

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS Y VALORIZACIÓN DE
RESIDUOS PARA SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN**

AUTOR
ANTONIO FERRÁNDEZ GARCÍA

DIRECTORES
MANUEL FERRÁNDEZ-VILLENA GARCÍA
MARIA TERESA FERRÁNDEZ GARCÍA

Orihuela, Julio de 2017



D. Manuel Ferrández-Villena García, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández y Dña. M^a Teresa Ferrández García, Dra. Arquitecto, Profesora Contratada Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández

INFORMAN

Que la Tesis Doctoral que lleva por título "**Análisis de sistemas constructivos y valorización de residuos para su aplicación en la construcción**", de la que es autor el Arquitecto D. Antonio Ferrández García, ha sido realizada íntegramente bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería, en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela perteneciente a la Universidad Miguel Hernández, durante el periodo comprendido entre los años 2014 y 2017.

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne los requisitos establecidos en el R.D. 1393/2007, de 29 de octubre (B.O.E. de 30 de octubre de 2007), autorizamos su presentación ante la Secretaría de la Comisión de Doctorado de la Universidad Miguel Hernández.

Y para que conste a los efectos oportunos, expedimos el presente informe en Orihuela, a 27 de Julio de 2017.

Los Directores de la Tesis

Fdo: Manuel Ferrández-Villena García

Fdo: M^a Teresa Ferrández García



D. José Ramón Díaz Sánchez, Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad y Director del Departamento de Tecnología Agroalimentaria de la Universidad Miguel Hernández,

INFORMA

Que atendiendo al informe presentado por el Dr. Manuel Ferrández-Villena García, Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández y la Dra. M^a Teresa Ferrández García, Arquitecto, Profesora Contratada Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández, la Tesis Doctoral titulada "**Análisis de sistemas constructivos y valorización de residuos para su aplicación en la construcción**" de la que es autor el Arquitecto D. Antonio Ferrández García y que ha sido realizada bajo la dirección de los Doctores citados, puede ser presentada para su correspondiente exposición pública.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente informe en Orihuela, a 27 de Julio de 2017.

El Director del Departamento

Fdo: José Ramón Díaz Sánchez



Resumen

RESUMEN

El reglamento europeo de productos de construcción (CPR 305, 2011) establece la necesidad de desarrollar materiales y productos sostenibles y determinar su impacto ambiental. Para ello la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es recomendable ya que es la herramienta más reconocida a nivel internacional para evaluar el perfil ambiental de productos. A través de este método acompañado de un análisis de costes, se han identificado las variables clave del impacto ambiental y económico de los 5 sistemas constructivos de particiones interiores más representativos en España, concluyendo que los sistemas autoportantes de paneles de yeso son los más eco-eficientes. Una mejora a este sistema es la sustitución de los paneles por alternativas renovables. Utilizando residuos de poda del viñedo (*Vitis vinífera* L.) por un lado, y de palmera canaria (*Phoenix Canariensis*) por otro, se han fabricado tableros experimentales que cumplen los requisitos mínimos para su uso en construcción. Los primeros son aislantes y con buen comportamiento frente a fuego y los últimos se pueden producir sin adhesivos y con un coste energético menor. Es por ello que la aplicación de estas alternativas en la construcción es clave en la mejora del rendimiento energético, medioambiental y económico de los edificios y, de esta manera, proteger el medio ambiente.

*The Construction Product Regulations (CPR 305, 2011) established, among other things, the need to develop environmentally-friendly construction products and to assess their environmental impact. To do so, the implementation of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology is recommendable since it is the tool that is widely recognized internationally for evaluating the environmental performance of products and systems. Using this method and adding an economic analysis, the key variables of environmental and economic impacts were identified for the 5 alternative solutions that can be used for interior partition walls commonly used in Spain, concluding that the gypsum plasterboard are the most eco-efficient. Improving this system is feasible by replacing the gypsum panels for renewable alternatives. By reusing residues of vine prunings (*Vitis vinífera* L.) and canary date palm (*Phoenix canariensis*), experimental panels were manufactured which fulfill the minimum standards for being implemented in buildings. *Vitis vinífera* L. panels had a good thermal insulation capacity and good behavior against fire whereas *P. canariensis* boards can be manufactured without adhesives with a low energy consumption process. The implementation of these new materials is a key factor in the improvement of the energetic, environmental and economic performance of the buildings and, this way, protect the environment.*

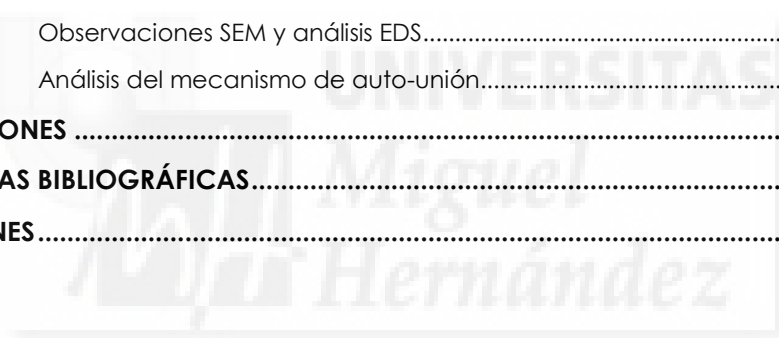


Índice

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	6
2.1. OBJETIVO GENERAL	6
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3. MATERIALES Y MÉTODOS	7
3.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PARTICIONES INTERIORES:	7
3.1.1. MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	7
3.1.2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	8
3.1.2.1. Alcance del estudio	9
3.1.2.2. Inventario de Ciclo De Vida	10
3.1.2.3. Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida	15
3.1.2.4. Interpretación de Resultados	19
3.1.1. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	19
3.2. FABRICACIÓN DE TABLEROS EXPERIMENTALES	21
3.2.1. MATERIALES	21
3.2.1.1. Tableros de Poda de Viñedo.....	21
3.2.1.2. Tableros de Biomasa de Palmera Canaria	21
3.2.2. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO	22
3.2.3. PROCESO DE FABRICACIÓN	22
3.2.4. CLASES Y COMPOSICIÓN DE LOS TABLEROS	25
3.2.4.1. Tableros de Poda de Viñedo.....	25
3.2.4.2. Tableros de Biomasa de Palmera Canaria	25
3.2.5. ENSAYOS EXPERIMENTALES	26
3.2.5.1. Ensayo de Humedad.	27
3.2.5.2. Densidad de los Tableros.	28
3.2.5.3. Resistencia a Flexión.	28
3.2.5.4. Ensayo a Tracción Perpendicular o Cohesión Interna	29
3.2.5.5. Ensayo del Hinchamiento en Espesor	31
3.2.5.6. Ensayo de Absorción de Agua	32
3.2.5.7. Ensayo de Inflamabilidad	33
3.2.5.8. Ensayo de conductividad térmica.....	34
3.2.5.9. Microscopia Electrónica De Barrido (SEM)	35
3.2.6. MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL	36
3.2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	38

3.2.8.	INFLUENCIA DE VARIABLES DE FABRICACIÓN EN LAS PROPIEDADES DE LOS TABLEROS.....	39
3.2.9.	CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS DE PARTÍCULAS	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	ANÁLISIS DE LOS MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE PARTICIONES INTERIORES.....	41
4.1.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	41
4.1.2.	DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS	43
4.1.3.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	43
4.2.	TABLEROS EXPERIMENTALES	46
4.2.1.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.2.1.1.	Propiedades Físicas	46
4.2.1.2.	Propiedades mecánicas.....	49
4.2.1.3.	Clasificación de los tableros experimentales.....	54
4.2.1.4.	Resistencia a fuego.....	55
4.2.1.5.	Paneles sin adhesivos.....	56
4.2.1.6.	Observaciones SEM y análisis EDS.....	58
4.2.1.7.	Análisis del mecanismo de auto-unión.....	60
5.	CONCLUSIONES	61
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
	PUBLICACIONES.....	75



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Sección vertical de las soluciones constructivas a estudio	8
Figura 2.	Esquema de un ACV según la norma UNE-EN-ISO 14040 (2006).....	9
Figura 3.	Alcance del estudio	9
Figura 4.	Procedimiento para la elaboración de un inventario.	10
Figura 5.	Elementos de la etapa de evaluación del impacto.	15
Figura 6.	Diagrama esquemático del Eco-Indicador'95 (Goedkoop et al. 1995 y 1996).....	17
Figura 7.	Diagrama esquemático del Eco-Indicador'99 (Goedkoop et al. 1999 y 2000).....	18
Figura 8.	Diagrama esquemático del EPS 2000 (Steen, 1999a,b).....	18
Figura 9.	Relaciones entre los elementos en la etapa de interpretación con las otras etapas del ACV.	19
Figura 10.	Residuos de poda de viñedos.....	21
Figura 11.	Biomasa de palmera canaria.	21
Figura 12.	Desfibradora de cuchillas.....	23
Figura 13.	Cuchillas de la desfibradora.....	23
Figura 14.	Molde para formar la manta del tablero.....	23
Figura 15.	Prensa de platos calientes	24
Figura 16.	Cortadora mecánica.....	24
Figura 17.	Encoladora horizontal	25
Figura 18.	Medidor de humedad de laboratorio	27
Figura 19.	Punto de medida para determinación del espesor.	28
Figura 20.	Ensayo normalizado (EN-310). Croquis de colocación de rodillos.	29
Figura 21.	Probetas ensayo tracción perpendicular.	30
Figura 22.	Tacos de agarre de probetas.	30
Figura 23.	Cubeta para baño de agua con termostato.....	31
Figura 24.	Algunas probetas en inmersión en agua	32
Figura 25.	Algunas probetas después de inmersión en agua.	32
Figura 26.	Equipo de inflamabilidad mediante aplicación directa de llama.....	33
Figura 27.	Equipo medidor de flujo de calor.....	35
Figura 28.	Máquina universal de ensayos.....	36
Figura 29.	Indicadores ambientales por categoría de impacto según CML2001, por etapa del ciclo de vida.....	41
Figura 30.	Indicadores ambientales según los métodos Eco-Indicador'99 y EPS, por etapa del ciclo de vida.....	42

Figura 31. Costes económicos de cada solución constructiva por etapa del ciclo de vida	42
Figura 32. Análisis de la eco-eficiencia: impacto ambiental frente a coste total (€).....	44
Figura 33. Tableros de poda de viñedo	46
Figura 34. Tableros de tronco de palmera canaria con almidón.	47
Figura 35. Resultados medios de MOR de los paneles de poda de viñedo	49
Figura 36. Resultados medios de MOE de los paneles de poda de viñedo.....	50
Figura 37. Resultados medios de IB de los paneles de poda de viñedo	50
Figura 38. Resultados medios de MOR de los paneles de palmera canaria con almidón	51
Figura 39. Resultados medios de MOE de los paneles de palmera canaria con almidón	51
Figura 40. Resultados medios de IB de los paneles de palmera canaria con almidón	52
Figura 41. Resultados medios de MOR de los paneles de palmera canaria sin adhesivos	53
Figura 42. Resultados medios de MOE de los paneles de palmera canaria sin adhesivos	53
Figura 43. Resultados medios de IB de los paneles de palmera canaria sin adhesivos	54
Figura 44. Muestras de paneles de poda de viñedo después del ensayo de inflamabilidad	55
Figura 45. Tipos de tableros fabricados de palmera canaria sin adhesivos.	57
Figura 46. Micrografía de una sección longitudinal de tábala.	58
Figura 47. Micrografía de una sección longitudinal de tronco.....	58
Figura 48. Micrografía de una sección longitudinal de raquis.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Mix eléctrico correspondiente a España. REE, 2012. Informe anual 2011. Red Eléctrica Española.....	11
Tabla 2.	Especificaciones incorporadas al inventario de los materiales que conforman cada alternativa.....	12
Tabla 3.	Características del transporte de materiales a obra.....	13
Tabla 4.	Datos de inventario del ciclo de vida de 1 m ² de cada una de las alternativas de las soluciones constructivas de particiones.....	13
Tabla 5.	Datos de inventario para la etapa de colocación en obra.....	14
Tabla 6.	Categorías de impacto y unidades en que se expresan propuestas por el CML 2000.	16
Tabla 7.	Costes unitarios que interviene a lo largo del ciclo de vida de cada uno de los sistemas constructivos bajo estudio	20
Tabla 8.	Tipos de tablero de partícula de poda de viñedo	25
Tabla 9.	Tipos de tablero de partícula de biomasa de palmera canaria y almidón	26
Tabla 10.	Tipos de tablero de partícula sin adhesivos de biomasa de palmera canaria	26
Tabla 11.	Datos técnicos de la máquina de ensayos	37
Tabla 12.	Requisitos de los tableros de partículas según la norma EN 312 (2010)	40
Tabla 13.	Propiedades Físicas de los tableros de poda de viñedo.....	46
Tabla 14.	Propiedades Físicas de los tableros de palmera canaria con almidón ...	47
Tabla 15.	Propiedades Físicas de los tableros de palmera canaria sin adhesivos	48
Tabla 16.	Resultados del ensayo de inflamabilidad de los paneles de poda de viñedo.....	55
Tabla 17.	Parámetros de los procesos de fabricación de tableros de partículas de palmera sin adhesivos.....	56
Tabla 18.	Valores de las propiedades obtenidas por los autores de la Tabla 17.....	56
Tabla 19.	Composición química EDS de diferentes partes de P. Canariensis.	59

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los profesionales dedicados a la construcción tienen la posibilidad de elegir entre diferentes sistemas constructivos y materiales para adoptar en el diseño de sus obras. Sin embargo, no cuentan con información objetiva que les permita seleccionar una u otra alternativa ateniéndose a su impacto ambiental. Esto determina que deban guiarse por su intuición o por la praxis más consolidada, lo que no siempre conduce a los mejores resultados desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Los edificios, en su etapa de vida útil, se componen de varios elementos que aseguran las necesidades básicas de seguridad, funcionalidad y habitabilidad. Entre estos elementos destaca la envolvente del edificio, puesto que es el que le confiere las tres necesidades básicas anteriores. De ahí que hasta ahora la mayor parte de los estudios científicos sobre edificación se hayan centrado en esta parte.

Las particiones interiores, entendiendo éstas como las particiones verticales, tienen la función de dividir espacios, requisito último para la habitabilidad y funcionalidad de los edificios. En superficie construida, los metros cuadrados de particiones interiores superan en mucho los de la envolvente, por lo que es de especial importancia el sistema constructivo elegido a la hora de poder hacer un análisis ambiental completo de la edificación.

El reglamento europeo de productos de construcción (CPR 305, 2011) establece, entre otras exigencias, la necesidad de desarrollar materiales y productos sostenibles y determinar su impacto ambiental utilizando Declaraciones de Impacto Ambiental (ISO 14025, 2006) cuando esto sea posible. En ambos casos, la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es recomendable ya que es la herramienta más reconocida a nivel internacional para evaluar el perfil ambiental de productos. A pesar de que las técnicas de ACV tienen ciertas limitaciones, sigue siendo una herramienta científica muy potente para evaluar el impacto ambiental en el sector de la construcción (Buyle et al., 2013).

Actualmente, los estudios que aplican la metodología ACV para analizar el impacto ambiental en el sector de la construcción se centran, principalmente, en el análisis del rendimiento energético de las soluciones constructivas para la envolvente del edificio, pues es la parte más expuesta y, por tanto, con mayor influencia sobre el consumo global del edificio (Arena et al., 2006, Zabalza Bribián et al., 2009, Ottelé et al., 2011, Stazi, et al., 2012, Taborianski et al., 2012, Monteiro y Freire, 2012, Rincón et al., 2013, Radhi y Sharples, 2013) y en las alternativas de sistemas de climatización durante la etapa de uso (Blom et al. 2010, Koroneos et al., 2012, Jeon et al., 2013, Menoufi et al., 2013). Sin embargo, esos impactos ambientales llegan a enmascarar la influencia de los materiales utilizados en los edificios en la etapa de construcción y posterior demolición (Arena et al., 2006) ya que las particiones interiores suponen la mayor contribución material en edificación en comparación con otros elementos no estructurales.

A pesar de esto, durante el proceso de toma de decisiones, el coste económico es un factor importante a tener en cuenta debido a que en muchos casos no se disponen datos de las repercusiones medioambientales de los sistemas constructivos o materiales en proyecto.

Desde el punto de vista ambiental, la metodología LCA ha sido la más aplicada para obtener indicadores ambientales. El ciclo de vida de los sistemas constructivos comienza con la obtención de los materiales que lo conforman, y termina con su tratamiento como residuo de construcción, acabando así con su periodo de vida útil.

Entre los datos de inventario encontrados en la literatura, pueden diferenciarse datos relativos tanto a materiales de construcción como a sistemas constructivos. Analizando las publicaciones centradas en el análisis de sistemas constructivos, únicamente tres trabajos evalúan el comportamiento ambiental de particiones interiores, las cuales son objeto de este estudio: comparan ambientalmente los tres sistemas de partición más representativos de UK, Mateus et al., (2013) compara dos soluciones constructivas comúnmente utilizadas en Portugal y Ortiz et al., (2009), con el objetivo de optimizar un edificio en su conjunto, evalúa el comportamiento ambiental de siete tipos de particiones basadas en el Código Técnico (2006).

En cuanto a la procedencia de los datos que se utilizan para conformar el inventario del ciclo de vida de cada material de la construcción y/o solución constructiva, se recurre a bases de datos comerciales de LCI, principalmente, Ecoinvent v2 (2007) y bases de datos de materiales dentro del software SimaPro (2014) como Idemat (2001), Franklin USA database (2009), Buwal 250 (1996), etc. La información obtenida de dichas bases de datos suele completarse con datos primarios e información procedente de diferente bibliografía.

Mayoritariamente los estudios obtienen indicadores ambientales para diferentes categorías de impacto (mid-point method), siendo el método CML2001 el más aplicado. Los indicadores más utilizados son el potencial de calentamiento global y consumo energético. En los estudios en los que se aplica un método de ponderación final (end-point method), el método Eco-Indicador'99 (2000) es el más utilizado, seguido del EPS 2000 (Steen, 1999a y 1999b).

Analizando el aspecto económico, de todas las referencias analizadas, únicamente, tres trabajos incorporan a sus análisis ambientales el estudio de factores económicos (Mateus et al., 2013, Ortiz et al., 2009 y Reza et al., 2011), mientras que otros se centran globalmente en el aspecto económico de las viviendas (Cuéllar et al., 2013, Keoleian et al., 2000 y Kim et al., 2011).

Es por ello necesario analizar las particiones interiores desde un punto de vista ambiental y económico, identificar las variables involucradas y proponer soluciones al respecto ya que hoy en día existen alternativas para reemplazar muchos de los materiales utilizados en edificación por otros más sostenibles y económicos.

En este sentido, uno de las apuestas más prometedoras es la valorización de residuos agrícolas o forestales. La agricultura produce una gran cantidad de desechos que no son debidamente gestionados tanto económica como medioambientalmente. Además de reducir y reciclar estos desechos, existe la opción de utilizar nuevos procesos para la utilización de estos residuos en la construcción. En cuanto al sector maderero, cada vez está más afectado por el incremento del consumo de las materias primas para su utilización en el sector energético, por lo que la reutilización de residuos vegetales podría representar una buena alternativa a la madera.

En Europa, las podas del viñedo (*Vitis vinífera* L.) forman uno de los residuos más abundantes. Tradicionalmente, las dos maneras más comunes de deshacerse de las podas han sido su cremación in situ sin recuperación energética, lo que produce contaminación aérea, o su machacado y reincorporación al suelo, lo que involucra una posible colonización de larvas, parásitos y hongos, y su subsecuente fuente de enfermedades. Por otro lado, las palmeras generan muchísima cantidad de biomasa que actualmente termina en vertederos.

Una forma de reutilización de estos residuos es su valorización como combustible. Varios estudios emplean residuos agrícolas con fines energéticos, sobre todo en la fabricación de pellets. González-Barragán et al. (2007) dirigió una investigación sobre la utilización de residuos de poda de viñedo para pellets, concluyendo que los contenidos de componentes volátiles y cenizas eran demasiado altos en comparación con los fabricados de maderas. Además, hay informes de que los pellets de partículas de viñedo causan incrustaciones y corrosión en los intercambiadores de calor de las calderas debido a su alto contenido en cloro, azufre y nitrógeno. Hasta hoy, los pellets producidos de podas del viñedo no cumplen con los estándares europeos debido a su alto contenido en cenizas (3,2%) y nitrógeno (1,41%). Mientras que en el caso de la palmera, su escaso aporte energético hace que no sea factible su valorización como combustible.

Por otro lado, se podría alargar la vida de estos residuos si se utilizaran en construcción, ya sea en forma de paneles, mobiliario, suelos o techos. Varios investigadores han llevado a cabo estudios sobre la utilización de podas de viñedo para la fabricación de paneles. Yasar et al. (2010), sometió partículas de poda de viñedo a un pretratamiento y evaluó las concentraciones de urea formaldehído (UF) utilizado como adhesivo, según las propiedades mecánicas que conferirían a los tableros. Yeniocak et al. (2014) mezcló las podas del viñedo con partículas de pino fabricando paneles utilizando UF, aunque obtuvo discretos resultados de resistencia a flexión y alto hinchamiento en espesor. Özen et al. (2014) evaluó tableros de partículas de madera de pino con diversas proporciones de poda del viñedo, concluyendo que estas últimas podrían ser incluidas en pequeñas cantidades en la fabricación de tableros para producción de mobiliario. A pesar de los esfuerzos realizados, actualmente no hay estudios en la literatura sobre la influencia que puede tener el tamaño de partícula, la utilización de éstas sin pretratamientos o la aplicación de bajas temperaturas durante el prensado.

En el caso de la palmera, también se han realizado numerosos experimentos para obtener tableros de partículas que utilizan como material distintas variedades: palmera datilera (Nemli et al., 2001, Hegazy y Aref, 2010, Amirou et al., 2013, Saadaoui et al., 2013, Hegazy et al. 2014), palmera washingtonia (García-Ortuño et al., 2013), y palmera de aceite (Laemsak y Okuma, 2000, Hashim et al., 2011, Rasat et al., 2011, Suhaily et al., 2012, Nadhari et al., 2013, Jumhuri et al., 2014, Henao et al., 2014, Tajuddin et al., 2016). En los resultados de dichas investigaciones, se observa diferente comportamiento en función de la variedad de la palmera y de la procedencia de las partículas utilizadas ya sea del tronco o de la hoja.

