (26 × 44 mm turned cork stoppers) to 9.16×10<sup>-1</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg (24 × 44 mm punched cork stoppers).



Table 6. Environmental impact by phase (kg CO<sub>2</sub> eq/kg of natural cork stoppers).

Operation	Punching		Turning		
	Size: 24 × 44 mm	Size: 26 × 44 mm	Operation	Size: 24 × 44 mm	Size: 26 × 44 mm
<b>Phase 1: Initial Operations</b>					
<i>Selection</i>	1.19×10 <sup>-1</sup>	1.26×10 <sup>-1</sup>	<i>Selection</i>	1.22×10 <sup>-1</sup>	1.39×10 <sup>-1</sup>
<i>Boiling</i>	9.16×10 <sup>-1</sup>	9.36×10 <sup>-1</sup>	<i>Boiling</i>	9.44×10 <sup>-1</sup>	1.02×10 <sup>0</sup>
<i>Resting/Drying</i>	1.16×10 <sup>-1</sup>	1.23×10 <sup>-1</sup>	<i>Resting/Drying</i>	1.19×10 <sup>-1</sup>	1.36×10 <sup>-1</sup>
<b>Phase 2: Manufacturing</b>					
<i>Cutting</i>	1.13×10 <sup>-2</sup>	1.38×10 <sup>-2</sup>	<i>Cutting 1</i>	1.19×10 <sup>-2</sup>	1.38×10 <sup>-2</sup>
<i>Punching</i>	1.49×10 <sup>-2</sup>	1.84×10 <sup>-2</sup>	<i>Turning</i>	2.02×10 <sup>-2</sup>	2.59×10 <sup>-2</sup>
			<i>Cutting 2</i>	2.34×10 <sup>-2</sup>	2.91×10 <sup>-2</sup>
<i>Parting off</i>	3.48×10 <sup>-3</sup>	4.64×10 <sup>-3</sup>	<i>Parting off</i>	3.51×10 <sup>-3</sup>	4.45×10 <sup>-3</sup>
<i>Grinding</i>	2.31×10 <sup>-2</sup>	2.88×10 <sup>-2</sup>	<i>Grinding</i>	2.24×10 <sup>-2</sup>	2.77×10 <sup>-2</sup>
<i>Shaving</i>	3.24×10 <sup>-3</sup>	4.11×10 <sup>-3</sup>	<i>Shavings selection</i>	3.09×10 <sup>-3</sup>	3.94×10 <sup>-3</sup>
<i>Polishing</i>	3.61×10 <sup>-3</sup>	4.54×10 <sup>-3</sup>	<i>Polishing</i>	3.42×10 <sup>-3</sup>	4.35×10 <sup>-3</sup>
<i>Optical selection</i>	2.22×10 <sup>-3</sup>	2.84×10 <sup>-3</sup>	<i>Optical selection</i>	2.09×10 <sup>-3</sup>	2.71×10 <sup>-3</sup>
<i>Visual selection</i>	1.98×10 <sup>-3</sup>	2.52×10 <sup>-3</sup>	<i>Visual selection</i>	1.85×10 <sup>-3</sup>	2.41×10 <sup>-3</sup>
<i>Final wash</i>	8.59×10 <sup>-2</sup>	9.87×10 <sup>-2</sup>	<i>Final wash</i>	8.40×10 <sup>-2</sup>	9.82×10 <sup>-2</sup>
<b>Phase 3: Final Operations</b>					
<i>Ink printing</i>	2.85×10 <sup>-3</sup>	3.24×10 <sup>-3</sup>	<i>Ink printing</i>	2.53×10 <sup>-3</sup>	3.14×10 <sup>-3</sup>
<i>Siliconizing</i>	5.78×10 <sup>-3</sup>	6.80×10 <sup>-3</sup>	<i>Siliconizing</i>	5.55×10 <sup>-3</sup>	6.66×10 <sup>-3</sup>
<i>Waxing</i>	8.50×10 <sup>-3</sup>	1.01×10 <sup>-2</sup>	<i>Waxing</i>	8.20×10 <sup>-3</sup>	9.88×10 <sup>-3</sup>
<i>Drying</i>	1.22×10 <sup>-3</sup>	1.47×10 <sup>-3</sup>	<i>Drying</i>	1.15×10 <sup>-3</sup>	1.42×10 <sup>-3</sup>
<i>Packaging</i>	1.91×10 <sup>-3</sup>	2.30×10 <sup>-3</sup>	<i>Packaging</i>	1.80×10 <sup>-3</sup>	2.21×10 <sup>-3</sup>
<b>Construction and Demolition of Building Infrastructures and Machinery Manufacturing and Maintenance</b>					
	1.51×10 <sup>-2</sup>	1.54×10 <sup>-2</sup>		1.50×10 <sup>-2</sup>	1.51×10 <sup>-2</sup>