Uno de los problemas a los que se enfrentan estos materiales a la hora de fabricar paneles es que suelen necesitar aglutinantes. En estos casos, la alternativa más sostenible es utilizar adhesivos naturales.

El almidón es un polisacárido renovable, cuya composición son unidades de D-glucosa. Es insoluble y presenta una estructura cristalina. Para que ejerza su capacidad adhesiva, los gránulos de almidón tienen que fundirse en un medio acuoso mediante calor. Esta gelatinización también se puede conseguir mediante la aplicación de altas presiones a temperatura ambiente. Algunos investigadores han utilizado diferentes tipos de almidón como adhesivo natural en la producción de tableros de caña común (*Arundo donax*) (Ferrández-García et al., 2012) y árbol de caucho (*Hevea brasiliensis*) (Selamat et al., 2014), informando en un incremento de las propiedades mecánicas.

A día de hoy, las investigaciones más novedosas están enfocadas en obtener tableros sin adhesivos. Según éstos, la auto-unión de las partículas se podría producir durante el proceso de prensado en caliente a través de reacciones químicas de los componentes de la biomasa, donde la lignina, algunos carbohidratos y el almidón serían claves. Estos estudios tienen un futuro prometedor, aunque actualmente las temperaturas requeridas en el proceso (160°C-220°C) tienen el inconveniente del alto coste energético y su limitación a escala industrial.

De entre las varias revisiones sobre tableros sin adhesivos se han llevado a cabo, Pintiaux et al. (2015) indicaron que los investigadores estudiaban las condiciones de presión, tiempo y tamaño de partícula y su efecto sobre las propiedades de los tableros resultantes. Estudios previos concluyeron que los tableros fabricados sin adhesivos necesitaban altas temperaturas, y que había pocas posibilidades de fabricar paneles a temperaturas menores de 125°C (Pintiaux et al., 2015, Suzuki et al., 1998; Laemsak y Okuma, 2000). Utilizando temperaturas por encima de 180°C, mayores presiones y tiempos que en paneles convencionales, la resistencia mecánica y la estabilidad de los tableros sin adhesivo mejoran (Boon et al., 2013). Pero ya que hay que tener en cuenta el consumo energético, una alta temperatura de prensado no es recomendable.

Según Widyorini et al., (2005), el tamaño y forma de la partícula puede tener mucha influencia sobre las propiedades de los tableros sin adhesivos. Luego determinar el rango de tamaño de las partículas es un parámetro importante para mejorar la unión. Otro factor a tener en cuenta es el contenido en humedad. Hidayat et al., (2014) indican que la presencia de agua en las materias primas es crucial para la transferencia de calor durante el prensado en caliente y que la condición óptima era que tuviese un contenido de humedad del 8% en peso.

A día de hoy es difícil elucidar el mecanismo de auto-unión que ocurre cuando las partículas son sometidas a presión. Esto hace que el coste del proceso y el rendimiento de algunos los productos no sean competitivos (Zhang et al., 2015). Puesto que el material de partida contiene celulosa, hemicelulosa, lignina y polisacáridos, la capacidad de auto-unión de las fibras naturales puede deberse a la fusión / transición vítrea y productos de degradación de la lignina y hemicelulosas (Pintiaux et al., 2015), aunque no se sabe exactamente la contribución de cada componente. Otros trabajos atribuyen la auto-unión de las partículas al contenido de almidón y azúcares de los materiales vegetales (Lammaminget al., 2013, Sho et al., 2013).

La palmera canaria es rica en azúcares y se utiliza principalmente en las islas Canarias para la extracción tradicional de savia para fabricar una melaza y licor. Según Luis et al., (2012) la savia de la palmera canaria es un edulcorante natural con un contenido

en sacarosa 37.8%, glucosa 9.5% y fructosa 4.8%. Esta característica hace que sea un candidato ideal para el estudio del mecanismo de auto-unión.

La aplicación de alternativas renovables en los sistemas constructivos tradicionales es la clave para poder mejorar el rendimiento energético, medioambiental y económico de los edificios y, de esta manera, proteger el medio ambiente.



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta investigación se divide en dos partes: la primera es realizar un estudio exhaustivo de los diferentes componentes y materiales que intervienen en los sistemas constructivos de particiones interiores y así identificar los impactos ambientales y económicos que producen. Una vez realizado este análisis, la segunda parte consiste en la fabricación experimental de paneles para su utilización en estos sistemas reemplazando a los tradicionales, lo que podría ayudar al medio ambiente y la economía de dos maneras: evitando los impactos ambientales en la fabricación de los materiales tradicionales y contribuyendo en la lucha contra el cambio climático al evitar las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen en las incineraciones in situ o deposición en vertedero de estos residuos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar una comparación del desempeño ambiental y económico del ciclo de vida de diferentes soluciones constructivas de particiones interiores en viviendas, a través de la aplicación de la metodología ACV. Las particiones que se someterán a estudio serán las de utilización más común en España (sistema autoportante de cartón-yeso y fábrica de ladrillo cerámico hueco doble) y las de características más diferenciadas y representativas disponibles en el mercado español (fábrica de bloque hueco de hormigón, fábrica de bloque de hormigón celular y sistema de placas de escayola).

Reutilización de desechos agrícolas como materia prima en la fabricación de tableros. Los materiales a estudio serán las podas de viñedo en un primer lugar y biomasa de palmera canaria (*Phoenix Canariensis*). Se realizará un análisis de la influencia del tamaño y origen de partícula, la presión y tiempo de prensado en la producción de tableros de partículas a bajas temperaturas, estudiando la influencia de la adición o no de adhesivos naturales (almidón de patata) y los mecanismos de unión de las partículas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PARTICIONES INTERIORES:

3.1.1. MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Una partición interior es un muro construido para separar espacios en una misma vivienda. Aunque los actuales sistemas de partición no tienen función portante, deben cumplir otros requisitos relacionados con la durabilidad, la seguridad en caso de incendio, la seguridad estructural y la protección frente a ruido, que en la legislación española vienen establecidos en el Código Técnico de la Edificación (Real Decreto 314/2006).

En este trabajo se van a comparar, desde el punto de vista ambiental, 10 alternativas de particiones interiores en viviendas que surgen como variantes de 5 soluciones constructivas:

1. Sistema autoportante de paneles de cartón-yeso: sistema en seco que consiste en una estructura de acero galvanizado con montantes de dimensiones 48x30x0,55 mm cada 400-600 mm y dos canales con dimensiones de 48x30x0,55 mm, uno atornillado al pavimento y otro al techo, sellados con cinta acústica. Esta estructura es después recubierta con dos paneles de cartón-yeso de 15 mm de grosor mediante tornillos de acero colocando en el espacio interior un panel aislante. Las juntas son más tarde selladas y rematadas con pasta acrílica.

Dependiendo del material aislante, se pueden encontrar dos alternativas:

- 1a) Con un panel aislante de lana de roca de 40 mm de grosor.
- 1b) Con un panel aislante de fibra de celulosa de 40 mm de grosor.

2. Sistema de ladrillo cerámico hueco: fábrica de ladrillo cerámico recibido por canto con mortero y rematado con enlucido de yeso.

Dependiendo de las dimensiones del ladrillo cerámico, del material utilizado como mortero y el grosor del enlucido, se pueden encontrar tres alternativas:

- 2a) Ladrillo cerámico hueco doble con dimensiones de 240 mm (longitud) por 115 mm (altura) por 100 mm (anchura) recibido con mortero de cemento y enlucido de yeso de 15 mm.
- 2b) Ladrillo cerámico hueco doble con dimensiones de 240 mm (longitud) por 115 mm (altura) por 100 mm (anchura) recibido con mortero de cemento y enlucido de yeso de 10 mm.
- 2c) Ladrillo cerámico hueco de gran formato con dimensiones de 700 mm (longitud) por 520 mm (altura) por 100 mm (anchura) recibido con adhesivo de yeso, enlucido de yeso de 10 mm y cinta acústica.

3. Sistema de bloque hueco de hormigón: fábrica de bloque de hormigón con dimensiones de 400 mm (longitud) por 200 mm (altura) por 80 mm (anchura) recibido por canto con mortero de cemento y rematado con enlucido de yeso.

Dependiendo del grosor del enlucido de yeso, se pueden encontrar dos alternativas:

- 3a) Con enlucido de yeso de 15 mm de espesor.
 3b) Con enlucido de yeso de 10 mm de espesor.
4. Sistema de bloque de hormigón celular: fábrica de bloque de hormigón celular con dimensiones de 625 mm (longitud) por 500 mm (altura) por 80 mm (anchura) recibido por canto con mortero de cemento y rematado con enlucido de yeso.
- Dependiendo del grosor del enlucido de yeso, se pueden encontrar dos alternativas:
- 4a) Con enlucido de yeso de 15 mm de espesor.
 4b) Con enlucido de yeso de 10 mm de espesor.
5. Sistema de placas de escayola: tabique construido a base de placas de escayola de dimensiones de 666 mm (longitud) por 500 mm (altura) por 70 mm (anchura) recibido por canto con adhesivo de escayola y sin enlucido, solo rejuntado con masilla de yeso en las uniones de las placas

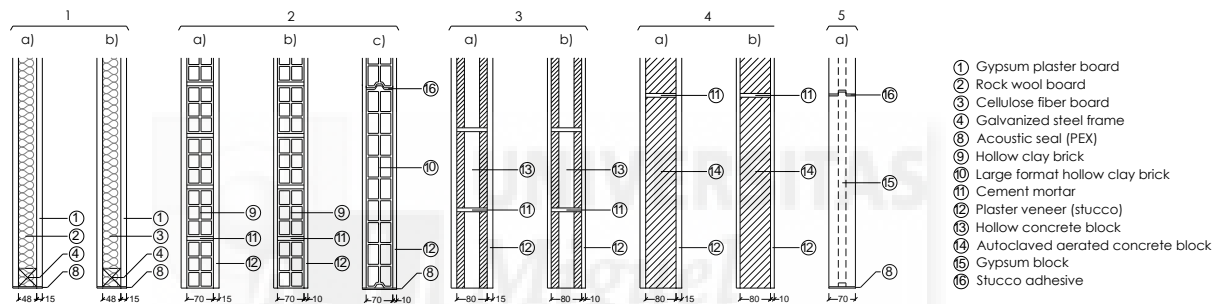


Figura 1. Sección vertical de las soluciones constructivas a estudio

3.1.2. MÉTODOLÓGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para esta primera fase del estudio se va a aplicar la metodología de ACV, la cual se compone de los siguientes apartados:

- 1) Alcance del estudio
- 2) Inventario de ciclo de vida
- 3) Análisis de Impacto de ciclo de vida
- 4) Interpretación de los resultados

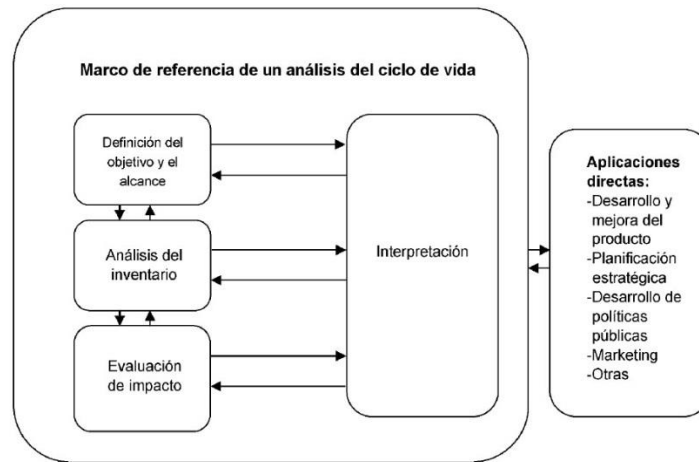


Figura 2. Esquema de un ACV según la norma UNE-EN-ISO 14040 (2006).

3.1.2.1. Alcance del estudio

El alcance del estudio incluye las etapas mostradas en la Figura 3 de la vida útil para cada una de las alternativas. Se han considerado todos los flujos de material entrante (materia prima, energía, combustible, agua, etc.) y los de salida (emisiones a la atmósfera, al agua, al suelo así como residuos sólidos) producidos durante todas las etapas que forman el ciclo de vida de los sistemas constructivos a estudio.



Figura 3. Alcance del estudio

En cuanto a las etapas del ciclo de vida, la etapa de uso no se va a considerar, por ser común a todas las soluciones constructivas objeto de análisis (acabados de pintura y su mantenimiento), y por asumir que no existe intercambio de calor entre las estancias separadas por las particiones interiores analizadas, al considerar que ambas están calefactadas, y que por tanto, no existe ni ganancia ni pérdida de energía que se deba suplir.

La unidad funcional escogida es 1 m² de partición durante un periodo de 60 años, que es la vida media de los principales materiales que componen las soluciones constructivas analizadas (Taborianski y Prado, 2012), que cumplen los requisitos mínimos para una partición (CTE, Real Decreto 314/2006). Concretamente, el sistema constructivo debe cumplir una serie de requisitos mínimos como una adecuada separación entre estancias, un aislamiento acústico mayor a 35 dBA y soportar una carga uniformemente repartida de 70 kg/m².

3.1.2.2. Inventario de Ciclo De Vida

En este estudio se ha hecho especial énfasis en elaborar un inventario adaptado al caso de aplicación y a la situación geográfica de su ubicación (España), para cada uno de los materiales y procesos involucrados en el ciclo de vida de las diferentes soluciones constructivas. Como base para la elaboración del inventario se ha considerado la base de datos de Ecoinvent (2007), la cual ha sido modificada para adaptar el mix eléctrico al español, según muestra la Tabla 1, e incorporar las especificaciones de los fabricantes y constructores españoles, que se detallan para cada etapa del ciclo de vida.

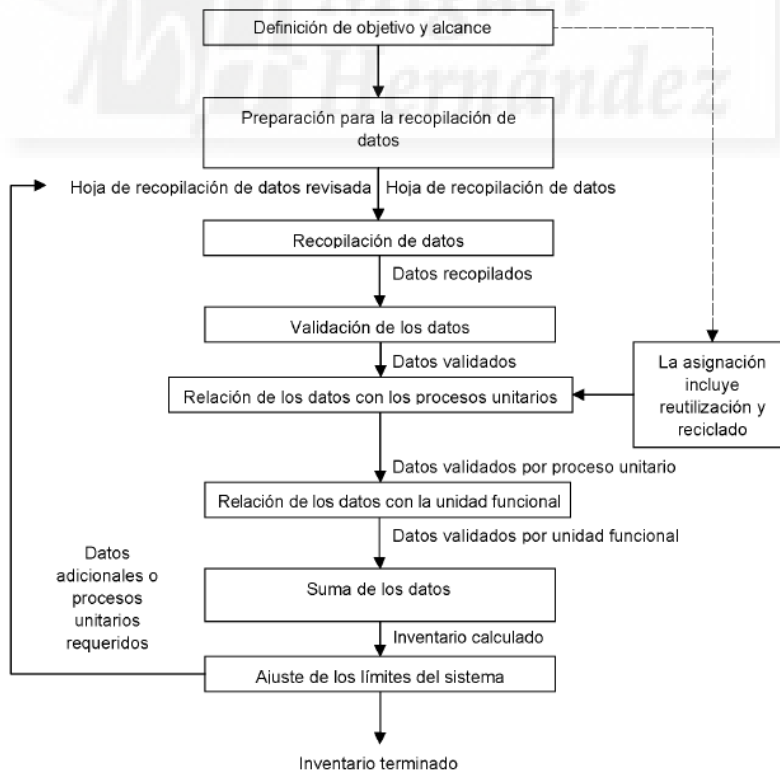


Figura 4. Procedimiento para la elaboración de un inventario.

Tabla 1. Mix eléctrico correspondiente a España. REE, 2012. Informe anual 2011. Red Eléctrica Española

Energía primaria	%
Carbón	15
Nuclear	21
Hidráulica	12
Ciclo combinado	19
Cogeneración	12
Eólica	16
Solar fotovoltaica	3
Solar termoeléctrica	1
Térmica renovable	1

Obtención de materiales que componen cada sistema

Según se detalla en la Tabla 2, se ha conformado el inventario de cada uno de los materiales que integran cada alternativa teniendo en cuenta los siguientes aspectos: formato de suministro del producto, pérdidas de material durante su aplicación en obra, características del embalaje secundario (cajas, bolsas de suministro, etc.) y terciario o de transporte (palet, film retráctil, etc.). La última columna de la tabla especifica en qué alternativa de solución constructiva se aplica, aunque las cantidades de cada material que componen la unidad funcional de cada alternativa, se detallan en la Tabla 4.

Transporte de los materiales a la obra

Se han considerado las distancias y tonelajes de camión que se detallan en la Tabla 3, para modelar el inventario correspondiente a la etapa de transporte de los materiales a la obra, tomando como dato de inventario del combustible diesel de cada tipo de camión, los especificados en Ecoinvent (2007). Para el caso del transporte de los materiales directamente a obra o al almacén intermedio se ha considerado un contenedor tipo de peso máximo autorizado de 44 t. Por otro lado, para el transporte de los materiales del almacén intermedio a obra se ha considerado un contenedor tipo de peso máximo autorizado 18 t. En todos los casos se considera la vuelta del contenedor vacío.

La Tabla 4 incluye las tkm para cada tipo de transporte, asignadas a 1 m² de cada alternativa objeto de estudio. El transporte considera el peso del material y su material de embalaje secundario y terciario, según se ha especificado en la Tabla 2.

Colocación en obra

Una vez los materiales llegan a la obra, se ha considerado que su movimiento se realiza mediante una grúa de potencia 24.1 kW, desde la cota 0 hasta la planta correspondiente, mientras que su colocación se realiza con medios manuales. Asumiendo un tiempo promedio de 5 minutos por movimiento de palet de cada material en obra y el peso de cada material junto con su material de embalaje secundario y terciario, tal y como especifican la Tabla 2 y la Tabla 4 se obtienen los consumos detallados en la Tabla 5. Se ha considerado además, tal y como se muestra en la Tabla 2 una pérdida de 5% de materiales durante su colocación para todos los materiales excepto para las cintas de juntas y acústicas, que se asume del 10%.

Tabla 2. Especificaciones incorporadas al inventario de los materiales que conforman cada alternativa

	Características material		embalaje			Peso total paletizado	% pérdidas	Solución constructiva que lo incluye
	Formato unidad	Peso unitario (kg/unidad)	Secundario	terciario	ud/palet			
Gypsum plaster board	1,2m x 2,5m	33,9	-	Palet especial (1.2x2.5m ²): 26 kg Film retráctil: 0,34 kg/palet	30 ud	1043,34	5	1a, 1b
Rock wool board	1m x 1,2m	7,2	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,53 kg/palet	52 ud	175,33	5	1a
Cellulose fiber board	1m x 1,2m	2,4	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,53 kg/palet	52 ud	149,33	5	1b
Galvanized steel (upright)	2,5m	1,45	Caja de cartón 12 ud	Palet especial (1,2 x 2,5 m ²): 26 kg Film retráctil: 0,53 kg/palet	504 ud	953,26	5	1a, 1b
Galvanized steel (channels)	3m	1,38	Caja de cartón 12 ud	Palet especial (1,2 x 3 m ²): 26 kg Film retráctil: 0,12 kg/palet	588 ud	889,99	5	1a, 1b
Acrylic paint	saco	20	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,20 kg/palet	56 sacos/120 kg	1150,36	5	1a, 1b
Steel screws	1 ud	0,001	Caja de HDPE 12000 ud	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,22 kg/palet	1152000 ud	1226,14	5	1a, 1b
Kraft paper bleached	1 rollo de 150 m-l	0,22	Bolsa de 15 rollos	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,22 kg/palet	240 rollos	77,88	10	1a, 1b
PEX	1 rollo de 70 m-l	0,44	Bolsa de 11 rollos	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,03 kg/palet	44 (rollos)	43,76	10	1a, 1b, 5
Hollow brick (standard)	0,240m x 0,115m	1,4	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,24 kg/palet	550 ud	794,24	5	2a, 2b
Double hollow brick (large format)	0,700m x 0,520m	15,8	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,18 kg/palet	28 ud	467,58	5	2c
Cement mortar	saco	25	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,24 kg/palet	48 sacos	1230,44	5	2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b
Stucco	saco	19	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,20 kg/palet	64 (sacos)	1246,6	5	2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b
Hollow concrete block	0,4m x 0,2m	7,37	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,24 kg/palet	164 ud	1232,91	5	3a, 3b
Autoclaved concrete block	0,625 x 0,5	13,75	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,22 kg/palet	40 ud	563,97	5	4a, 4b
Plaster block	0,666m x 0,5	22	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,22 kg/palet	44 ud	992,23	5	5
Stucco adhesive	saco	25	-	Europalet (1,2 x 0,8 m ²): 24 kg Film retráctil: 0,20 kg/palet	48 (sacos)	1230,44	5	5

Demolición

La demolición de cada solución constructiva se realiza mediante maquinaria hidráulica de consumo medio de 0,03594 MJ/kg para cada uno de los materiales incluidos en la Tabla 2. Teniendo en cuenta el peso de cada alternativa de solución constructiva, se obtienen los consumos detallados en la Tabla 4.

Tabla 3. Características del transporte de materiales a obra

Material	Distancia (km)		
	directo a obra (44 t)	a almacén intermedio (44 t)	de almacén intermedio a obra (24 t)
Gypsum plaster board	52.5		
Rock wool board		132	10
Cellulose fiber board		132	
Galvanized steel (upright)	52.6		
Galvanized steel (channels)	52.6		
Acrylic paint		42.6	10
Steel screws		42.6	10
Kraft paper bleached		42.6	10
PEX		42.6	10
Hollow brick (standard)	10		
Double hollow brick (large format)	10		
Cement mortar		76.9	10
Stucco		42.6	10
Hollow concrete block		76.9	10
Autoclaved concrete block		76.9	10
Plaster block		42.6	10
Stucco adhesive		76.9	10

Tabla 4. Datos de inventario del ciclo de vida de 1 m² de cada una de las alternativas de las soluciones constructivas de particiones

STAGES	MATERIAL / PROCESS	UNIT	ALTERNATIVES											
			1a	1b	2a	2b	2c	3a	3b	4a	4b	5		
RESOURCE EXTRACTION / MANUFACTURING	Building materials:													
	Gypsum plaster board	kg	2,37E+01	2,37E+01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rock wool board	kg	2,54E+00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cellulose fiber board	kg	-	2,10E+00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Galvanized steel:													
	- Upright	kg	1,40E+00	1,40E+00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	- Channels	kg	1,40E+00	1,40E+00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acrylic paint	kg	2,86E-01	2,86E-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Steel screws	kg	1,68E-02	1,68E-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kraft paper bleached	kg	6,54E-06	6,54E-06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PEX	kg	1,85E-04	1,85E-04	-	-	1,85E-04	-	-	-	-	-	-	1,85E-04
	Hollow brick:													
	- Standard	kg	-	-	4,70E+01	4,70E+01	-	-	-	-	-	-	-	-
	- Large format	kg	-	-	-	-	4,48E+01	-	-	-	-	-	-	-
	Cement mortar	kg	-	-	1,46E+01	1,46E+01	-	-	1,02E+01	1,02E+01	5,11E+00	5,11E+00	-	-
	Stucco	kg	-	-	2,52E+01	1,68E+01	1,68E+01	2,52E+01	1,68E+01	2,52E+01	1,68E+01	1,68E+01	-	-
	Hollow concrete block	kg	-	-	-	-	-	8,99E+01	8,99E+01	-	-	-	-	-
	Autoclaved concrete block	kg	-	-	-	-	-	-	-	4,46E+01	4,46E+01	-	-	-
	Plaster block	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,82E+01
	Stucco adhesive	kg	-	-	-	-	1,57E+00	-	-	-	-	-	-	1,64E+00
PACKAGE MATERIALS:														
	Paper/cardboard	kg	2,97E-01	2,97E-01	2,09E-01	1,64E-01	9,66E-02	1,86E-01	1,42E-01	1,59E-01	1,15E-01	8,55E-03	-	
	LDPE	kg	2,08E-02	2,08E-02	4,03E-01	3,13E-01	2,07E-01	3,70E-01	2,80E-01	3,29E-01	2,39E-01	2,96E-02	-	
	HPLC	kg	7,28E-04	7,28E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TRANSPORT	Transport lorry 44 t	tkm	1,77E+00	1,71E+00	2,25E+00	1,89E+00	8,50E-01	8,15E+00	7,78E+00	4,99E+00	4,63E+00	3,10E+00	-	
	Transport lorry 18 t	tkm	3,29E-02	2,85E-02	8,93E-01	8,07E-01	6,61E-01	1,28E+00	1,19E+00	7,68E-01	6,82E-01	7,16E-01	-	
ON-SITE CONSTRUCTION	Electricity	kWh	8,56E-02	8,56E-02	3,63E-01	2,93E-01	3,47E-01	3,81E-01	3,11E-01	3,84E-01	3,14E-01	1,45E-01	-	
	Water	kg	1,54E-01	1,54E-01	3,35E+01	2,30E+01	2,23E+01	3,29E+01	2,24E+01	3,66E+01	2,61E+01	1,32E+00	-	
DEMOLITION	Diesel	MJ	1,01E+00	9,90E-01	3,12E+00	2,82E+00	2,27E+00	4,50E+00	4,20E+00	2,69E+00	2,39E+00	2,50E+00	-	
DISPOSAL	Diesel (transportation)	kg	1,61E-02	1,58E-02	5,00E-02	4,51E-02	3,64E-02	7,21E-02	6,73E-02	4,31E-02	3,83E-02	4,00E-02	-	
	Water	kg	2,80E-02	2,75E-02	8,69E-02	7,85E-02	6,32E-02	1,25E-01	1,17E-01	7,49E-02	6,65E-02	6,95E-02	-	
	Electricity	kWh	5,76E-02	5,67E-02	1,79E-01	1,62E-01	1,30E-01	2,58E-01	2,41E-01	1,54E-01	1,37E-01	1,43E-01	-	
	Diesel	kg	1,47E-02	1,44E-02	4,55E-02	4,11E-02	3,31E-02	6,57E-02	6,13E-02	3,92E-02	3,48E-02	3,64E-02	-	
VALORIZATION	Gravel	kg	-	-	8,69E+01	7,85E+01	6,32E+01	1,25E+02	1,17E+02	7,49E+01	6,65E+01	-	-	
	Cast iron	kg	1,42E+00	1,42E+00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Gestión como RCD

Una vez almacenados los residuos que genera cada solución constructiva, éstos han de gestionarse como residuos de construcción y demolición (RCDs). Para ello, se han considerado los siguientes consumos, correspondientes a los consumos medios de las plantas de gestión de RCDs españolas (ITEC, 2009): 0.62 l diésel y 2.06 kWh por tonelada de RCD gestionado respectivamente. La distancia a la planta de gestión de RCDs se ha estimado como la distancia promedio entre las plantas de tratamiento existentes en la zona de estudio, que equivale a 22.7 km. La Tabla 4 incluye la asignación de estos datos para cada alternativa de solución constructiva objeto de estudio.

Valorización

La valorización de los RCDs genera una carga evitada derivada de la recuperación del acero contenido en el RCD de la división interior vertical autoportante de paneles de cartón-yeso (alternativas 1a y 1b) y de la recuperación como grava de la fracción inerte de los RCDs de las alternativas 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 4a y 4b (Mercante et al., 2011).

Finalmente, considerando los datos de inventario individuales de cada material que conforma cada alternativa de las soluciones constructivas objeto de análisis, la Tabla 4 el inventario correspondiente a 1 m² de cada una de ellas.

Tabla 5. Datos de inventario para la etapa de colocación en obra

Consumo necesario por m ² de sistema constructivo colocado en obra (kWh/m ²)										
Material	1a	1b	2a	2b	2c	3a	3b	4a	4b	5
Gypsum plaster board	2,34E-02	2,34E-02								
Rock wool board	3,38E-02									
Cellulose fiber board		3,38E-02								
Galvanized steel (upright)	2,79E-03	2,79E-03								
Galvanized steel (channels)	9,56E-04	9,56E-04								
Acrylic paint	5,38E-04	5,38E-04								
Steel screws	2,93E-05	2,93E-05								
Kraft paper bleached	2,05E-05	2,05E-05								
PEX	5,74E-04	5,74E-04			4,21E-04					4,21E-04
Hollow brick (standard)			1,23E-01	1,23E-01						
Double hollow brick (large format)					2,00E-01					
Cement mortar			2,95E-02	2,95E-02		2,07E-02	2,07E-02	1,03E-02	1,03E-02	
Stucco			1,05E-01	7,03E-02	7,03E-02	1,05E-01	7,03E-02	1,05E-01	7,03E-02	
Hollow concrete block						1,49E-01	1,49E-01			
Autoclaved concrete block								1,63E-02	1,63E-02	
Plaster block										1,41E-01
Stucco adhesive					2,59E-03					2,75E-03

3.1.2.3. Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida

Una vez realizado el inventario que recoge todo el ciclo de vida de los sistemas constructivos de particiones interiores a estudio, el siguiente paso en la metodología es realizar la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV). El EICV consiste en la evaluación de elementos opcionales y obligatorios (ISO 14044, 2006). Los elementos obligatorios permiten obtener indicadores para diferentes categorías de impacto: acidificación, eutrofización, calentamiento global, deterioro de la capa de ozono, oxidación fotoquímica y agotamiento de recursos abióticos. Como elementos opcionales, se han aplicado los métodos Eco-Indicator'99 (Goedkoop y Spriensma, 2000) y EPS2000 (Steen, 1999a y 1999b).

Una vez modelados los inventarios de cada alternativa de solución constructiva para las particiones de interior en SimaPro 7.3.2 (PRé Consultants, 2011) y aplicados los métodos de evaluación del impacto (elementos obligatorios y opcionales), se han obtenido los resultados de los indicadores ambientales según sistema y etapa.

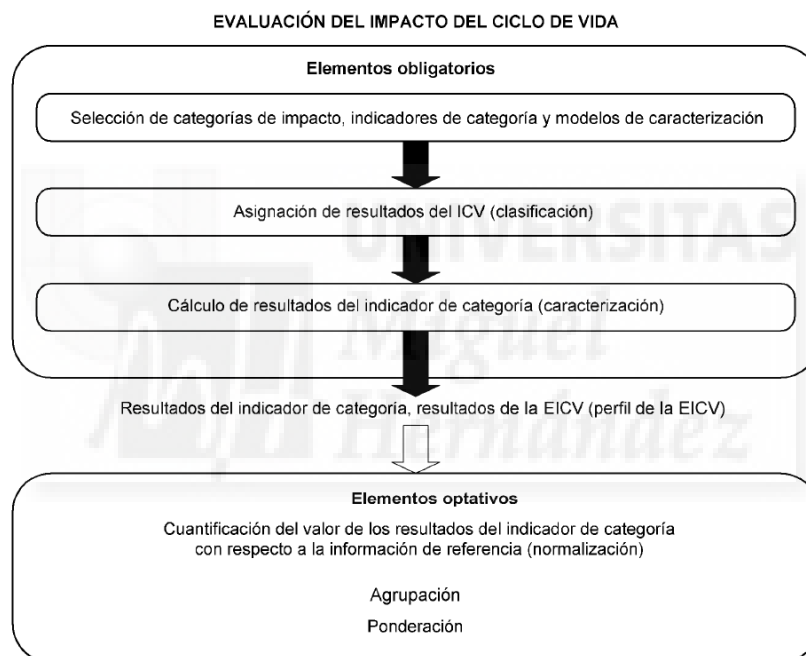


Figura 5. Elementos de la etapa de evaluación del impacto.

1) Elementos obligatorios: análisis por categoría de impacto

En esta fase del EICV se seleccionan las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización que se van a considerar. A continuación se asignan los resultados del ICV a las categorías de impacto (clasificación) y se calculan los resultados de los indicadores para cada una de las categorías de impacto consideradas (caracterización).

Las categorías que suelen utilizarse en los estudios de ACV son las mostradas en la Tabla 6, tomando como factores de caracterización los propuestos, por ejemplo, por el método CML 2000 (Guinee, 2002).

Tabla 6. Categorías de impacto y unidades en que se expresan propuestas por el CML 2000.

Categoría de impacto	Unidades
Agotamiento de recursos naturales	Kg Sb eq
Acidificación	Kg SO ₂ eq
Eutrofización	Kg PO ₄ ³⁻ eq
Calentamiento global	Kg CO ₂ eq
Reducción de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq
Oxidación fotoquímica	Kg C ₂ H ₄ eq

- Agotamiento de recursos naturales: Es una categoría de impacto que hace referencia al consumo o extracción de recursos naturales (principalmente no renovables) como son los minerales o combustibles fósiles. Sus unidades son kg de antimonio equivalentes (kg Sb eq).
- Acidificación: En esta categoría se engloban las emisiones ácidas a la atmósfera que provocan la lluvia ácida, causante de la destrucción de la vegetación y de la contaminación de los suelos. Sus unidades son Kg de SO₂ equivalentes (Kg SO₂ eq).
- Eutrofización: Es una categoría de impacto que incluye todas aquellas sustancias que provocan una disminución del oxígeno a nivel acuático (en lagos, ríos y acuíferos) y al mismo tiempo actúan como fertilizantes para algas que invaden estos ecosistemas. Sus unidades son Kg de fosfatos equivalentes (kg PO₄³⁻ eq).
- Calentamiento global: Es la categoría en la que se incluyen todas las emisiones con efecto invernadero que provocan el calentamiento global del planeta. Sus unidades son Kg de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq)
- Reducción de la capa de ozono: En esta categoría se engloban las sustancias que provocan una destrucción del ozono (O₃) estratosférico (capa de ozono). Sus unidades son Kg de CFC-11 equivalentes (kg CFC-11 eq).
- Oxidación fotoquímica: Se trata de una categoría de impacto en la que se engloban todas las sustancias que hacen aumentar la concentración del ozono troposférico, un agente muy oxidante y causante del smog. Sus unidades son Kg de C₂H₄ equivalentes (Kg C₂H₄ eq).

2) Elementos opcionales: descripción de los métodos de valoración del impacto

La aplicación del método de evaluación de impacto permite expresar la carga medioambiental del sistema analizado en un único indicador. De forma simplificada, el proceso seguido hasta obtener un único valor del impacto ambiental pasa por agrupar los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto, dependiendo del daño o efecto que producen. Este paso es altamente subjetivo, pero necesario si se desea obtener un único indicador, de ahí la existencia de diferentes métodos de evaluación de impacto.

Según las recomendaciones de las normas UNE-EN ISO 10404-44 (2006) y ISO/TR 14047 (2003), en los estudios de ACV se deberán aplicar alguno de los tres métodos de evaluación de impacto con mayor aceptación a nivel internacional, realizándose un

análisis de sostenibilidad para comprobar el efecto que cada uno de ellos tiene sobre el resultado final. Estos métodos se describen brevemente a continuación.

- Eco-Indicador'95

El método del Eco-Indicador'95 (Goedkoop, 1995 y 1996) es el método que reproduce de forma más fiel la metodología recomendada por la familia de normas ISO 1404X y SETAC para realizar un Análisis del Ciclo de Vida. Considera todas las etapas incluidas en la fase de análisis del impacto: clasificación, caracterización, normalización y valoración final. Su estructura se muestra en la Figura 6.

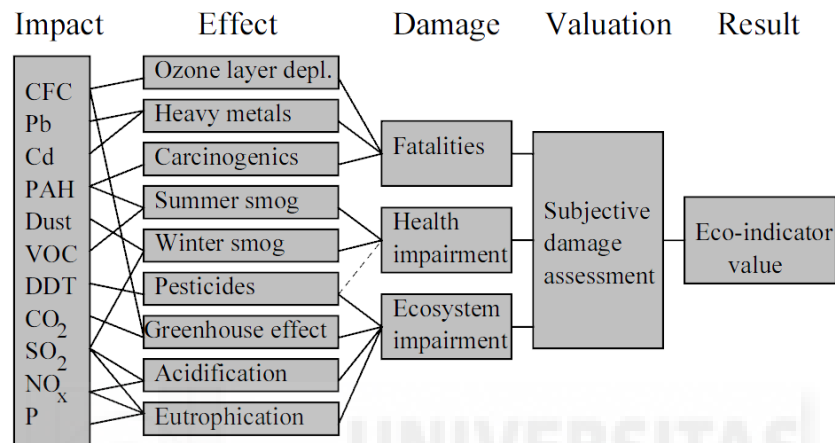


Figura 6. Diagrama esquemático del Eco-Indicador'95 (Goedkoop et al. 1995 y 1996).

Las categorías de impacto que utiliza este método son las mismas que utiliza el CML (2000), descritas anteriormente: efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono, acidificación, eutrofización, metales pesados, cancerígenos, smog estival, smog invernal, pesticidas, consumo de energía y sólidos.

- Eco-Indicador'99

El Eco-Indicador'99 es una actualización del Eco-Indicador'95, que ha sido promovida por el VROM (Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment) y presentada por Goedkoop et al. (1999 y 2000).

Este método considera tres categorías de daño relacionadas directamente con el resultado del inventario: salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos, utilizando las siguientes categorías de impacto: cancerígenos, efectos respiratorios debidos a orgánicos, efectos respiratorios debidos a inorgánicos, cambio climático, radiación, ozono, ecotoxicidad, acidificación/eutrofización, uso del suelo, minerales y combustibles y combustibles fósiles.

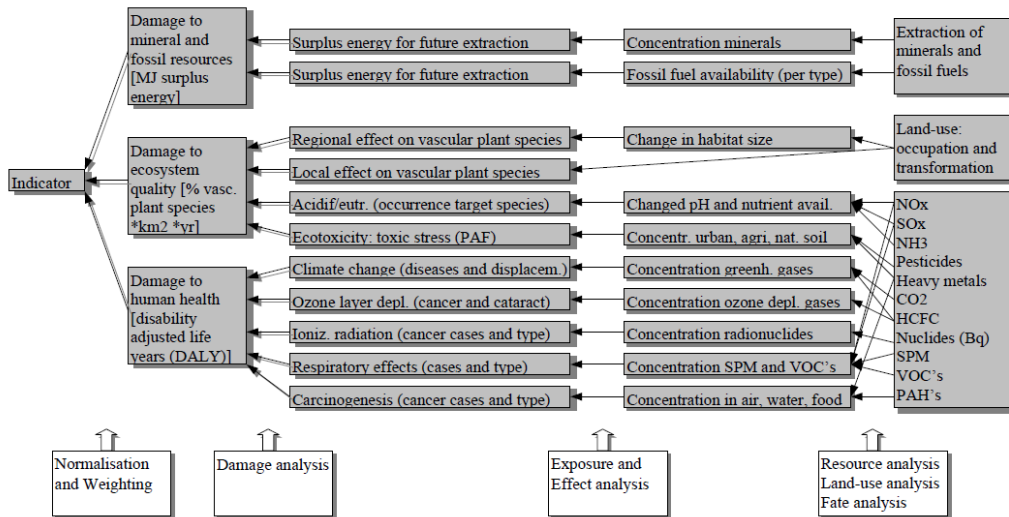


Figura 7. Diagrama esquemático del Eco-Indicador'99 (Goedkoop et al. 1999 y 2000).

- Environmental Priority System (EPS)

El método EPS fue desarrollado inicialmente como una herramienta conceptual para realizar ACVs en 1991 para Volvo Car Corporation en Suecia por el IVL (Swedish Environmental Research Institute), y posteriormente fue revisado por Steen (1995). Últimamente se ha desarrollado una nueva versión del método: EPS 2000 (Steen, 1999a,b) basado en el mismo esquema que las versiones anteriores, pero ampliando el conjunto de factores de peso calculados para diversos contaminantes..

EPS define cinco áreas de protección: salud humana, capacidad de producción de los ecosistemas, recursos, bio-diversidad y valores culturales y recreativos (estas áreas han sufrido pequeñas variaciones con las sucesivas versiones). El método de valoración económica utilizado es el de disposición a pagar para evitar un determinado cambio en el ambiente en cada una de las cinco áreas de protección que definen. Como unidad monetaria se utiliza el ELU (Environmental Load Unit).

La Figura 8 muestra la metodología utilizada en el método EPS, hasta conseguir un único indicador ambiental:

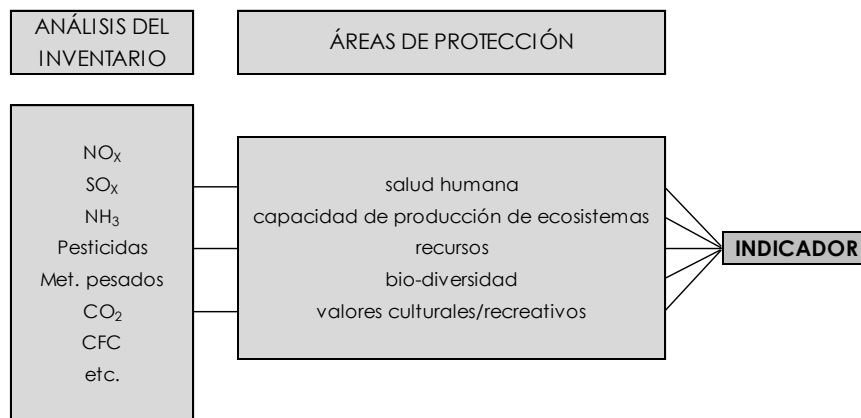


Figura 8. Diagrama esquemático del EPS 2000 (Steen, 1999a,b).

Una vez modelados los inventarios de cada alternativa de solución constructiva para las particiones de interior en SimaPro 7.3.2 y aplicados los métodos de evaluación del impacto (elementos obligatorios y optativos), se han obtenido los resultados que se muestran en la sección de resultados y discusión.

3.1.2.4. Interpretación de Resultados

Según la norma UNE-EN ISO 14040-44 (2006), en esta última etapa de un ACV se combina la información obtenida en la fase de inventario y evaluación del impacto para llegar a identificar las variables significativas teniendo en cuenta los análisis de sensibilidad realizados. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio.

La Figura 9 muestra las relaciones de la etapa de interpretación con otras etapas del ACV. Las etapas de definición del objetivo y el alcance y de interpretación del análisis del ciclo de vida constituyen el marco de referencia, mientras que las otras etapas del ACV (ICV y EICV) generan información sobre el sistema en estudio.

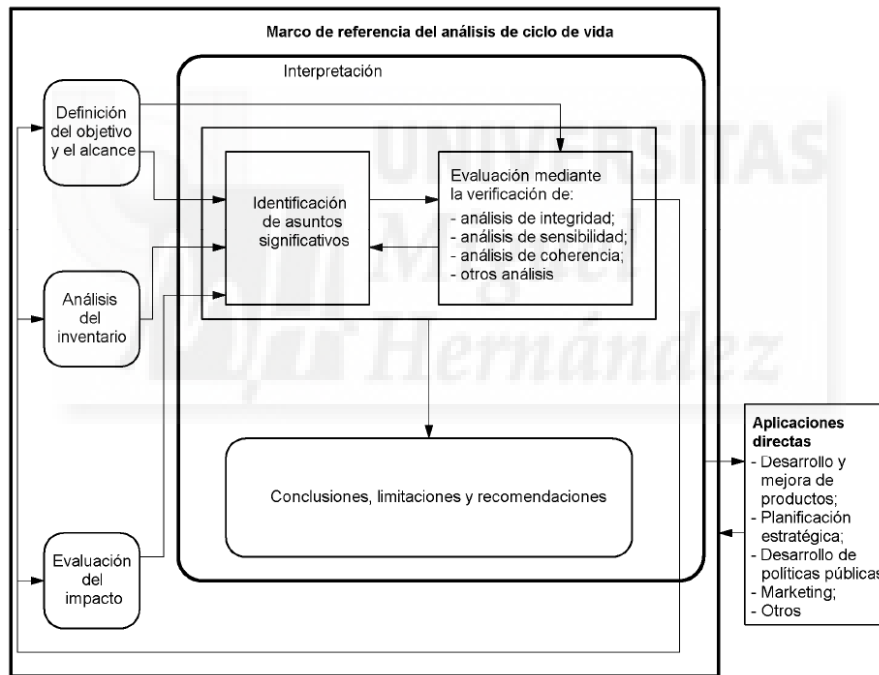


Figura 9. Relaciones entre los elementos en la etapa de interpretación con las otras etapas del ACV.