Phase 2, manufacturing: This phase involves nine operations in the punching method and ten operations in the turning method. The results indicated that producing turned cork stoppers consumed more energy than producing punched stoppers. For instance, punching 24 × 44 mm cork stoppers out of the planks had an environmental impact of 1.55×10<sup>-2</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg, whereas turning cork strips and cutting them (both tasks are necessary to make turned cork stoppers) had an environmental impact of 5.62×10<sup>-2</sup> kg CO<sub>2</sub> eq per kg of natural cork stoppers. Following such results, and considering the previous findings on efficient plank usage, producing 1 kg of 26 × 44 mm turned cork stoppers had the greatest environmental impact in terms of global warming. On the other hand, the environmental impact of wastewater treatment at the final stage was not shown to be significant. In this case, the production process consumed little water, since the resulting leachates contained only small traces of cork powder.

Phase 3, final operations: This phase encompasses branding and packaging operations. Overall, all the final operations had a low impact on global warming, with waxing being the greatest contributor due to factors such as energy consumption and paraffin use. In this phase of the production process, 24 × 44 mm turned cork stoppers had the highest environmental impact (9.88×10<sup>-2</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg).

Considering the high environmental impact generated by the use of electricity from the grid, it is possible to address options for reductions in environmental impact with the use of renewable energy sources. By installing 100 kW/h of photovoltaic solar energy for domestic use, it is possible to reduce the environmental impact in the boiling stage from 9.16×10<sup>-1</sup> to 1.88×10<sup>-1</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/kg in the punching of 24 × 44 mm cork stoppers, i.e., with a reduction of up to 80% of the impact.

This solution is viable from the environmental perspective, but it would need the support of the power grid for the months with low performance levels of the photovoltaic panels. If the solution is adopted by a biomass facility of 100 kW/h, it would be possible



to reduce the environmental impact of the boiling stage down to  $4.2 \times 10^1$  kg CO<sub>2</sub>, that is, a reduction of 55%.

Overall, the production of natural punched stoppers was found to have a lower environmental impact than the production of natural turned stoppers. Even though variations across the two manufacturing methods are of little significance, a difference of 9% was found for the 26 × 44 mm stoppers and a difference of 4% was reported for the 24 × 44 mm stoppers. Regarding the production stages; Phase I was found to have the highest effects on the environment. Specifically, the plank boiling and wastewater treatment process accounted for nearly 68% of the total environmental impact of the entire production process. Such results might compromise efforts from cork manufacturers to reduce the environmental footprint of cork stopper production to some extent, since the operations involved in Phase I are irreplaceable within the production process. Finally, infrastructure construction and machinery manufacturing and maintenance were found to have minimal environmental impacts due to both long amortization periods and the fact that most infrastructure materials and machinery components can be eventually recycled. In fact, according to the La Rioja 2016–2026 Waste Management Plan and its indexed statistics (Rioja, 2017), 69.431% of concrete waste was recycled in 2016, whereas 100% of metal machinery components can be recycled.