3.1.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para analizar el aspecto económico de las alternativas de soluciones constructivas propuestas, se han calculado los costes unitarios de los flujos de entrada y salida de materia y energía que intervienen en cada una de las etapas de su ciclo de vida para 1 m² de cada partición. La Tabla 7 muestra dichos costes unitarios.

Tabla 7. Costes unitarios que interviene a lo largo del ciclo de vida de cada uno de los sistemas constructivos bajo estudio

RESOURCE EXTRACTION / MANUFACTURING	Gypsum plaster board	€/kg	4.00E-01
	Rock wool board	€/kg	7.35E-01
	Cellulose fiber board	€/kg	9.08E-01
	Galvanized steel (upright)	€/kg	3.13E+00
	Galvanized steel (channels)	€/kg	3.13E+00
	Acrylic paint	€/kg	1.15E+00
	Steel screws	€/kg	1.66E+02
	Kraft paper bleached	€/kg	2.94E+00
	PEX	€/kg	1.27E+03
	Hollow brick (standard)	€/kg	7.72E-02
	Double hollow brick (large format)	€/kg	9.47E-02
	Cement mortar	€/kg	1.03E-01
	Stucco	€/kg	8.65E-02
	Hollow concrete block	€/kg	7.51E-02
	Autoclaved concrete block	€/kg	2.73E-01
	Plaster block	€/kg	9.57E-02
	Stucco adhesive	€/kg	7.35E+00
	Water	€/kg	6.50E-04
	Kraft paper unbleached	€/kg	9.42E-01
	Cardboard	€/kg	4.83E+00
LDPE	€/kg	1.73E+00	
HPLC	€/kg	1.76E+00	
TRANSPORT	Transport lorry 44 t	€/tkm	3.50E-02
	Transport lorry 18 t	€/tkm	4.32E-02
ON-SITE CONSTRUCTION	Mano de obra	€/h	1.77E+01
	Electricity	€/kWh	1.40E-01
DEMOLITION	Operation	€/h·m ³	1.72E+01
	Equipment	€/h·m ³	5.85E+01
	Diesel	€/MJ	3.82E-02
DISPOSAL	Diesel (transportation)	€/kg	1.65E+00
	Water	€/kg	6.50E-04
	Electricity	€/kWh	1.40E-01
	Diesel	€/kg	1.65E+00
	Operation	€/t	4.21E+01
VALORIZATION	Gravel	€/t	2.21E+00
	Cast iron	€/t	7.15E+00

3.2. FABRICACIÓN DE TABLEROS EXPERIMENTALES

3.2.1. MATERIALES

3.2.1.1. Tableros de Poda de Viñedo

Los materiales utilizados en este estudio en la fabricación de tableros han sido:

1. Residuos de poda de viñedo. Figura 10.
2. Resina de urea formaldehido (UF)
3. Nitrato de amonio
4. Agua.



Figura 10. Residuos de poda de viñedos

Los residuos fueron obtenidos del viñedo de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Universidad Miguel Hernández de Elche). Las podas fueron trituradas en una desfibradora de cuchillas equipada con una tamizadora con un tamaño de tamiz de 2 mm. Estas partículas fueron más tarde clasificadas utilizando una tamizadora-vibradora en dos lotes, menores a 1 mm y mayores (de 1 a 2 mm).

Las partículas fueron mezcladas con resina de UF (con un contenido sólido de 64%) al 10% en base al peso de las partículas. Como endurecedor se utilizó un 0.4% de nitrato de amonio. No se añadieron al proceso ni ceras ni otras sustancias hidrófilas. El agua procedía de la red de agua potable municipal.

3.2.1.2. Tableros de Biomasa de Palmera Canaria

Los materiales empleados en este estudio fueron:

1. Biomasa de palmera canaria. Figura 11.
2. Almidón de patata
3. Agua.



Figura 11. Biomasa de palmera canaria.

Las palmeras utilizadas eran palmeras contaminadas de picudo de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Las palmeras se cortaron, separando las hojas, tábala y tronco.

En una primera fase de fabricación de paneles de palmera canaria, se seleccionaron partes de tronco, que posteriormente se trituraron en una desfibradora de cuchillas para obtener las partículas. Cuando estas partículas alcanzaron el 10% de humedad, se hicieron pasar por el tamiz de 0.25 mm. Como adhesivo, se utilizó almidón de patata comercial en concentraciones de 0, 10 y 20%. El agua procedía de la red de agua potable municipal.

En una segunda fase, y a la vista de los resultados obtenidos con los anteriores tableros, se siguió el mismo proceso, dejando secar la materia prima al aire libre para su secado durante 6 meses con su posterior trituración en una desfibradora de cuchillas para obtener las partículas. Las partículas obtenidas tenían una humedad aproximada del 55%, por lo que se dejaron secar al aire hasta un contenido de humedad aproximado del 8%. Las partículas de cada parte de la palmera (tábala, tronco y raquis) se seleccionaron por tamaño en una tamizadora-vibradora, según el tamaño de tamiz en el que éstas quedaban retenidas (< 0.25, 0.25 a 1 y 1 a 2 mm). El agua procedía de la red de agua potable municipal.

3.2.2. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Previo a la fabricación de tableros, se consultaron bibliografía, investigaciones anteriores y experiencias previas para la obtención de paneles mediante proceso seco.

La metodología desarrollada consistió en:

1. Determinación de las composiciones óptimas de los tableros
2. Obtención del tamaño del experimento
3. Elaboración de los tableros mediante proceso seco
4. Realización de ensayos experimentales en laboratorio para obtener las propiedades de los tableros fabricados
5. Análisis microscópicos para analizar la adhesión entre las partículas
6. Análisis estadístico de los datos obtenidos

3.2.3. PROCESO DE FABRICACIÓN

El proceso de fabricación seguido consistió en las siguientes actividades:

- a. Separación de la materia prima según origen
- b. Deshojado y corte de la materia prima en longitudes de 0,5 m para facilitar su introducción en la desfibradora
- c. Desfibrado de los trozos mediante una desfibradora de cuchillas de eje horizontal (Figura 12), con una separación de cuchillas entre 1.7 y 2.07 mm, como se puede observar en la Figura 13



Figura 12. Desfibradora de cuchillas.

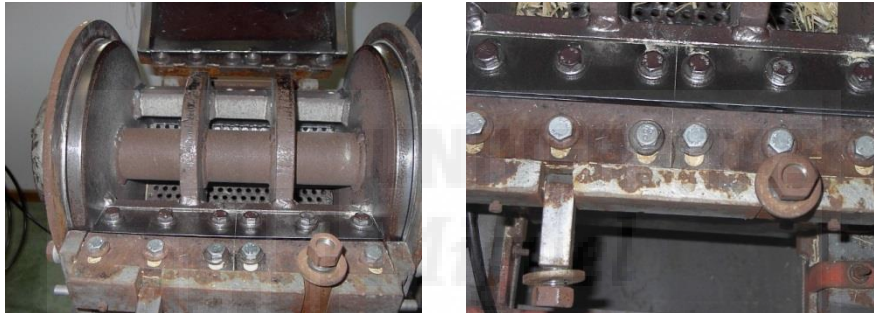


Figura 13. Cuchillas de la desfibradora

- d. Tamizado de las partículas de caña obtenidas en la desfibradora, clasificándose según el tamiz en el que son retenidas. Para el tamizado se ha utilizado una tamizadora vibratoria con tamices homologados.
- e. Mezclado manual de partículas
- f. Formado de la manta del tablero en un molde de dimensiones 400 x 600 mm con un tratamiento previo de protección del molde con film de polietileno de alta temperatura para facilitar el desmoldeo (Figura 14)



Figura 14. Molde para formar la manta del tablero

- g. Adición de forma pulverizada de un 10% de agua en función del peso de las partículas

- h. Prensado en prensa de platos calientes variando tiempos, presiones y temperaturas. La prensa utilizada se puede observar en la Figura 15



Figura 15. Prensa de platos calientes

- i. Enfriado de los tableros al aire a una temperatura de 20° C, y humedad ambiente de 65 %, apilados en posición vertical. Posteriormente se cortaron para obtener las probetas de ensayo
- j. Corte de las probetas mediante una cortadora mecánica (Figura 16)



Figura 16. Cortadora mecánica

Durante la fabricación y realización de ensayos, se mantuvo el entorno de humedad del 65% y temperatura de 20° C mediante climatización.

3.2.4. CLASES Y COMPOSICIÓN DE LOS TABLEROS

3.2.4.1. Tableros de Poda de Viñedo

Las partículas de los residuos de poda se mezclaron con un 8 % de resina Urea Formaldehído mediante pulverización en una encoladora horizontal marca IMAL, como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Encoladora horizontal

Los tableros se formaron manualmente y metidos en la prensa durante 6 minutos a la temperatura de 140 °C. Los tableros así fabricados son de una sola capa y tienen unas dimensiones de 600x400x8.5 mm.

Se fabricaron un total de 24 paneles, 4 tipos con 6 repeticiones por tipo, utilizando 2 tamaños de partícula (0.25-1 mm y 1-2 mm) y 2 presiones en la prensa de platos calientes (2 MPa y 2.5 MPa).

Tabla 8. Tipos de tablero de partícula de poda de viñedo

Tipo	N	Diámetro partícula (mm)	Presión (MPa)
1	6	0.25-1	2.0
2	6	1-2	2.0
3	6	0.25-1	2.5
4	6	1-2	2.5

3.2.4.2. Tableros de Biomasa de Palmera Canaria

En una primera ronda se fabricaron 30 paneles utilizando troncos de palmera y adhesivo, dando lugar a 6 tipos de tableros.

Las partículas se colocaron en el molde donde después, se añadió una cantidad precisa de almidón pulverizado y se mezcló manualmente. Finalmente se pulverizó un 10% de agua (en relación al peso de las partículas) sobre la superficie de los moldes

antes de meterlos en la prensa de platos calientes. La configuración de los tableros es de una sola capa. La prensa se configuró a 110°C y 2.5 MPa. Se prensaron en dos lotes, unos tipos durante 15 minutos y otros durante 30.

Tabla 9. Tipos de tablero de partícula de biomasa de palmera canaria y almidón

Tipo	N	Palmera: Almidón (% peso)	Tiempo de prensado (min)
1	5	10:0	15
2	5	10:0	30
3	5	10:1	15
4	5	10:1	30
5	5	10:2	15
6	5	10:2	30

En la siguiente tanda de tableros se modificaron una serie de parámetros

No se añadió almidón y sólo se pulverizó un 3% de agua sobre la superficie de las partículas de palmera. Los moldes se mantuvieron en la prensa de platos calientes a una temperatura de 120°C y una presión de 2.6 MPa.

Se fabricaron 36 tableros con 9 configuraciones diferentes: tres materias primas procedentes de las distintas partes de la palmera (tábala, tronco y raquis de la hoja) y tres tamaños de partícula, como se indican en la Tabla 10.

Tabla 10. Tipos de tablero de partícula sin adhesivos de biomasa de palmera canaria

Tipo	N	Material	Diámetro partícula (mm)
1	4	Tábala	< 0.25
2	4	Tábala	0.25 a 1
3	4	Tábala	1 a 2
4	4	Tronco	< 0.25
5	4	Tronco	0.25 a 1
6	4	Tronco	1 a 2
7	4	Raquis de la hoja	< 0.25
8	4	Raquis de la hoja	0.25 a 1
9	4	Raquis de la hoja	1 a 2

3.2.5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Las propiedades de los tableros se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera. Los ensayos experimentales han consistido en:

- Ensayo de humedad.
- Densidad de los tableros.
- Determinación del Módulo de Elasticidad a flexión y de la resistencia característica a flexión.

- Resistencia a tracción perpendicular o cohesión interna.
- Hinchamiento en espesor después de 2 y 24 horas de inmersión en agua.
- Absorción de agua después de 2 y 24 horas de inmersión en agua.
- Ensayo de inflamabilidad.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM).

3.2.5.1. Ensayo de Humedad.

Para los ensayos de contenido de humedad de los tableros se debe aplicar la norma EN 322 (1993), que se basa en la determinación por pesada de la pérdida de masa en la probeta, entre su estado en el momento del muestreo y después de secar hasta masa constante a 103 ± 2 °C.

Para ello se ha utilizado una balanza graduada en 0.01 g, y un medidor de humedad de laboratorio con microprocesador con precisión ± 0.01 como indica la Figura 18. Las probetas utilizadas en determinación de la humedad poseen dimensiones rectangulares y una masa inicial de 20 ± 1 g.



Figura 18. Medidor de humedad de laboratorio

Para calcular la humedad H de cada probeta como tanto por ciento de la masa con una aproximación del 0.1%, se emplea la siguiente fórmula:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

donde:

m_H es la masa inicial de la probeta en gramos
 m_0 es la masa de la probeta después del secado en gramos

3.2.5.2. Densidad de los Tableros.

Para la obtención de la densidad de los tableros se siguió el procedimiento que indica la norma EN 323 (1993). "Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad".

Como instrumento de medida se utilizó un micrómetro con precisión de 0,01 mm, un calibre de precisión 0.1 mm y una balanza de 0.01 g que están integrados en la máquina de ensayos universal.

Las probetas se cortaron en dimensiones de 50x50 mm de lado, con unas condiciones de laboratorio de 65 ± 5 % humedad relativa y 20 ± 2 °C. El espesor t se midió en el punto de intersección de las diagonales como indica la Figura 19.

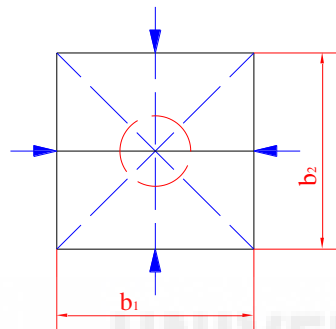


Figura 19. Punto de medida para determinación del espesor.

Además del espesor t , se hallaron los valores de b_1 y de b_2 , tal y como lo indican las flechas en la Figura 19 en mm y se pesaron las probetas siendo m el peso en gramos. La densidad de cada probeta en kg/m^3 , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \times 10^6 \quad (2)$$

3.2.5.3. Resistencia a Flexión.

Para la determinación de la resistencia a flexión se realizó el procedimiento estipulado en la norma EN 310 (1993). "Tableros derivados de madera. Determinación del Módulo de Elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión".

En función del espesor del tablero t , se fijan las medidas (en mm) de apoyos de los rodillos así como la del vuelo que tiene que tener el tablero. Es decir:

$$L_1 = 20 \cdot t$$

$$L_2 = L_1 + 50$$

Los diámetros de los cilindros de carga están normalizados por lo que las probetas se definen en función del espesor, con un ancho fijo de 50 mm. El largo se cortó en función de la dimensión L_2 que define la norma y los apoyos se regulan en base a L_1 , y $L_{1/2}$ (Figura 20).

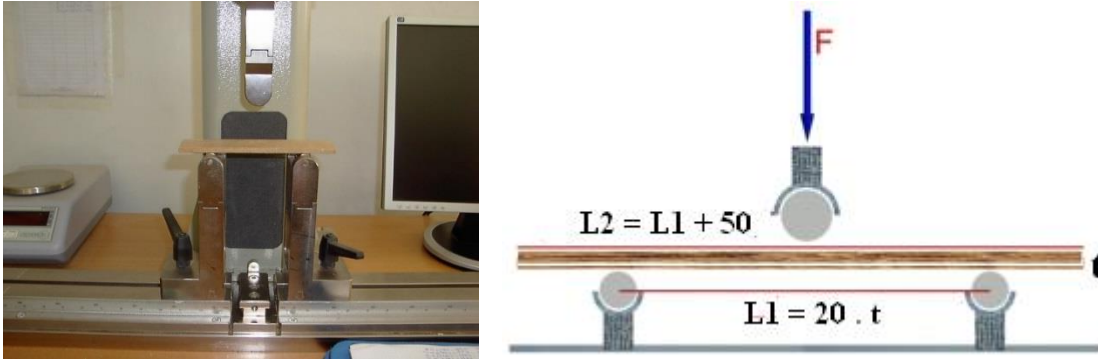


Figura 20. Ensayo normalizado (EN-310). Croquis de colocación de rodillos.

La resistencia a flexión f_m (N/mm²), de cada probeta, se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L_1}{2 \cdot b \cdot t^2} = MOR \quad (3)$$

donde:

- F_{\max} es la carga máxima en Newton.
- L_1 es la distancia entre los ejes de apoyo en mm.
- b es la anchura de la probeta en mm.
- t es el espesor de la probeta en mm.

El módulo de elasticidad a flexión E_m (N/mm²), de acuerdo con la norma EN para el ensayo de flexión de cada probeta, se define como indica la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{[L_1^3 \cdot (F_2 - F_1)]}{[4 \cdot b \cdot t^3 (a_2 - a_1)]} = MOE \quad (4)$$

siendo:

- F_1 valor de la carga correspondiente a aproximadamente un 10% del valor de la carga máxima en Newton.
- F_2 valor de la carga correspondiente a aproximadamente un 40% del valor de la carga máxima
- a_1 es el valor de la deformación en el punto F_1 .
- a_2 es el valor de la deformación en el punto F_2 .

3.2.5.4. Ensayo a Tracción Perpendicular o Cohesión Interna

Para determinar la resistencia a tracción perpendicular a las caras (cohesión interna) de los tableros se debe utilizar el procedimiento de la norma EN 319 (1993), que consiste en determinar la carga máxima aplicada en relación con la superficie de la probeta.

Se utilizó un calibre de acuerdo con la norma EN 325 (1995) y una máquina de ensayo capaz de aplicar una fuerza de tracción perpendicular a las caras de la probeta, por

medio de tacos de agarre (bloques metálicos) y medir esta fuerza con una precisión del 1%.

Se prepararon probetas de dimensiones cuadradas de 50 ± 1 mm de lado, con cantos rectos y limpios. Éstas y los bloques metálicos se acondicionaron hasta masa constante en una atmósfera de humedad media relativa de 65 ± 5 % y temperatura de 20 ± 2 °C.

Las probetas se encolaron posteriormente sobre el bloque metálico mediante colas termofusibles (Figura 21) y se mantuvieron durante 24 horas en condiciones ambientales controladas antes de ensayarlas. Seguidamente se colocaron el conjunto bloque-probeta en los tacos de agarre (Figura 22) y se aplicó el esfuerzo de tracción hasta rotura.

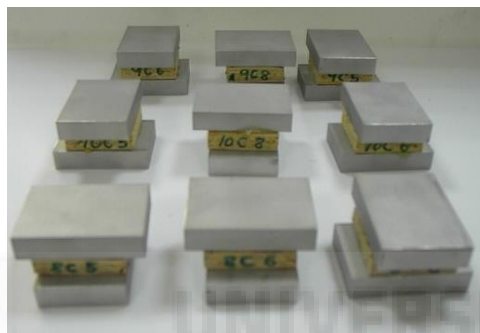


Figura 21. Probetas ensayo tracción perpendicular.



Figura 22. Tacos de agarre de probetas.

La carga se aplicó a velocidad constante durante todo el ensayo de forma que se alcanzase la carga máxima en 60 ± 30 segundos. Para obtener los resultados (con dos decimales expresados en N/mm^2) de cada ensayo a tracción sobre cada probeta se utiliza la siguiente fórmula:

$$f_{t\perp} = \frac{F_{\text{máx.}}}{a \cdot b} = IB \quad (5)$$

Donde:

$F_{m\acute{a}x}$	carga de rotura, en Newton
a	longitud de la probeta en milímetros
b	ancho de la probeta en milímetros

La resistencia a la tracción perpendicular de cada tablero se tomó como la media aritmética del conjunto de los resultados obtenidos sobre todas las probetas muestreadas de ese tablero.

3.2.5.5. Ensayo del Hinchamiento en Espesor

El ensayo del hinchamiento en espesor después de inmersión en agua se realizó aplicando la norma EN 317 (1993). Los aparatos utilizados fueron un micrómetro que según la norma EN 325 (1995) y una cubeta para baño de agua provista de termostato capaz de mantener la temperatura constante a 20 ± 1 °C (Figura 23).



Figura 23. Cubeta para baño de agua con termostato.

Las probetas se produjeron de forma cuadrada de 50 ± 1 mm de lado y se acondicionaron hasta masa constante en una atmósfera relativa media de 65 ± 5 % y temperatura de 20 ± 2 °C. Para la consideración de masa constante, se tiene en cuenta cuando dos pesadas consecutivas, realizadas en un intervalo de 24 h, no difieren en más del 0.1% de la masa de la probeta.

Procedimiento operatorio:

- Medición del espesor: Se midió el espesor de cada probeta en el punto de intersección de las diagonales con una precisión de 0.01 mm.
- Inmersión: Se sumergieron las probetas en posición vertical, en agua limpia, en reposo y con un pH de 7 ± 1 y una temperatura de 20 ± 1 °C. La temperatura se mantuvo durante el ensayo. Las probetas estaban separadas entre sí, así como del fondo y las paredes de la cubeta (Figura 24). Durante el ensayo los cantos superiores de las probetas quedaron sumergidos a 25 ± 5 mm. El tiempo de inmersión fue de 2 h y 24 h.



Figura 24. Algunas probetas en inmersión en agua

- Medición del espesor después de inmersión: Una vez finalizado el tiempo de inmersión se sacaron las probetas del baño, se eliminó el exceso de agua (Figura 25) y se midió el espesor de cada probeta.



Figura 25. Algunas probetas después de inmersión en agua.

Finalmente se calculó la hinchazón en espesor de cada probeta Gt (TS), expresada en tanto por ciento sobre su espesor inicial, mediante la fórmula

$$Gt = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 = TS \quad (6)$$

donde:

- t_1 espesor de la probeta antes de inmersión en mm
- t_2 espesor de la probeta después de inmersión en mm

Para determinar el valor a hinchazón en espesor de un tablero se consideró la media aritmética de los resultados de todas las probetas tomadas de cada tablero.