#### 4. Conclusions

The authors of this research studied the environmental impact of the natural cork stopper production process. To this end, two manufacturing methods—turning and punching—and two stopper sizes—24 × 44 mm and 26 × 44 mm—were studied. An environmental analysis per manufacturing method and cork stopper size was conducted by considering effective usage of raw material. Similarly, the environmental impact of the commercial by-products generated throughout the entire manufacturing process were assessed. The results were obtained after analyzing ten productive lots per cork stopper size and manufacturing method. The LCA results indicated that the punching method made a more efficient use of raw materials than the turning method. Specifically, producing 24 × 44 mm and 26 × 44 mm punched cork stoppers increased efficient plank usage by 10.47% and 10.10%, respectively. Conversely, producing 24 × 44 and 26 × 44 mm turned cork stoppers reduced efficient plank usage to 10.13% and 8.97%, respectively.

The LCA of the study considered not only the main product (cork stoppers) but also the co-products and by-products resulting from the cork manufacturing process. To this end, allocation estimations were performed to determine the percentage of environmental impact of each product. For an allocation analysis, the ISO 14044: 2006 standard claims that if the physical relationship cannot be used as the basis for allocation, inputs must be allocated to the products in a way that reflects other relationships between them, such as their commercial value. According to the results, granules (used for manufacturing agglomerated corks) were allocated 13.6–15.8% of the total environmental impact, whereas the co-product used for multi-piece corks were allocated much less (1.85–2.06% of the total environmental impact). Other significant sub-products include material for biomass (6.50–6.91% of the total environmental impact) and sawdust (3.35–4.34% and 0.12–0.18% of environmental impact).

The findings of this research also indicate that the 24 × 44 mm stoppers produced with the punching method had a low environmental impact. In terms of global warming, the 24 × 44 mm punched cork stoppers had an impact of 1.360 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, whereas the 26 × 44 mm turned cork stoppers had the highest impact, i.e., 1.490 kg CO<sub>2</sub> eq/kg. The production stages of boiling and wastewater treatment—both comprising Phase I—had the greatest environmental impact at nearly 68% of the total estimated, as cork boiling uses a significant amount of water and energy. In this sense, the potential use of cork biomass as a partial substitute for electrical energy could slightly reduce environmental impacts. On the other hand, at the plank boiling stage, replacing water with steam at 120 °C in an autoclave would substantially minimize water consumption and thus the

environmental impact of initial cork manufacturing operations; however, this solution might increase energy consumption rates.

It is also worth highlighting that the use of energy self-consumption facilities based on solar energy and/or biomass help to reduce the environmental impact of the high energy consumption stages. For instance, by installing 100 kW/h of photovoltaic energy, the environmental impact in the boiling stage can be reduced to 80%.

In conclusion, there is a clear relationship between the environmental impact and efficient usage of raw material. In turn, the efficient use of cork planks depends on both the cork manufacturing method and stopper size. Finally, this research also demonstrates that production lots are a key element when assessing the environmental impact of cork stopper production. There is not an ideal lot that can make 100% efficient use of the raw material.

**Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at [www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture12050636/s1](http://www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture12050636/s1): Table S1: Global environmental impact per kg of natural cork stopper, CML methodology, and comparative by size and method of manufacture; Table S2: Distribution of global environmental impact per kg of natural cork stopper, CML and punched methodologies; Table S3: Distribution of global environmental impact per kg of natural cork stopper, CML and turned methodologies.

**Author Contributions:** Conceptualization, F.J.F.-M. and J.B.-F.; methodology, E.M.-C. and E.J.-M.; software, J.L.G.-A.; validation, F.J.F.-M. and E.M.-C.; formal analysis, J.L.G.-A., J.-I.L.-B., and E.M.-C.; investigation and resources, F.J.F.-M.; data curation, E.M.-C.; writing—original draft preparation, J.L.G.-A. and J.B.-F.; writing—review and editing, E.M.-C.; visualization, J.B.-F. and J.-I.L.-B.; supervision, F.J.F.-M.; project administration, F.J.F.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research has received funding from the *Instituto de Estudios Riojanos “IER”* within the project *Newcork2Wine*”.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Please contact the corresponding author.

**Acknowledgments:** The companies Espadan Corks S.L. and Double Cork S.L. are thanked for their contributions and for allowing access to their facilities for data collection.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Dehane, B. Caracterización del crecimiento y de la calidad de corcho de los alcornoques del Noroeste de Argelia (región de Orán). *Rev. Ecosistemas* **2019**, *28*, 97–105.
2. MAPA. *Annual Statistics of Other Forest Uses—Estadística Anual de Otros Aprovechamientos Forestales*; Ministry of Agriculture, Fisheries and Food—Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Spain 2017.
3. Pereira, H. *Cork: Biology, Production and Uses*, 1st ed.; Elsevier Science: Berlin, Germany, 2007.
4. Silva, A.; Lambri, M.; De Faveri, M. Evaluation of the performances of synthetic and cork stoppers up to 24 months post-bottling. *Eur. Food Res. Technol.* **2003**, *216*, 529–534.
5. Chatonnet, P.; Labadie, D.; Boutou, S. Study of chloroanisoles assay and tca assay validation in wine and cork stoppers soaked in dilute alcohol solution using SIDA-HSSPME-GC-MS/EL-SIM. *OENO One* **2005**, *39*, 137–147.
6. Brajkovich, M.; Tibbits, N.; Peron, G.; Lund, C.M.; Dykes, S.I.; Kilmartin, P.A.; Nicolau, L. Effect of screwcap and cork closures on SO<sub>2</sub> levels and aromas in a Sauvignon blanc wine. *J. Agric. Food Chem.* **2005**, *53*, 10006–10011.
7. Conde, E.; Cadahía, E.; García-Vallejo, M.C.; Fernández de Simón, B.; González Adrados, J.R. Low molecular weight polyphenols in cork of *Quercus suber*. *J. Agric. Food Chem.* **1997**, *45*, 2695–2700.
8. Mazzoleni, V.; Caldentey, P.; Silva, A. Phenolic compounds in cork used for production of wine stoppers as affected by storage and boiling of cork slabs. *Am. J. Enol. Vitic.* **1998**, *49*, 6–10.
9. Garza, J.A.V.; Caballero, H.S. El corcho, un material irremplazable. In *Investigación y Ciencia*; Universidad Autónoma de Aguascalientes: Aguascalientes, Mexico, 2003; pp. 48–51.