3.2.5.6. Ensayo de Absorción de Agua

Gracias a los resultados de los ensayos anteriores se puede calcular la absorción de agua. La ganancia de masa de agua después de inmersión al cabo de un tiempo se calcula mediante la ecuación:

$$M_t(\%) = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 = WA \frac{(\text{masa de agua})}{(\text{masa de la muestra})} \quad (7)$$

donde

M_t	ganancia de masa (agua) al cabo de un tiempo t
M	masa de la muestra tras un tiempo t
m_0	masa inicial de la muestra seca

3.2.5.7. Ensayo de Inflamabilidad

Para determinar la inflamabilidad de los tableros de caña común se han realizados los ensayos empleando la norma UNE EN ISO 11925-2, mediante aplicación directa de llama pequeña, con radiación nula y utilizando muestras ensayadas en orientación vertical, utilizando el equipo de la figura 26 que cumple dicha norma.



Figura 26. Equipo de inflamabilidad mediante aplicación directa de llama.

Las muestras de ensayo eran una muestra representativa del producto a ensayar; las dimensiones de las muestras eran de 250 ± 1 mm de longitud por 90 ± 1 mm de anchura.

Se colocaron dos piezas de papel de filtro en la bandeja de aluminio bajo la muestra, como máximo 3 minutos antes del comienzo del ensayo. Para cada condición de exposición se ensayaron un mínimo de seis muestras representativas, tres cortadas en la línea longitudinal y otras tres en la transversal. Se utilizó un tiempo de duración de aplicación de la llama 30 s; el comienzo de ensayo tuvo lugar en el momento de aplicación de la llama. La duración total del ensayo de cada muestra fue de 60 s desde el momento en que se aplicó la llama.

Para cada una de las muestras de ensayo, se registró lo siguiente:

- Si se producía ignición.
- Si la parte superior de la llama alcanza los 150 mm sobre el punto de aplicación y el momento que esto ocurre.
- Si se produce ignición del papel de filtro.
- Pérdida de masa de la muestra
- Observaciones del comportamiento físico de la muestra de ensayo.

3.2.5.8. Ensayo de conductividad térmica.

La baja conductividad térmica es lo que caracteriza a los materiales aislantes térmicos. El procedimiento de ensayo para determinar la conductividad y la resistencia térmica en los materiales de construcción se encuentra recogido fundamentalmente en la norma EN 12667 (2002).

Esta norma es aplicable para todos aquellos productos con una resistencia térmica esperada igual o mayor a 0,5 m²K/W, siendo el límite para considerar a un material como aislante térmico que tenga una conductividad térmica igual o menor a 0,06 W/(m·K) esta técnica es válida para determinar la conductividad térmica en toda la gama de espesores en la que nos movemos dentro del aislamiento térmico.

Dentro de la norma de ensayo se recogen dos posible métodos: el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Ambos métodos son igualmente válidos, siendo el hecho diferencial entre ellos que el primero es un método absoluto y el segundo un método relativo, es decir, está basado en una calibración previa del equipo realizada con un material cuya conductividad térmica es conocida y está certificada.

El método más implantado actualmente es el método del equipo medidor de flujo de calor debido fundamentalmente a la rapidez con la que se realizan las medidas. Dentro del método del medidor de flujo de calor existen 3 posibles variantes del equipo a utilizar: simétrico de una muestra, simétrico de dos muestras y asimétrico de una muestra, así como equipos dobles, siendo posible en todas estas variantes tanto la orientación vertical como la horizontal.

Para determinar la conductividad térmica en el estado estacionario del material se utilizó el equipo de la Figura 27 y se empleó la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{\Delta T} = \frac{\lambda}{e} = \frac{1}{R} \quad (8)$$

donde:

dQ	flujo de calor (W/m ²)
ΔT	diferencia de temperatura entre los dos lados de la muestra (K)
λ	conductividad térmica de la muestra (W/m·K)
e	espesor de la muestra (m)
R	resistencia térmica de la muestra (m ² ·K/W)
A	la sección de la base de la probeta en mm ²

El flujo de calor se obtiene a partir de las constantes de calibración de los medidores de flujo de calor y de la señal eléctrica que proporcionan.



Figura 27. Equipo medidor de flujo de calor.

3.2.5.9. Microscopía Electrónica De Barrido (SEM)

Para evaluar y analizar la biomasa de los tableros y su composición química, se empleó la microscopía electrónica de barrido (SEM) y se realizó un análisis elemental (cualitativo y semicuantitativo) por espectroscopia de energía dispersiva (EDS). Se tomaron micrografías a partir de secciones transversales fracturadas de 0,5 cm por 0,5 cm. Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo Modelo Nova NanoSEM 200 Marca FEI con las siguientes características:

- Resolución de 1nm a 30Kv, 1.5 nm a 10 kV (Bajo vacío).
- Voltaje Acelerador: 200 V a 30 kV.
- Modos de trabajo: Alto vacío para muestras conductoras, Bajo vacío para muestras semi y no conductoras.
- Sistema EDS. Sistema de Microanálisis De Energía Dispersiva de Rayos X (EDS o EDX) Marca Oxford Modelo INCA X-Sight.

La microscopía electrónica de barrido o SEM se basa en el principio de la microscopía óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. Con esto se consigue hasta los 100 Å, una resolución muy superior a cualquier instrumento óptico. Las aplicaciones de la microscopía electrónica de barrido son muy numerosas tanto en Ciencia de Materiales, como en Ciencia Biomédica. Dentro de la Ciencia de Materiales destacan las aplicaciones en metalurgia, petrología y mineralogía, materiales de construcción, materiales cerámicos y estudio de superficies y composición elemental de sólidos en general.

La técnica consiste, principalmente, en enviar un haz de electrones incidente de entre 5 y 30 KeV sobre la muestra y cuando alcanzan la superficie se generan electrones secundarios, electrones retrodispersados, radiación electromagnética (rayos X) y otras partículas menos significativas. El microscopio se encuentra internamente equipado con unos detectores que recogen la energía y la transforman en las siguientes imágenes y datos:

- Detector de electrones secundarios: con los que obtenemos las imágenes de alta resolución.

- Detector de electrones retrodispersados: Con menor resolución de imagen pero mayor contraste para obtener la topografía de la superficie.
- Detector de energía dispersiva: (EDS, espectroscopia de energía dispersiva) detecta los rayos X generados y permite realizar un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

3.2.6. MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL

Para todos los ensayos mecánicos se utilizó la máquina de ensayos universal de la marca IMAL de la Figura 28.



Figura 28. Máquina universal de ensayos.

Esta máquina se diseñó para ejecutar pruebas de laboratorio con muestras de tableros aglomerados de madera, MDF, OSB y materiales asimilados.

Las pruebas ejecutables en el equipo conforme a las normas europeas EN son:

- Dimensiones (EN 325, 1995)
- Densidad (EN 323, 1995)
- Resistencia a flexión y módulo de elasticidad (EN 310, 1993)
- Resistencia a tracción interna (EN 319, 1993)
- Resistencia al arranque de arranque de tornillo (EN 320, 1993)

Las características técnicas de la máquina de ensayos se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos técnicos de la máquina de ensayos

Espesor mínimo muestras	2	mm
Espesor máximo de muestras medido en la columna de análisis dimensional	150	mm
Espesor máximo de muestras para ejecución de pruebas mecánicas	50	mm
Velocidad mínima de avance	0.001	mm/min
Velocidad máxima de avance	999	mm/min
Flecha máxima de flexión	50	mm
Distancia máxima de soportes de flexión	1100	mm
Precisión medidor dimensional	1/100	mm
Precisión balanza	1/100	mm
Calibración célula de carga bidireccional	± 9800	N
Presión de aire comprimido	3	bar
Precisión	± 0.1	%
Potencia instalada	1	kW
Tensión de alimentación/ frecuencia	120/60 220/50	V/Hz V/Hz

La máquina está programada para utilizar automáticamente una velocidad según la prueba y el espesor de la muestra de ensayo. Las siguientes fórmulas de velocidad son las aplicadas a las pruebas de tracción y flexión según indican las normas EN para cada ensayo.

Velocidad para la prueba de Tracción

$$V = 0,08 \cdot t \quad (9)$$

donde:

V velocidad de la prueba
 t espesor de la muestra

Velocidad de la prueba de Flexión

$$V = \frac{0,005 \cdot L^2}{t} \quad (10)$$

donde:

V velocidad de la prueba
 L distancia entre apoyos
 t espesor de la muestra

3.2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para obtener el tamaño del experimento de cada uno de los ensayos se optó por aplicar la ecuación simplificada de Cochran y Cox. El número de tableros necesarios de cada clase se obtuvo de los ensayos previos mediante la ecuación simplificada para que el experimento tenga una probabilidad del 95 % de ser significativo.

$$N = \frac{4 \cdot \sigma^2}{\delta^2} \quad (11)$$

siendo:

N	número de tableros necesarios para los ensayos
σ	desviación típica de los datos de la variable
δ	error que se tolera respecto al valor medio de la variable (10 %)

El análisis estadístico de los resultados obtenidos en los ensayos se realizó siguiendo la norma EN 1058 (1996). Tableros Derivados de la madera. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad.

Se deben utilizar de manera general las siguientes ecuaciones para cada tablero y para cada tipo de tablero.

El valor medio aritmético:

$$m(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (12)$$

siendo:

x	variable
n	número de resultados de ensayos
$m(x)$	valor medio de los datos de la variable

La desviación típica:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m(x))^2}{n - 1}} \quad (13)$$

siendo:

$s(x)$	desviación típica de los datos de la variable
--------	-----------------------------------------------

El coeficiente de variación:

$$\delta(x) = \frac{s(x)}{m(x)} \quad (14)$$

3.2.8. INFLUENCIA DE VARIABLES DE FABRICACIÓN EN LAS PROPIEDADES DE LOS TABLEROS

Para obtener la influencia de las distintas variables se procedió obteniendo las barras de error y realizando el análisis de la varianza y pruebas de comparaciones múltiples.

- Barras de error

Para medir la influencia de cada variable (tipo de tablero, Tamaño de partícula, presión y tiempo en la prensa de platos calientes) en las propiedades del tablero, se obtuvieron en primer lugar los diagramas de barras de error para cada variable. Las barras permitieron identificar la variabilidad de la medida empleada como función de resumen (la media y la desviación estándar).

- Análisis de la varianza (ANOVA):

El Análisis de la Varianza (ANOVA) fue diseñado por Sir Ronald A. Fisher y se ha utilizado en todos los campos de investigación en los que los datos se miden cuantitativamente (Fisher 1958). Es la herramienta fundamental para el estudio de una variable de interés a partir de observaciones que dependen de varios factores, porque permite descomponer la variabilidad de un experimento en componentes independientes a las que pueden asignarse diferentes causas. Se define también como el proceso aritmético que descompone una suma total de cuadrados en componentes asociados con fuentes de varianza reconocidas (Steel et al. 1985). El Análisis de la Varianza de medidas repetidas, se caracteriza por el hecho de que las observaciones o respuestas diferentes registradas para cada elemento, no son el resultado de valorar variables diferentes, sino el resultado de valorar un mismo aspecto distintas ocasiones.

En el análisis de la varianza, el valor que sirve de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula, es el nivel de significación. Si el nivel de significación del estadístico de contraste F, es mayor que 0,05 aceptamos la hipótesis nula de independencia de variables (no existen efectos diferenciales entre los tratamientos). Si el nivel de significación es menor que 0,05 rechazamos la hipótesis nula y aceptamos que existe una relación de dependencia entre las variables y en este caso podremos decir que los niveles del factor sí influyen sobre los valores de la variable cuantitativa.

- Pruebas de comparaciones múltiples.

Los test de comparaciones múltiples permiten comparar las medias de los "t" niveles de un factor después de haber rechazado la Hipótesis nula de igualdad de medias mediante el análisis ANOVA. Todos los tests de comparaciones múltiples tratan de perfilar, especificar y concretar una Hipótesis alternativa genérica sobre la influencia de las diferentes variables. En esta tesis se utilizó la prueba de Duncan, cuando los tamaños de las muestras eran iguales y los tratamientos presentaban una relación ordinal, es decir, podían ordenarse de manera ascendente o descendente en una escala no numérica. Cuando los tamaños de muestras no eran iguales se utilizó la prueba de Tukey que permite hacer todas las posibles comparaciones de tratamientos de dos en dos,

Para realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, se utilizó el programa estadístico SPSS 21.0 de IBM para Windows.

3.2.9. CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS DE PARTÍCULAS

La norma EN 312 (2010) clasifica los tableros de partículas en 7 tipos según las propiedades que presenten de resistencia a flexión, módulo de elasticidad en flexión, cohesión interna, resistencia al arranque de tornillo e hinchazón en espesor durante 24 horas en agua. Esta clasificación queda por tanto definida de la siguiente manera:

- P1 Tableros para utilización general en ambiente seco
- P2 Tableros para aplicación interior (incluyendo mobiliario) en ambiente seco
- P3 Tableros no estructurales para utilización en ambiente húmedo
- P4 Tableros estructurales para utilización en ambiente seco
- P5 Tableros estructurales para utilización en ambiente húmedo
- P6 Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente seco
- P7 Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente húmedo

Para evaluar los tableros fabricados se realizó una comparación con lo indicado en la norma. Estos requisitos que debe cumplir cada tablero de partículas, para un espesor entre 6 y 13 mm, son los que figuran en la Tabla 12.

Tabla 12. Requisitos de los tableros de partículas según la norma EN 312 (2010)

Propiedad	Norma	Unidades	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
Resistencia a flexión	EN 310	N/mm ²	12,5	13	15	16	18	20	22
Módulo elasticidad en flexión	EN 310	N/mm ²	-	1800	2050	2300	2550	3150	3350
Cohesión interna. Tracción perpendicular	EN 319	N/mm ²	0,28	0,40	0,45	0,40	0,50	0,60	0,75
Hinchazón en espesor 24 horas	EN 317	%	-	-	14	16	11	14	9

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE LOS MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE PARTICIONES INTERIORES

4.1.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Una vez modelados los inventarios de cada alternativa de solución constructiva para las particiones de interior en SimaPro 7.3.2 y aplicados los métodos de evaluación del impacto (elementos obligatorios y optativos), se han obtenido los resultados que se muestran a continuación.

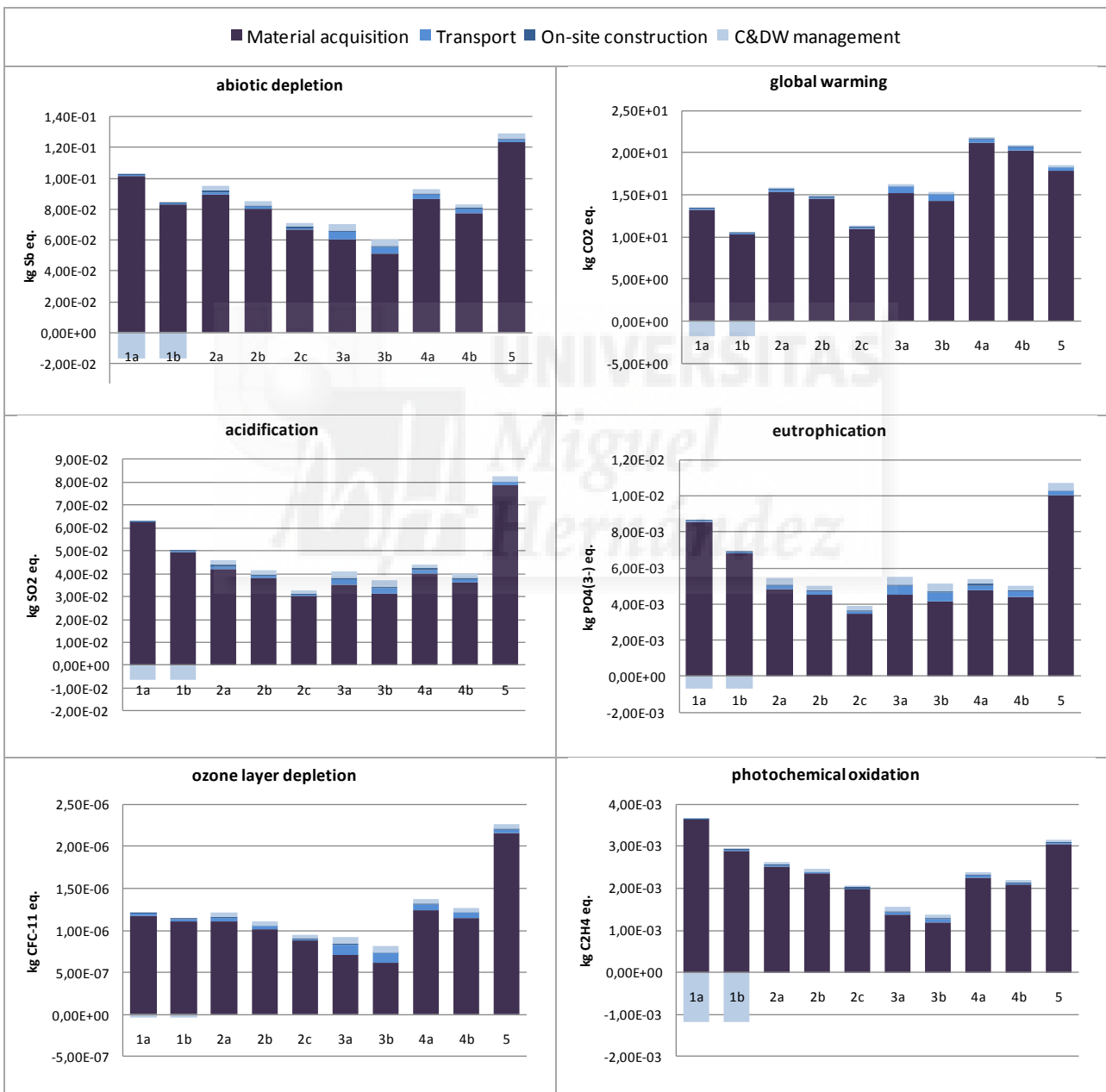


Figura 29. Indicadores ambientales por categoría de impacto según CML2001, por etapa del ciclo de vida.

La Figura 29 muestra los resultados de los indicadores ambientales obtenidos para cada una de las categorías de impacto y de las etapas del ciclo de vida consideradas.

Aplicando los métodos de ponderación comentados anteriormente, la Figura 30 muestra los indicadores obtenidos para cada alternativa, según los métodos Eco-Indicador'99 y EPS. El Eco-Indicador'99 se obtiene bajo la perspectiva jerárquica, que integra los valores obtenidos para tres categorías de daño: salud humana, calidad del eco-sistema y agotamiento de recursos, con una proporción de 40-40-20%, respectivamente.

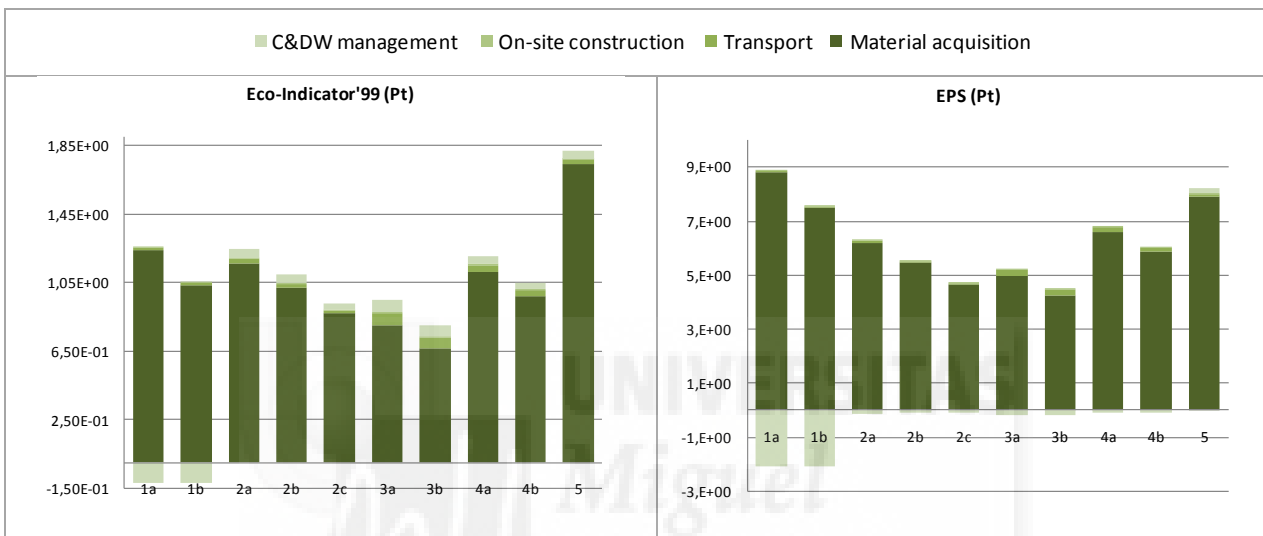


Figura 30. Indicadores ambientales según los métodos Eco-Indicador'99 y EPS, por etapa del ciclo de vida

Y en la Figura 31 se muestran los costes económicos de cada solución constructiva por etapa del ciclo de vida.

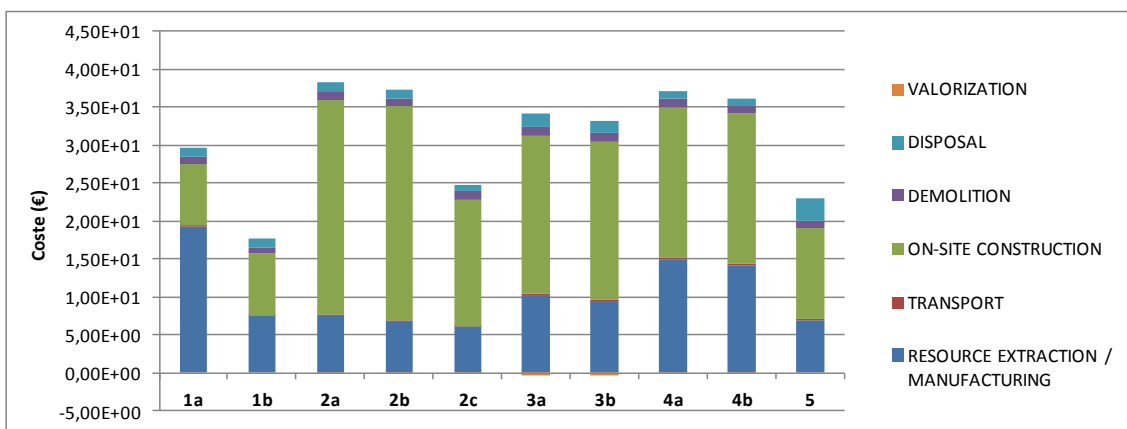


Figura 31. Costes económicos de cada solución constructiva por etapa del ciclo de vida

4.1.2. DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS

De los resultados de ACV obtenidos se identifica a la etapa de fabricación de las particiones como la más contribuyente al impacto del ciclo de vida de las alternativas analizadas. Por lo tanto, el impacto global de cada solución constructiva sólo varía levemente con la suma de las demás etapas.

Las contribuciones más significativas en las categorías de agotamiento de recursos naturales, acidificación, eutrofización y reducción de la capa de ozono las protagoniza la alternativa 5. En la categoría de calentamiento global, el mayor impacto lo produce la alternativa 4 y en la de reducción de la capa de ozono, es la alternativa 1 la que mayor impacto provoca. En el caso de la alternativa 1, el reciclaje de la estructura de acero atenúa significativamente la contribución producida, sobre todo en la oxidación fotoquímica.

Como se observa, las alternativas 1b, 2b, 2c, 3b y 4b tienen un mejor comportamiento ambiental para todas las categorías de impacto. La alternativa 3b mejora los resultados de la 3a, siendo la que menos contribuye al agotamiento de recursos naturales, reducción de la capa de ozono y oxidación fotoquímica. La alternativa 2c consigue situarse como la mejor para la acidificación y eutrofización, mientras que la 1b para el calentamiento global.

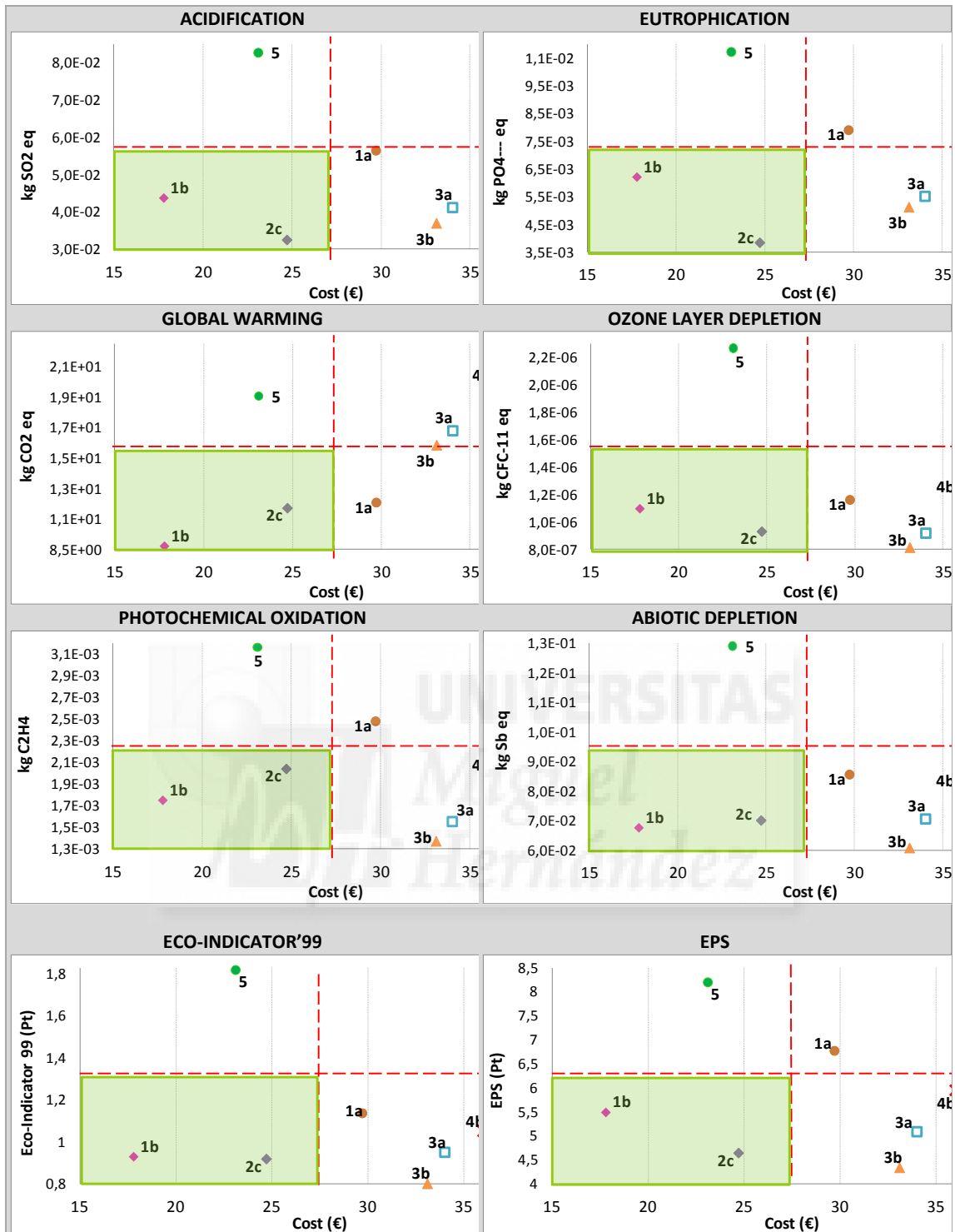
La sustitución del aislante entre las alternativas 1a y 1b no influye decisivamente en la categoría de reducción de la capa de ozono, ya que, en este caso, la fabricación de la lana de roca no genera grandes emisiones. En cambio y por este mismo motivo, en la categoría de calentamiento global, la reducción es muy importante.

La reducción del grosor de enlucido sí que consigue una mejora ambiental acusada en todas las categorías, sobre todo en agotamiento de recursos naturales y acidificación.

En el plano económico, la etapa de construcción es la que supone un mayor coste a lo largo de todo el ciclo de vida de las particiones interiores, principalmente, debido al coste económico de la mano de obra requerida para su colocación. Seguidamente se encuentran la etapa de extracción y fabricación de las materias primas, en este caso debido, principalmente, al consumo energético. Cabe señalar que la etapa de valorización apenas compensa el impacto económico producido. En general se identifica al sistema 1b como la partición interior que conlleva un menor coste.

4.1.3. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenidos los indicadores que cuantifican el comportamiento ambiental y económico a lo largo del ciclo de vida de cada alternativa de solución constructiva para particiones interiores, es necesario combinarlos para facilitar la selección de la mejor alternativa económica y medioambiental del mercado. La eco-eficiencia se considera una "filosofía administrativa" que impulsa a empresas y mercados hacia la producción y comercialización de productos respetuosos con el medio ambiente, a la vez que rentables (WBCSD, 2000a). Dentro del campo de la construcción sostenible, los análisis de eco-eficiencia pueden utilizarse para facilitar la identificación de materiales/sistemas constructivos ambiental y económicamente óptimos.



Las líneas dividen los gráficos en cuatro cuadrantes según el comportamiento económico y ambiental, siendo la opción marcada en verde la considerada más eco-eficiente.

Figura 32. Análisis de la eco-eficiencia: impacto ambiental frente a coste total (€)

A continuación se realiza un análisis de eco-eficiencia sobre los sistemas constructivos propuestos con el fin de identificar las alternativas óptimas, desde el punto de vista ambiental y económico. Para ello, de acuerdo con los principios de la eco-eficiencia definidos anteriormente, se compara el impacto económico de cada sistema

constructivo bajo análisis frente al impacto ambiental producido a lo largo de todo su ciclo de vida. Es decir, se elabora un gráfico de eco-eficiencia XY para cada indicador ambiental calculado. En dichos gráficos se representa, en el eje-x, el coste económico (€) que conlleva todo el ciclo de vida de cada sistema constructivo y en eje-y, el impacto ambiental producido de la cuna a la tumba obtenido para cada indicador ambiental. Los parámetros económicos y ambientales han sido calculados con anterioridad.

Para identificar las alternativas eco-eficientes, los gráficos de eco-eficiencia deben dividirse en cuatro áreas iguales comprendidas entre los valores máximos y mínimos que las alternativas toman tanto en el eje-x (coste económico) como en el eje-y (impacto ambiental). Cada área representa un nivel de eficiencia ambiental y económica diferente. En el caso de estudio, el área de abajo a la izquierda, coloreada en verde en las gráficas de eco-eficiencia de la Figura 32, representa el área de máxima eco-eficiencia donde las soluciones constructivas alcanzan el menor impacto ambiental con el mínimo coste y, por lo tanto, pueden considerarse como las opciones óptimas.

Tal y como muestra la Figura 32, las soluciones constructivas 1b (sistema autoportante de paneles de cartón-yeso) y 2c (sistema de ladrillo cerámico hueco) son los sistemas constructivos más eco-eficientes y por lo tanto más recomendables desde el punto de vista ambiental y económico para todos los indicadores ambientales analizados.



4.2. TABLEROS EXPERIMENTALES

4.2.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.1.1. Propiedades Físicas

Los resultados de los ensayos físicos de los paneles se reflejan en la Tabla 13 (poda de viñedo), Tabla 14 (Palmera canaria con almidón) y Tabla 15 (Palmera canaria sin adhesivos), donde también están indicadas las desviaciones estándar y la significancia.

Tabla 13. Propiedades Físicas de los tableros de poda de viñedo

Partícula (mm)	Presión (MPa)	Densidad (kg/m ³)	% TS 2h	% TS 24h	% WA 2h	% WA 24h	Conduct. Térm.(W/m K)
0.25 a 1	2.0	867.48 ^a	15.10 ^a	26.45 ^a	37.61*	61.87 ^a	0.065 ^a
		(59.88)	(1.28)	(2.62)	(8.62)	(9.83)	(0.001)
	2.5	945.28 ^b	16.50 ^a	28.09 ^a	33.62*	62.61 ^a	0.065 ^a
		(38.28)	(3.34)	(3.14)	(8.55)	(9.57)	(0.002)
1 a 2	2.0	820.83 ^a	21.51 ^b	30.73 ^b	41.73*	74.69 ^b	0.074 ^b
		(47.02)	(2.44)	(2.01)	(8.94)	(4.93)	(0.004)
	2.5	846.89 ^a	21.75 ^b	30,22 ^b	42.43*	75.45 ^b	0.086 ^c
		(30.58)	(2.16)	(1.93)	(8.15)	(5.86)	(0.001)

Valores entre paréntesis: desviación estándar. ^{a,b,c}Duncan ($p < 0.05$). TS (hinchamiento en espesor), WA (absorción de agua).

En el caso de la poda de viñedo, las densidades están entre 820 y 945 kg/m³, lo que significa que los paneles son de densidad media-alta. Esta propiedad depende del tipo de tablero producido. Los fabricados con el menor tamaño de partícula y con mayor presión obtienen la mayor densidad (tipo 2).

Los tableros obtenidos con dos tamaños de partículas de podas de viñedo se pueden observar en la Figura 33



Figura 33. Tableros de poda de viñedo

El hinchamiento en espesor (TS) después de 2 y 24 horas está influenciado por el tamaño de partícula, obteniendo mejores resultados los fabricados con partículas pequeñas. La absorción de agua (WA) después de 2 horas no depende del tipo de

panel, pero a 24 horas los paneles con tamaño de partícula menor (tipos 1 y 2) absorben menos agua que los fabricados con partículas mayores (tipos 3 y 4). En relación con la conductividad térmica, los resultados varían entre 0.065 y 0.086 W/m²K. Estos valores están en concordancia con los obtenidos con otros materiales fabricados con residuos agrícolas, y son menores que los de los tableros de partículas de madera. Es por ello que se puede concluir que los paneles producidos en este estudio son buenos aislantes. Esta propiedad depende del tamaño de la partícula y de la presión. Los fabricados con menor tamaño de partícula tienen menor conductividad térmica.

En general, el tamaño de la partícula tiene un efecto muy importante en las propiedades físicas ensayadas de los tableros de podas de viñedo.

Tabla 14. Propiedades Físicas de los tableros de palmera canaria con almidón

Palm:almidón	Tiempo (min)	Densidad (kg/m ³)	% TS 2h	% TS 24h	% WA 2h	% WA 24h
10:0	15	801,92	7,47	18,67	29,01	59,48
		(5,18)	(0,55)	(1,28)	(0,06)	(1,34)
	30	848,12	7,43	10,59	18,84	42,51
		(23,08)	(0,71)	(0,02)	(0,95)	(0,66)
10:1	15	888,68	11,26	24,00	20,04	52,50
		(50,10)	(0,06)	(2,13)	(0,06)	(3,54)
	30	913,71	8,79	22,77	21,62	55,00
		(37,41)	(0,82)	(3,10)	(1,51)	(2,31)
10:2	15	944,08	16,03	28,26	26,95	51,00
		(31,59)	(2,19)	(1,14)	(1,34)	(1,41)
	30	919,85	8,32	25,29	20,86	45,25
		(52,28)	(1,03)	(2,18)	(1,85)	(0,96)

Valores entre paréntesis: desviación estándar. TS (hinchamiento en espesor, WA (absorción de agua)

Los paneles de palmera canaria con almidón tienen una densidad de 802 a 920 kg/m³, por lo que pueden ser clasificados como de media-alta densidad como los de poda de viña. Esta propiedad depende de la cantidad de almidón utilizado y el tiempo de prensado, puesto que a mayor cantidad de ambos factores, mayor densidad.

Los tableros de palmera canaria con almidón se pueden observar en la Figura 34



Figura 34. Tableros de tronco de palmera canaria con almidón.

El hinchamiento en espesor (TS) después de 24 horas varía entre 14,59 y 28,26 %. Estos valores están profundamente influidos por la cantidad de adhesivo y el tiempo de prensado. Los paneles fabricados sin almidón tienen mejores resultados de TS ya que se hinchan menos. En relación al tiempo de prensado, cuanto más tiempo están los paneles en la prensa, menor es su absorción de agua, mientras que los paneles con mayor proporción de almidón, mayor TS experimentan. La absorción de agua (WA) en cambio no depende de la proporción de adhesivo y sólo del tiempo que estuvieron en la prensa. Los tableros fabricados durante 30 minutos absorben menos agua que aquellos que estuvieron 15 min.

Teniendo en cuenta que no se han utilizado ceras ni otras sustancias hidrófilas, se puede considerar que los tableros poseen buenas propiedades frente a TS y WA al compararlos con otros fabricados con materiales lignocelulósicos. Los paneles fabricados con partículas de caña común sin adhesivos tienen unos valores de TS de 74.54% y, cuando se les añade un 10% de almidón, de 48.68 % (Ferrández-García et al., 2012). Hashim et al., (2011) obtuvieron unos valores de 39.60% en paneles sin adhesivos de palmera de aceite. Selamat et al., (2014) utilizando partículas de árbol de caucho (*Hevea brasiliensis*) mezcladas con un 15% de almidón de palmera de aceite, obtuvieron un TS medio de 103.63 %.

Dado que los parámetros de fabricación son bajos en cuanto a presiones y temperatura, el buen comportamiento a TS de los paneles sin adhesivos ensayados en este estudio, podría ser atribuido al contenido de polisacáridos presentes en la materia prima.

A 110°C ni la lignina ni la celulosa se funden, por lo que este comportamiento parece deberse a los polisacáridos mencionados. Considerando que los paneles están fabricados con almidón, de naturaleza hidrófila, un incremento en la proporción de éstos produce el incremento en el TS observado.

Tabla 15. Propiedades Físicas de los tableros de palmera canaria sin adhesivos

Tipo	Densidad (kg/m ³)	TS 2h (%)	TS 24h (%)	WA 2h (%)	WA 24h (%)
1	848.0 (22.6) ^{bcd}	5.48 (0.08) ^a	10.09 (0.69) ^a	18.84 (0.95) ^a	42.52 (0.66) ^a
2	763.0 (1.4) ^{ab}	5.74 (0.09) ^a	13.90 (0.03) ^a	26.01 (0.61) ^{ab}	51.01 (3.70) ^a
3	675.0 (21.2) ^a	15.65 (0.71) ^b	24.81 (2.04) ^b	29.75 (2.06) ^{bc}	82.29 (5.83) ^b
4	901.3 (57.6) ^d	18.55 (2.01) ^b	31.58 (5.15) ^c	37.46 (6.25) ^c	76.25 (6.99) ^b
5	838.5 (6.4) ^{bcd}	18.12 (1.23) ^b	27.56 (0.59) ^{bc}	67.73 (2.57) ^d	74.79 (2.85) ^b
6	781.5 (26.2) ^{bc}	25.09 (0.54) ^{bc}	28.36 (2.27) ^{bc}	65.75 (0.91) ^d	75.51 (5.35) ^b
7	878.0 (53.2) ^{cd}	31.93 (3.12) ^c	47.43 (2.14) ^d	100.44 (8.70) ^e	104.31 (5.97) ^c
8	855.0 (32.7) ^{bcd}	44.69 (9.93) ^d	55.22 (7.89) ^e	117.96 (8.70) ^f	136.13 (3.27) ^d
9	804.7 (94.7) ^{bcd}	53.59 (6.79) ^d	60.31 (3.19) ^e	145.12 (3.43) ^g	157.15 (4.49) ^e

Valores entre paréntesis: desviación estándar. ^{a,b,c}Duncan ($p < 0.05$). TS (hinchamiento en espesor), WA (absorción de agua).

La densidad de estos paneles varía de 675.0 a 901.3 kg/m³ por lo que se puede concluir que los paneles tienen una densidad media. El hinchamiento en espesor (TS) después de 2 horas indica que esta propiedad depende del origen de la partícula y de su tamaño, siendo los tableros de 1-2 mm los más afectados en ambos casos. El TS después de 24 horas muestra la misma tendencia que después de 2 horas pero, en

este caso, los resultados de los tableros de partículas <0.25 y de 0.25-1 mm se incrementaron en relación con los de partículas de 1-2 mm.

Existe una correlación entre los resultados de TS y de absorción de agua (WA). Esto sucede probablemente debido a la porosidad de los paneles. A mayor tamaño de partícula mayor porosidad y menor densidad. Una vez sumergidos, estos huecos se llenan de agua más rápido que el resto del material, pero pasadas 24 horas, los huecos intersticiales también se saturan, haciendo que los resultados se aproximen.

En general, las propiedades físicas de los tableros dependen del material y del tamaño de partícula, siendo los paneles de tábala los que menores TS y WA sufren.

4.2.1.2. Propiedades mecánicas

Los resultados de los ensayos a resistencia a flexión (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y cohesión interna (IB) de los paneles se reflejan en las siguientes figuras.

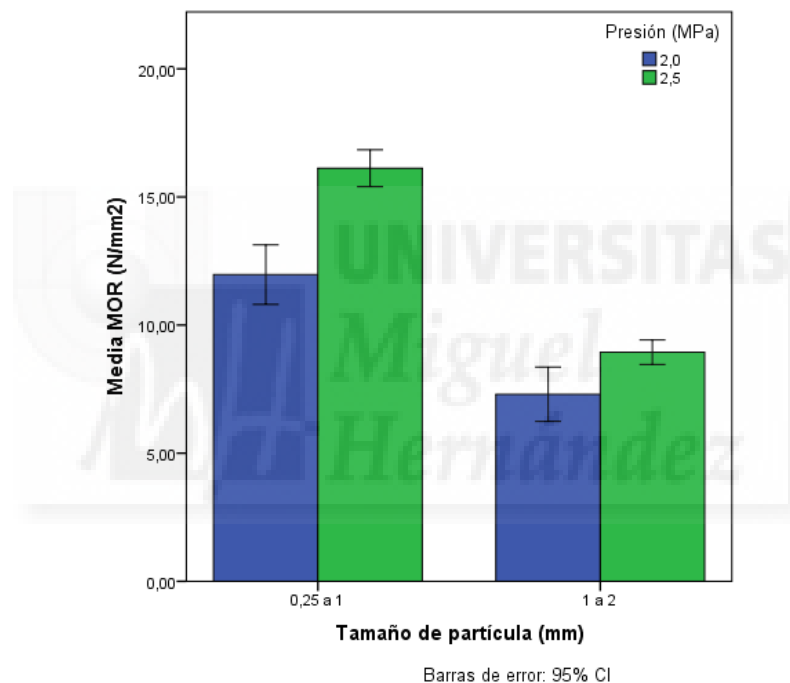


Figura 35. Resultados medios de MOR de los paneles de poda de viñedo

En los ensayos a MOR de los paneles de viñedo, los fabricados con el menor tamaño de partícula obtienen mucho mejor resultado que los otros. El panel tipo 1 tiene un MOR de 13.6 N/mm² y el tipo 2 de 16.4 N/mm². Sin embargo, con partículas más grandes, los valores de MOR están entre 8.0 y 9.3 N/mm². Como se observa, este parámetro está influenciado por el tamaño de partícula y la presión aplicada, obteniendo mejores resultados cuanto menor sea el tamaño de partícula y mayor la presión (panel tipo 2).

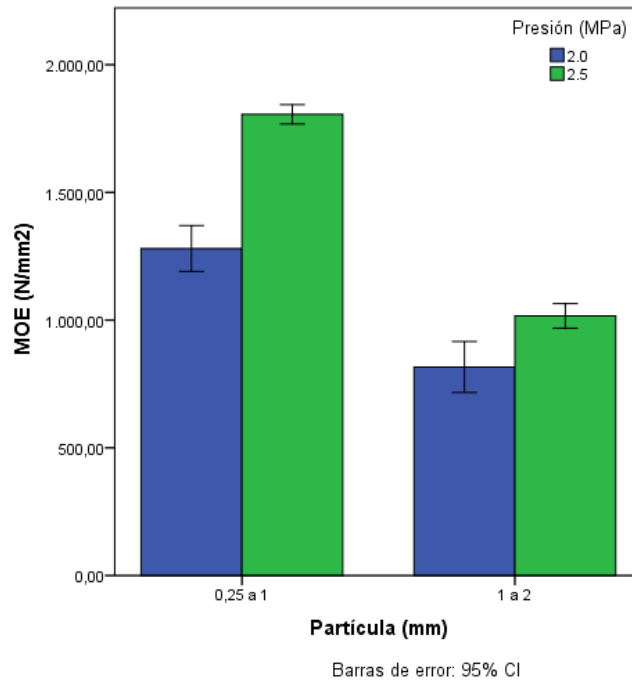


Figura 36. Resultados medios de MOE de los paneles de poda de viñedo

El máximo valor de MOE de los ensayos es 1808.79 N/mm² obtenido con el tablero tipo 2. Hay una correlación entre los resultados de MOE y MOR y, al igual que éste, a menos tamaño de partícula y mayor presión, mejor comportamiento del panel.

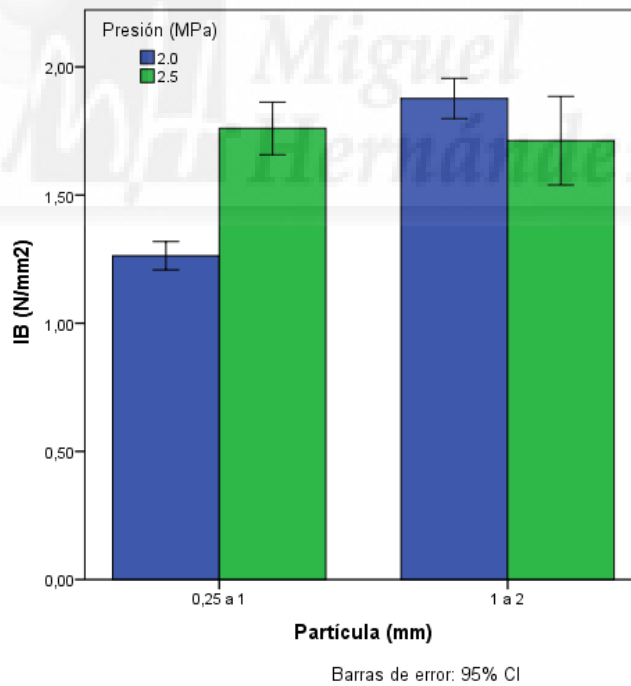


Figura 37. Resultados medios de IB de los paneles de poda de viñedo

En cuanto a IB, todos los tableros tienen unos valores muy altos con un intervalo de entre 1.36 a 1.90 N/mm². En este caso, los mejores resultados se obtienen con el tamaño de partícula mayor.

En general, los resultados en los ensayos mecánicos obtenidos por este estudio son mayores a los de la literatura científica actual.

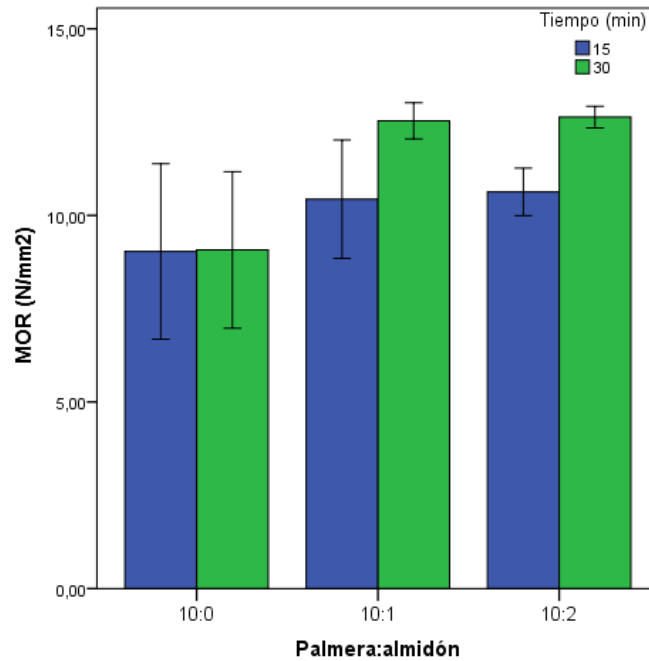


Figura 38. Resultados medios de MOR de los paneles de palmera canaria con almidón

Los valores de resistencia a flexión (MOR) de los paneles de palmera canaria con almidón varían entre 9.04 N/mm² de los paneles sin adhesivos y 15 minutos de prensado, a 13.03 N/mm² en los paneles con un 20% de almidón y 30 minutos. Mediante el análisis de los resultados se observa que el MOR depende de la cantidad de adhesivo y el tiempo. Sin embargo, un incremento del 10 al 20% en la proporción de almidón no tiene diferencias significativas.

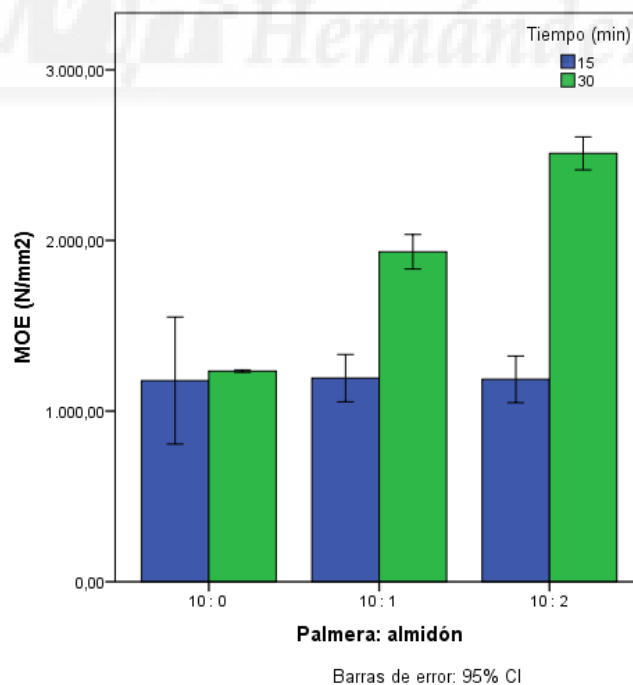


Figura 39. Resultados medios de MOE de los paneles de palmera canaria con almidón

Los resultados del módulo de elasticidad (MOE) de los paneles están entre 1178 y 2510 N/mm². Se puede concluir que no hay diferencias en cuanto a tiempo de prensado para las tres proporciones de almidón. En cambio, al aumentar los tiempos a 30 minutos, sí que hay variación. En este caso, a mayor contenido de adhesivo, mejor resultado de MOE se obtiene.

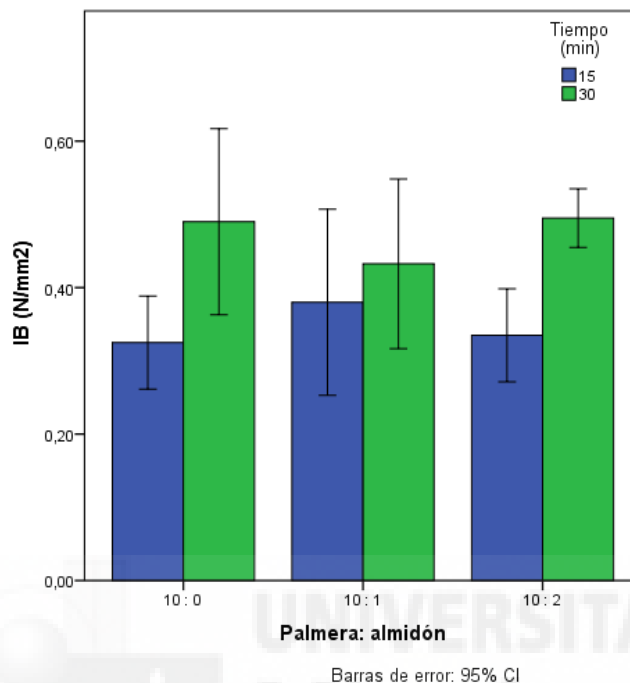


Figura 40. Resultados medios de IB de los paneles de palmera canaria con almidón

Los valores medios de cohesión interna o resistencia a tracción (IB) varían entre 0,33 y 0,50 N/mm², siendo el tiempo de prensado el parámetro con mayor influencia para esta propiedad. No se observan diferencias significativas según la cantidad de adhesivo utilizado. Los paneles sin adhesivos obtienen mayores valores de IB que los obtenidos en otras investigaciones sobre tableros sin adhesivos de otras especies de palmera (Hashim et al., 2011; Amirou et al., 2013; Saadaoui et al., 2013; Boon et al., 2013).

García-Ortuño et al., (2012) utilizando partículas de la base de la hoja de palmera canaria, fabricó tableros con mezcla de almidón con unos tiempos de prensado de 4 horas. Para ese estudio el almidón se pre-disolvió en un 20% de agua antes de mezclarlo con las partículas.

En este estudio se han obtenido valores similares, pero con tiempos de 30 minutos. En este caso se ha pulverizado un 10% de agua directamente sobre la superficie de la manta formada por partículas de palmera y almidón mezclado. Se puede concluir que mediante esta forma de adición del agua se obtiene una gran reducción de tiempo de prensado y por consiguiente, de ahorro energético.

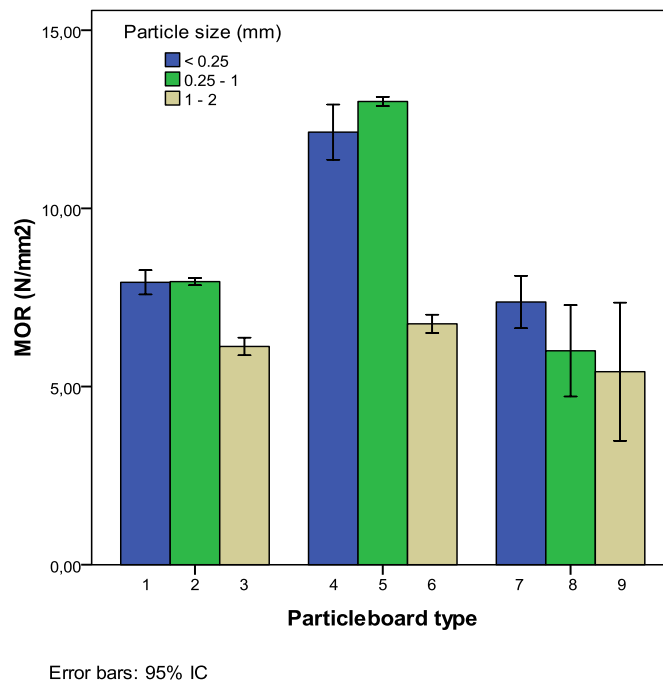


Figura 41. Resultados medios de MOR de los paneles de palmera canaria sin adhesivos

Los tableros producidos con partículas del tronco tuvieron mejores resultados de MOR. Este valor depende del origen de la partícula y de su tamaño, obteniendo peores resultados con mayor tamaño de partícula en todos los casos.

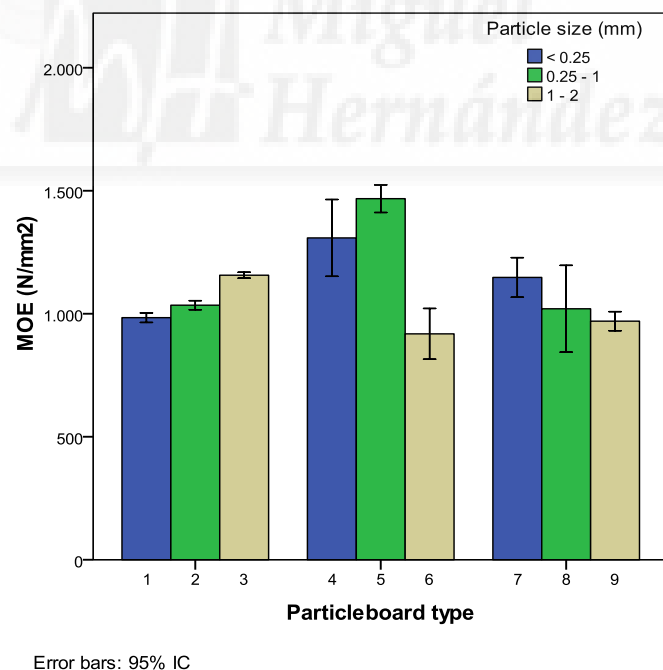
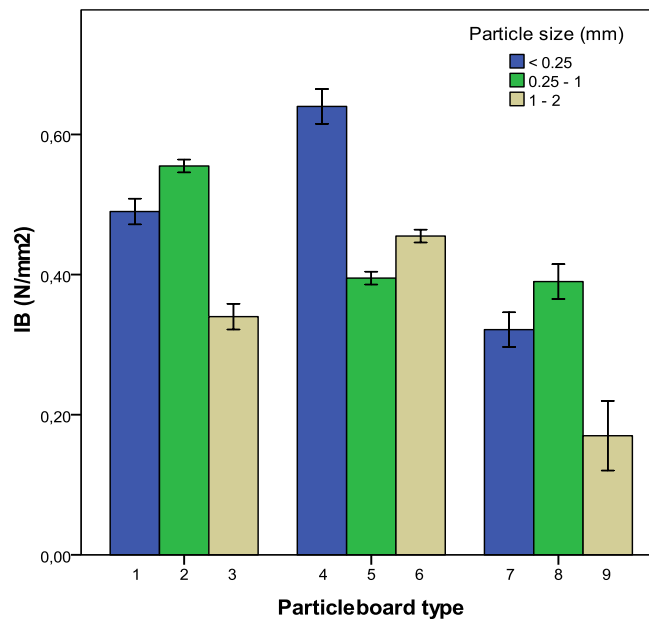


Figura 42. Resultados medios de MOE de los paneles de palmera canaria sin adhesivos

El MOE depende únicamente del origen de la partícula, llegando a un valor máximo de 1467.81 N/mm² (tipo 5) con partículas de 0.25-1 mm del tronco.



Error bars: 95% IC

Figura 43. Resultados medios de IB de los paneles de palmera canaria sin adhesivos

El IB varía de 0.17 a 0.64 N/mm². Éstos son buenos resultados ya que todos excepto uno excede el valor mínimo para ser considerado un tablero tipo P1 (EN 312, 2010) que es 0.28 N/mm². Esta propiedad depende del origen de la partícula. Los paneles fabricados con raquis tienen menores IB que el resto.

En general, los paneles fabricados con raquis poseen peores propiedades físicas y mecánicas, los de tábala tienen mejor comportamiento físico y los de tronco los mejores resultados mecánicos. El tamaño de la partícula tiene una importante influencia en las propiedades de los tableros.

4.2.1.3. Clasificación de los tableros experimentales

Como ya se ha comentado anteriormente, para poder clasificar los tableros para su aplicación en la construcción se debe seguir la norma EN 312 (2010). Los requisitos mínimos para un tablero tipo P1 (usos generales en interior) son un valor de MOR de 12.5 N/mm² y un valor de IB de 0.28 N/mm². Para un tablero tipo P2 (fabricación de mobiliario, pavimentos y techos), los requisitos son un MOR de 13.0 N/mm², un MOE de 1800 N/mm² y un IB de 0.40 N/mm².

Los paneles fabricados con partículas de poda del viñedo de tamaños de 0.25 a 1 mm cumplen los prerequisites para ser clasificados como tablero tipo P1 y P2. Estos paneles se podrían utilizar en construcción tanto para fabricación de muebles, como para pavimentos y techos interiores.

Los paneles de palmera canaria fabricados con un 10% - 20% de almidón y prensados durante 30 minutos cumplen también los requisitos y se podrían utilizar tanto P1 como P2.

En cuanto a los tableros sin adhesivos, el tipo fabricado con partículas de 0.25-1 mm de tronco de palmera canaria cumple los requisitos y por ello se podrían implementar en edificación para aplicaciones generales.

4.2.1.4. Resistencia a fuego

En relación a la inflamabilidad de los tableros, se ensayaron tres muestras de cada tipo de panel de poda de viñedo para ver su reacción ante el fuego. Los resultados de cada test están representados en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados del ensayo de inflamabilidad de los paneles de poda de viñedo

Tipo Tablero	Partícula (mm)	Presión (Mpa)	Pérdida de peso (%)	Propagación de llama (alto) (mm) (Fs)	Propagación de llama (ancho) (mm) (Fs)	Ignición tablero	Combustión	Ignición papel filtro	Producción humo
1	0.25-1	2.0	0.18 (0.04)	65.78 (2.58)	23.12 (0.44)	No	No	No	No
2	0.25-1	2.5	0.12 (0.05)	48.46 (3.14)	20.38 (0.67)	No	No	No	No
3	1-2	2.0	0.13 (0.01)	57.45 (1.74)	22.25 (0.19)	No	No	No	No
4	1-2	2.5	0.12 (0.01)	44.15 (3.87)	20.37 (0.35)	No	No	No	No

() Desviación estándar

En este ensayo se expone la superficie de los tableros a una llama durante 30 segundos con una duración del ensayo de 60 segundos. No se produjo ni ignición ni humo en ninguno de los test después de retirar la llama.

La superficie dañada es el resultado de la propagación de llama (Fs). En la Figura 44 se puede observar que el daño es meramente superficial y sin profundidad. Mediante el análisis estadístico de los resultados se puede concluir que no hay diferencias notorias entre los paneles. El valor máximo de Fs después de 60 segundos es de 65.78 mm y el mínimo de 44.15 mm. Los menores valores de Fs se obtienen con los tableros fabricados a mayor presión.



Figura 44. Muestras de paneles de poda de viñedo después del ensayo de inflamabilidad

La norma EN 13401-1 (2007) clasifica los tableros según su Fs, siendo un tipo B aquellos que cumplan $F_s \leq 150$ mm después de 60 segundos. Si paralelamente no se emiten

partículas ni rezuman líquidos, entonces se clasifican como tipo d0. Todos los tableros ensayados cumplen con estos requisitos, por lo que su clasificación sería Bd0.

Se deberían realizar más ensayos de reacción ante el fuego para averiguar si los paneles alcanzan clasificaciones más altas. Sin embargo, los tableros de partículas de madera suelen tener la clasificación Dd0, con lo que los paneles estudiados tienen mejores propiedades ante el fuego que los tradicionales. Esta característica puede ser debida a la cantidad de silicio presente en las podas del viñedo.

4.2.1.5. Paneles sin adhesivos

Varios autores han estudiado las propiedades de los tableros fabricados con otras especies de palmeras sin utilizar adhesivos. En las dos tablas siguientes, se muestran los resultados obtenidos en estas publicaciones.

Tabla 17. Parámetros de los procesos de fabricación de tableros de partículas de palmera sin adhesivos.

Autor	Material	Densidad (Kg/m ³)	Espesor (mm)	T° (°C)	Presión (MPa)	Tiempo (min)	Diámetro de partícula (mm)
Saadaoui et al. 2013	Palmera Datilera	1200	4	180	10	2	< 1.25mm
Hashim et al. 2011	Palmera de aceite	800	4,8	180	12	20	< 1mm
Este estudio	Palmera canaria	763.0, 838.5, 855.0	6,5	120	2.6	30	0.25-1 mm

Tabla 18. Valores de las propiedades obtenidas por los autores de la Tabla 17.

Autor	Material	Origen	TS 24h (%)	WA 24h (%)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)
Saadaoui et al. 2013	Palmera Datilera	Tábala	150	100	8.4	928	0.13
		Raquis	210	270	8.5	927	0.04
Hashim et al. 2011a	Palmera de aceite	Tronco (centro)	20	60	13.37		0.71
		hoja	40	98	11.52		0.2
		Raquis	75	130	2.0		0.01
Este estudio	Palmera canaria	Tábala	13.90	51.01	7.95	1034.80	0.56
		Tronco	27.56	74.79	13.00	1467.82	0.40
		Raquis	55.22	136,13	6.00	1020.22	0.39

Con palmera datilera, Saadaoui et al. (2013) fabricó tableros a altas temperaturas y presión, pero menos tiempos de prensado que en este estudio. En sus ensayos, los tableros tenían una alta densidad y TS, pero menores MOR, MOE e IB que los paneles de P. Canariensis, lo cual indica que la biomasa de palmera canaria es más apropiada para producir tableros sin adhesivos que la de palmera datilera.

Los resultados obtenidos por Hashim et al. (2011a) con palmera de aceite son similares a los de este estudio. Ellos concluyeron que el mecanismo de auto-unión podía ser debido a los azúcares, aunque utilizaron mayores temperaturas y presiones, mientras que el proceso de fabricación de paneles con palmera canaria tiene un menor consumo energético. De los paneles de palmera de aceite, los de partículas del tronco tienen los mejores comportamientos mecánicos y físicos, sin embargo, en la fabricación de estos tableros se ha eliminado la corteza mientras que en los de

palmera canaria sí que se ha incluido. Es posible que al no utilizar partículas de corteza, que es un tejido esponjoso y de menor resistencia, se pueda mejorar el comportamiento general de los paneles, aunque se han de llevar a cabo más ensayos.

En otro estudio, la adición de un 20% de sacarosa mejoró las propiedades de los paneles de palmera datilera (Lamaming et al. 2013). Aparentemente los azúcares juegan un rol importante en el mecanismo de auto-unión. Ya que la savia de la palmera canaria se compone de un 37.8% de sacarosa, la unión de las partículas podría ser debido a tal contenido en azúcares.

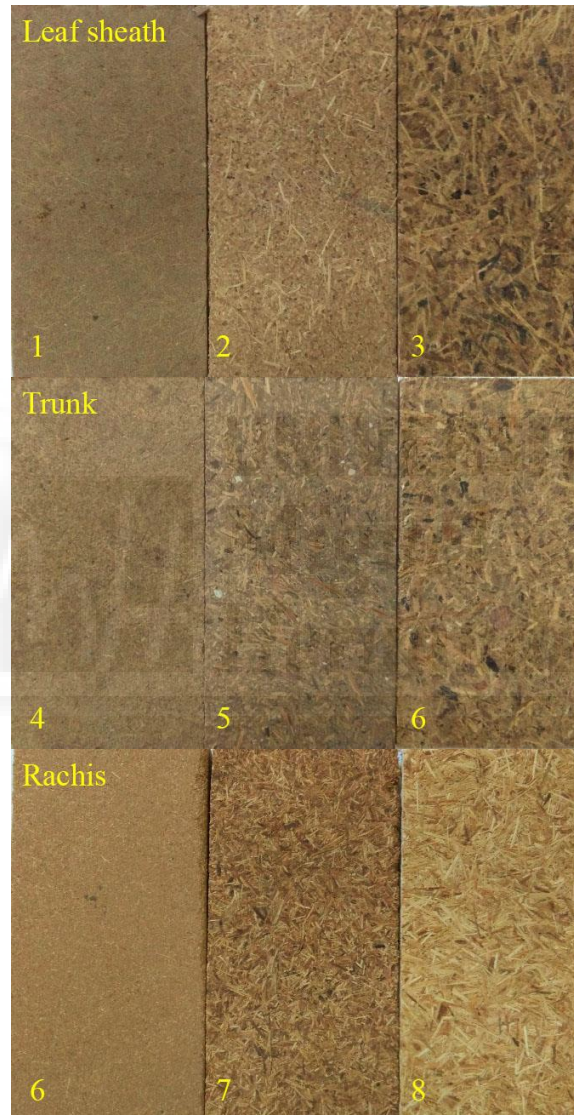


Figura 45. Tipos de tableros fabricados de palmera canaria sin adhesivos.

En la materia prima de la palmera canaria se pueden observar dos tipos de fibras: pequeñas partículas marrones del tejido parenquimático y fibrillas blancas, largas y esbeltas de los vasos vasculares. El comportamiento mecánico y físico parece estar influenciado por la cantidad de tejido parenquimático según Hashim et al. (2011a). Tal y como se puede ver en la Figura 45, los tableros de tábala y tronco son más oscuros que los paneles de raquis, lo que se podría explicar por una mayor presencia de fibras de vasos vasculares en estos dos tejidos de la palmera.

4.2.1.6. Observaciones SEM y análisis EDS

Las micrografías de la sección longitudinal de la tabala, tronco y raquis de la hoja de palmera canaria utilizada para la fabricación de paneles sin adhesivos se representan en las siguientes figuras. Se observan las características típicas de haces vasculares consistentes en las fibras, los vasos y floema incrustados en el tejido parenquimático. No se observa contenido de almidón. Se observan haces vasculares recubiertos con grandes cantidades de fitolitos silíceos alineados en el raquis y en el tronco.

Como ya se ha comentado en las fotos de los tableros, hay mayor cantidad de tejido parenquimático en la tábala. Igual que Mobarak et al. (1982) descubrió en bagazo, esta característica podría incrementar la capacidad de las partículas a comprimirse, lo que resultaría en una mayor unión y contribuyendo probablemente a sufrir menos TS en los tableros fabricados con tábala y más en los de raquis.

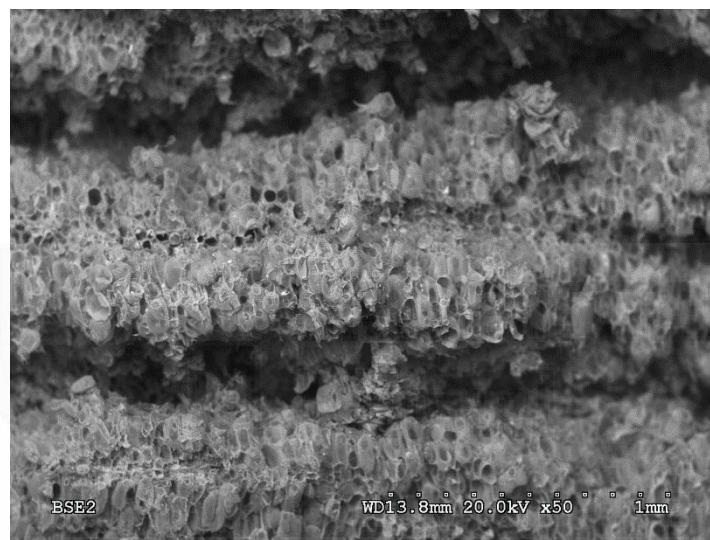


Figura 46. Micrografía de una sección longitudinal de tábala.

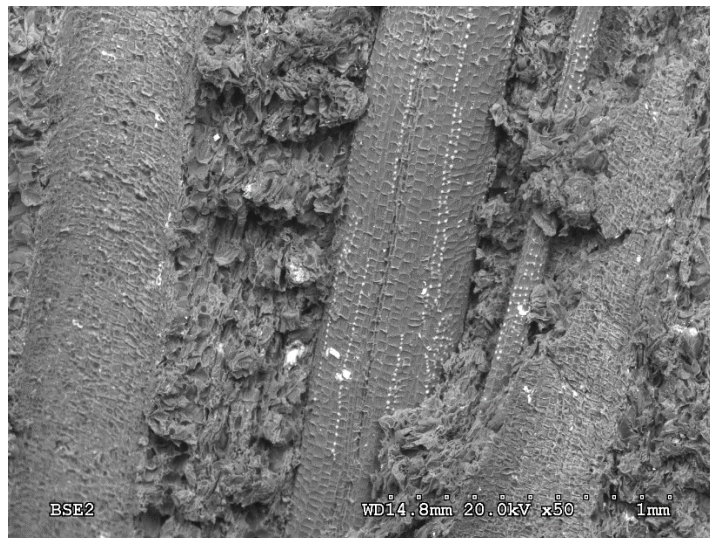


Figura 47. Micrografía de una sección longitudinal de tronco.

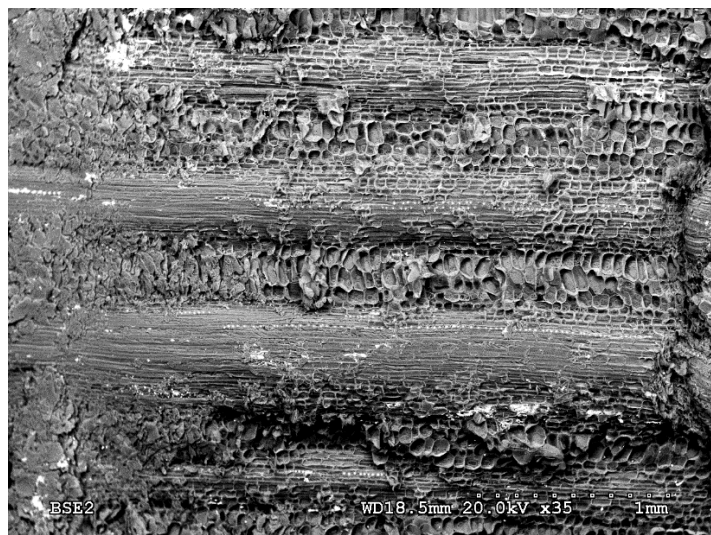


Figura 48. Micrografía de una sección longitudinal de raquis.

Los resultados del análisis EDS de la biomasa de palmera canaria se muestran en la Tabla 19. La principal diferencia entre la composición de los tejidos es que las muestras de tronco tienen la mitad de átomos de carbono que el resto, aunque más azufre, potasio y calcio. Es posible que estos elementos sean parte de óxidos ya que aparece el mismo contenido de oxígeno en el tronco que en el raquis y la tabala. Se halla aluminio y fósforo en las muestras de tabala, aunque en pequeñas cantidades, mientras que en el raquis hay más átomos de silicio y cloro que en el resto de las muestras de palmera canaria.

Existen investigaciones que informan que el silicio tiene influencia en la auto-uniión (Hashim et al. 2011b), sin embargo, en este estudio no se puede llevar a cabo esta afirmación. Halvarsson et al. (2009) mostró que al añadir CaCl_2 a partículas de paja de trigo, decrecía la WA de los tableros en un 25%. En la palmera canaria la presencia de calcio y cloro son mayores en la tabala y menores en el raquis, por lo que esta composición podría explicar los resultados de los ensayos de TS y WA de los paneles.

Tabla 19. Composición química EDS de diferentes partes de P. Canariensis.

Elemento	AN	Tábala		Tronco		Raquis	
		C norm.	C Atom. C	C norm.	C Atom. C	C norm.	C Atom. C
		[wt.%]	[at.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]	[at.%]
Carbono	6	51.56	60.17	22.56	32.51	49.14	57.84
Oxígeno	8	43.01	37.68	50.92	55.08	45.03	39.78
Magnesio	12	0.26	0.15			0.27	0.16
Silicio	14	0.14	0.07			0.70	0.35
Azufre	16	0.25	0.11	7.54	4.07	0.44	0.19
Cloro	17	1.11	0.44	0.50	0.24	1.94	0.78
Potasio	19	2.61	0.94	11.12	4.92	2.47	0.89
Aluminio	13	0.22	0.12				
Fósforo	15	0.21	0.10				
Calcio	20	0.59	0.21	7.35	3.17		

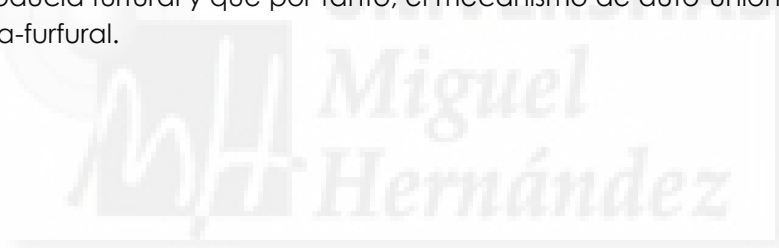
4.2.1.7. Análisis del mecanismo de auto-uniión

El esclarecimiento del mecanismo de auto-uniión de los paneles sin adhesivos se ha discutido en diversas revisiones científicas.

Una de las teorías más populares confiere la auto-uniión a la transición vítrea de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Anglès et al., (1999) concluyó que los valores de la degradación de estos biopolímeros son, en estado seco, 220°C, 179°C y 200°C respectivamente. Más tarde, Pitiaux et al., (2015) informó que este proceso depende extremadamente del contenido en humedad. De acuerdo con el autor, las temperaturas de transición vítrea decrecen según aumente la humedad. En esta investigación, los paneles se fabricaron a 120°C con un contenido total de 11% de humedad, por lo que es posible que parte de los carbohidratos llegaran a la temperatura de transición vítrea ayudando en la auto-uniión.

Otro mecanismo sugerido en la auto-uniión es la reacción de hidrólisis ácida de los glucósidos. Al someter a las partículas a presión y calor en un medio ácido y acuoso, parte de los azúcares pueden haberse transformado en furfural, que luego habría solidificado en una resina termoendurecible.

Peleteiro et al., (2016) mostraron que se puede obtener furfural de diferentes materiales lignocelulósicos a temperaturas como las empleadas en esta investigación. En otro estudio, Suzuki et al., (1998) afirmó que la explosión de vapor de partículas de palmera de aceite producía furfural y que por tanto, el mecanismo de auto-uniión fue debido al vínculo lignina-furfural.



5. CONCLUSIONES

En la primera parte de este trabajo se presenta un análisis de la eco-eficiencia de las diferentes alternativas de soluciones constructivas de particiones interiores usadas habitualmente en España. Se ha combinado la realización de un análisis económico con la aplicación de la metodología ACV, de la cuna a la tumba, para cada una de las particiones bajo estudio. Para ello, se ha elaborado un exhaustivo Inventario del Ciclo de Vida que incluye información tanto económica como relativa a los flujos de entrada y salida de materia y energía de las soluciones constructivas para cada etapa de su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación de las particiones interiores hasta su gestión como RCDs, al final de su vida útil.

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida identifican las variables clave del impacto ambiental de las soluciones constructivas para particiones interiores de la etapa de fabricación de sus materiales constituyentes. En general, el proceso de fabricación del panel de yeso y de la placa de escayola presenta un mayor impacto ambiental que la fabricación del cemento portland y el ladrillo cerámico debido a un mayor consumo de combustibles y electricidad. Por otro lado, la fabricación del bloque de hormigón celular, cuya contribución es ligeramente inferior a la del ladrillo cerámico para todas las categorías a excepción del calentamiento global, contribuye más al impacto que el de hormigón hueco convencional, también debido a un mayor consumo de combustibles y electricidad.

La fase de transporte y demolición no son determinantes en el impacto global de las alternativas de soluciones constructivas. Dichas etapas dependen únicamente del peso de los materiales a transportar y/o gestionar como RCDs y de la distancia entre las plantas, o bien entre las fábricas de materiales y la obra, y entre la obra y las plantas de tratamiento de RCDs. En el caso de la demolición, la recuperación de materiales tales como la estructura de acero galvanizado y la tornillería en las alternativas 1a y 1b y la producción de gravas en el caso de las fábricas (alternativas 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 4a y 4b), permiten atenuar la contribución al impacto, principalmente para la oxidación fotoquímica.

A pesar de que el peso de las alternativas 3a y 3b (sistema de bloque hueco de hormigón) hace que estas sean las más contribuyentes en todas las categorías de impacto en las etapas de transporte y demolición, la reducida aportación de la fabricación de dichos bloques las identifican como las alternativas con mejor comportamiento ambiental para categorías como la acidificación, oxidación fotoquímica o la deterioro de la capa de ozono.

Por otro lado, si a los resultados ambientales se les incorpora los resultados económicos a través del estudio de la eco-eficiencia se observa como las soluciones constructivas 1b (sistema autoportante de paneles de cartón-yeso con aislante de fibra de celulosa) y 2c (sistema de ladrillo cerámico hueco de gran formato) son las que mejor comportamiento ambiental y económico combinan, puesto que presentan una baja contribución al impacto para todas las categorías analizadas, con unos costes de fabricación, transporte, construcción, demolición y gestión como RCDs, al final de su vida útil, muy reducidos. Por lo tanto, estas alternativas son consideradas las opciones óptimas desde el punto de vista de la eco-eficiencia.

En la segunda parte del trabajo se presentan una serie de tableros para su inclusión como alternativa sostenible en los sistemas constructivos estudiados. Se han analizado sus características, propiedades y métodos de fabricación.

Los tableros producidos con residuos de poda del viñedo tienen unas propiedades mecánicas aceptables. Los fabricados con partículas de 0.25 a 1 mm obtienen unas propiedades mecánicas mejores que los que utilizan partículas más grandes. Todos los paneles son buenos materiales aislantes térmicos. Empleando una presión de 2.5 MPa en la prensa se consiguen mejores propiedades mecánicas que utilizando presiones más bajas. Algunos de los paneles obtienen la clasificación P2, con lo que se podrían utilizar en la fabricación de muebles, pavimentos y techos para interior. Los tableros reaccionan bien ante el fuego probablemente por el alto contenido en silicio de las ramas del viñedo.

En los tableros de biomasa de palmera, la adición de almidón tiene un fuerte impacto en las propiedades finales de los tableros, consiguiendo las mejores propiedades mecánicas cuando son prensados durante 30 minutos. La temperatura de 110°C parece ser insuficiente para cumplir con los requisitos mínimos para MOR en los paneles sin adhesivo y el tiempo de 15 minutos de prensado para los que se le ha añadido almidón. Con un 20% de adhesivo y 30 minutos de tiempo en la prensa, los tableros fabricados pueden ser clasificados como tipo P2 y se podrían utilizar en la fabricación de muebles, pavimentos y techos.

Cambiando los parámetros de fabricación, es factible producir tableros sin adhesivos de palmera canaria a baja temperatura (120°C) y presión (2.6 MPa) con buenas propiedades mecánicas. Los tableros de partículas de 0.25 a 1 mm de tronco obtienen los mejores resultados mecánicos y cumplen los requisitos para ser un tablero tipo P1 (EN 312, 2010). Tanto el origen como el tamaño de la partícula tienen un efecto muy importante sobre las propiedades de los tableros. El mecanismo de auto- unión puede ser debido a la alta concentración de azúcares. Aparentemente a la temperatura de prensado de 120°C, algunos de los azúcares contenidos en la palmera canaria pueden haberse transformado en furfural, colaborando en la unión.

La valorización de estos materiales de desecho en la fabricación de productos de larga vida útil, como son los tableros, puede ser beneficioso para el medio ambiente, ya que es un método de fijación de carbono y, por tanto, ayudar en la disminución del CO₂ atmosférico.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anglès, MN., Reguant, J., Montané, D., Ferrando, F., Salvadó, J. 1999. Binderless composites from pretreated residual softwood. *Journal of Applied Polymer Science*, 73, 2485–91.

AFNOR-French Standardization Agency. 2004. Environmental Quality of Construction Products-environmental and Health Declaration of Construction Products, France.

Amirou, S., Zerizer, A., Pizzi, A., Haddadou, I., Zhou, X. 2013. Particleboards production from date palm biomass. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(6), 717-723.

Arena, A., Basso, M., Fernández, J. 2006. Análisis comparativo del ciclo de vida de envolventes livianas prefabricadas y pesadas de mampostería para viviendas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Volumen 10. Asades. Argentina.

Asdrubali, F., Baldassarria, C., Fthenakis, V. 2013. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64, 73–89.

Asif, M., Muneer, T., Kelley, R. 2007. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, 42 (3), 1391-1394.

Audenaert, A., De Cleyn, S., Buyle, M. 2012. LCA of low-energy flats using the Eco-indicator'99 method: Impact of insulation materials. *Energy and Buildings*, 47, 68-73.

Bare, J. 2002. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI); United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.

Blom, I., Itard, L., Meijer, A. 2010. LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. *Building and Environment*, 45(11), 2362-2372.

Boon, J.G., Hashim, R., Sulaiman, O., Hizioglu, S., Sugimoto, T., Sato, M. 2013. Influence of processing parameters on some properties of oil palm trunk binderless particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71, 583–589.

Bozorg Chenani, S., Lehvävirta, S., Häkkinen, T., 2015. Life cycle assessment of layers of green roofs. *J. Clean. Prod.* 90, 153-162.

Broun, R., Menzies, G. 2011. Life cycle energy and environmental analysis of partition Wall systems in the UK. *Procedia Engineering*, 21, 864-873.

BUWAL 250. 1996. BUWAL 250 Database. Swiss Federal Environmental Protection Agency, Bern, Switzerland.

Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A. 2013. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379-388.

- Carreras, J., Boer, D., Guillén-Gosálbez, G., Cabeza, L.F., Medrano, M., Jiménez, L. 2015. Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental. *Energy and Buildings*, 88, 335-346.
- Cellura, M., Longo, S., Mistretta, M. 2011. Sensitivity analysis to quantify uncertainty in Life Cycle Assessment: The case study of an Italian tile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4697-4705.
- Chou, J.-S., Yeh, K. 2015. Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. *J. Clean. Prod.*, 101, 137-147.
- Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D. 2014. Life cycle impact assessment of masonry system as inner walls: a case study in Brazil. *Constr. Build. Mater.* 70, 141-147.
- CPR 305, 2011 Regulation (EU) Number 305/2011 (Construction Products Regulation - CPR) European Parliament and the Council of the European Union 9. March <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:EN:PDF>
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A. 2012. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. *Building and Environment*, 54, 86-99.
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A. 2013. Life cycle cost analysis of the UK housing stock. *International Journal of Life Cycle Assessment*. DOI 10.1007/s11367-013-0610-4.
- De Meester, B., Dewulf, J., Verbeke, S., Janssens, A., Van Langenhove, H. 2009. Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment. *Building and Environment*, 44, 11-17.
- Densley Tingley, D., Hathaway, A., Davison, B. 2015. An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Building and Environment*, 85, 182-189.
- Dewulf, J., Van der Vorst, G., Versele, N., Janssens, A., Van Langenhove, H. 2009. Quantification of the impact of the end-of-life scenario on the overall resource consumption for a dwelling house. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 231-236.
- Dodoo, A., Gustavsson, L., Sathre, R. 2010. Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1152-1160.
- Doka, G. 2007. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Douzals, J. P., Marechal, P. A., Coquille, J. C., Gervais, P. 1996. Microscopic study of starch gelatinization under high hydrostatic pressure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(6), 1403-1408.
- Dylewski, R., Adamczyk, J. 2014. The comparison of thermal insulation types of plaster with cement. *Journal of Cleaner Production*, 83, 256-262.
- Ecoinvent v2. 2007. Life Cycle Inventory of Building Products. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Report número 7. Switzerland.

EN 15804:2012+a1. 2013. Sustainability of Construction Works. Environmental Product Declarations. Core Rules for the Product Category of Construction Products.

EN 310. 1993. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN 312. 2010. Particleboards. Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN 317. 1993. Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EN 319. Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.

EN 323. 1993. Wood-based panels. Determination of density. Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN 326-1. 1994. Wood-based panels. Sampling, cutting and inspection. Part 1: sampling and cutting of test pieces and expression of test results. Confirmed in 2014.

EN 12667. 2001. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN 13501-1:2007+A1. 2007. Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN ISO 11925-2. 2010. Reaction to fire tests - Ignitability of products subjected to direct impingement of flame - Part 2: Single-flame source test. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

European Union. 2011. JRC-IES. ILCD Handbook. International Reference Life Cycle Data System, Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context-based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors. Publication Office of the European union, Luxemburg.

Feng, H., Hewage, K. 2014. Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance. *Journal of Cleaner Production*, 69, 91-99.

Ferrández-García, C. E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M. T., Ferrández-Villena, M., García-Ortuño, T. 2012. Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. *BioResources*, 7(4), 5904-5916.

Franklin Associates, 1998. Franklin USA LCI Database Documentation, Prairie Village, KS, USA.

Frischknecht, R., Steiner, R., Jungbluth, N., 2009. The ecological scarcity method - Eco-factors 2006, p. 188. Bern: Federal Office for the Environment - Environmental Studies

García-Ortuño, T., Ferrández-García, M. T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández García, C. E., Ferrández-Villena, M. (2012). Valorization of pruning residues: the use of Phoenix canariensis to elaborate eco-friendly particleboards. In Structures and Environmental Technologies. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012. CIGR-EurAgEng.

García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M.T., Ferrández-García, C.E., Perez-Murcia, M.D., Moreno-Caselles J. 2013. Evaluation of the Different Uses of Washingtonia robusta Pruning Waste," Communications in soil science and plant analysis, 44 (1-4) 623-631.

Goedkoop, M. 1995. The Eco-