10. Liu, D.; Xing, R.R.; Li, Z.; Yang, D.M.; Pan, Q.H. Evolution of volatile compounds, aroma attributes, and sensory perception in bottle-aged red wines and their correlation. *Eur. Food Res. Technol.* **2016**, *242*, 1937–1948. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2693-1>.
11. Reynolds, D.; Rahman, I.; Bernard, S.; Holbrook, A. What effect does wine bottle closure type have on perceptions of wine attributes? *Int. J. Hosp. Manag.* **2018**, *75*, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2018.05.023>.
12. Benito Lázaro, D. Revisión y Desarrollo de Modelos de Clasificación del Corcho en Plancha. 2014. Available online: [https://oa.upm.es/30795/1/PFC\\_DAVID\\_BENITO\\_LAZARO\\_1.pdf](https://oa.upm.es/30795/1/PFC_DAVID_BENITO_LAZARO_1.pdf) (accessed on 2 February 2018).
13. Sánchez-González, M.; Pérez-Terrazas, D. Assessing the percentage of cork that a stopper should have from a mechanical perspective. *Food Packag. Shelf Life* **2018**, *18*, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.10.009>.
14. Sánchez-González, M.; Pérez-Terrazas, D. Dataset of mechanical properties from different types of wine stopper: Micro-agglomerated, natural cork and synthetic. *Data Brief* **2018**, *21*, 2103–2109. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.051>.
15. Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Environmental analysis of raw cork extraction in cork oak forests in southern Europe (Catalonia—Spain). *J. Environ. Manag.* **2012**, *110*, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.024>.
16. Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Integrated environmental analysis of the main cork products in southern Europe (Catalonia—Spain). *J. Clean. Prod.* **2013**, *51*, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.015>.
17. Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Gabarrell, X.; Rieradevall, J. Environmental analysis of cork granulate production in Catalonia—Northern Spain. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *58*, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.007>.
18. Demertzi, M.; Silva, R.P.; Neto, B.; Dias, A.C.; Arroja, L. Cork stoppers supply chain: Potential scenarios for environmental impact reduction. *J. Clean. Prod.* **2016**, *112*, 1985–1994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.072>.
19. Ardente, F.; Cellura, M. Economic allocation in life cycle assessment: The state of the art and discussion of examples. *J. Ind. Ecol.* **2012**, *16*, 387–398.
20. Ayer, N.W.; Tyedmers, P.H.; Pelletier, N.L.; Sonesson, U.; Scholz, A. Co-product allocation in life cycle assessments of seafood production systems: Review of problems and strategies. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2007**, *12*, 480.
21. Lauri, L.; Roope, H.; Atsushi, T.; Tuovi, V.; Olli, D. Environmental product declaration of timber products: The impact of allocation method to the impact categories. *J. Clean. Prod.* **2020**, *256*, 120386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120386>.
22. Thomassen, M.A.; de Boer, I.J.M. Evaluation of indicators to assess the environmental impact of dairy production systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2005**, *111*, 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.013>.
23. Guinée, J.B.; Heijungs, R.; Huppes, G. Economic allocation: Examples and derived decision tree. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2004**, *9*, 23.
24. Rives, J.; Fernandez-Rodriguez, I.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe (Catalonia—Spain). *J. Clean. Prod.* **2011**, *19*, 259–271.
25. PwC/ECOBILAN (2008). Evaluation of the Environmental Impacts of Cork Stoppers versus Aluminum and Plastic Closures: Analysis of the Life Cycle of Cork, Aluminium and Plastic Wine Closures, Report Prepared for Corticeira Amorim, SGPS, SA by PricewaterhouseCoopers/ECOBILAN, October 2008.



### 9.3. Otras publicaciones en curso

Actualmente y como consecuencia de la investigación desarrollada en esta tesis doctoral, se han completado y enviado 2 artículos a revistas indexadas en JCR con un alto factor de impacto.

Se procede a reflejar el título y objeto de dichas publicaciones.

#### ARTÍCULO 3

**TÍTULO:** Influence of steam cleaning processes on the geometry of finished cork stoppers

**RESUMEN:** el corcho presenta grandes ventajas entre las que destacan su ligereza, flexibilidad y capacidad para permitir el paso de gases, pero también presenta problemas derivados de su heterogeneidad y de su capacidad para absorber y transmitir el corcho transmite aromas nocivos al vino embotellado. Entre estos aromas se encuentran el 2,4,6-tricloroanisol (TCA) y el 2,4,6-tribromoanisol (TBA), asociados al cartón húmedo y a los aromas de moho. Se han desarrollado numerosos tratamientos para reducir y eliminar el contenido de tricloroanisol en los tapones, muchos de ellos asociados al efecto combinado del vapor, el tiempo, la temperatura y la presión. En el presente estudio, se ensayaron diferentes tratamientos en tapones de corcho con el fin de determinar la influencia de estos tratamientos en la geometría y las características mecánicas del tapón, así como los límites de aplicación de cada uno de estos parámetros en los tapones acabados.

**ARTÍCULO 4**

**TÍTULO:** Comparative analysis of the efficacy of different natural cork stopper sanitization technologies

**RESUMEN:** si bien los tapones de corcho han sido utilizados durante siglos para el cierre de vinos tranquilos y espumosos, presentan una serie de defectos que pueden afectar a la calidad de los caldos conservados con este cierre. Entre esos defectos que se pueden presentar en los tapones de corcho natural, destaca el derivado de la presencia del 2,4,6-tricloroanisol o TCA y el 2,4,6-tribromoanisol o TBA. Se han utilizado multitud de tratamientos para eliminar estos defectos. El presente estudio busca realizar un análisis comparativo de dichos tratamientos para determinar su eficacia, así como su impacto en el propio proceso de fabricación de tapones de corcho.



upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa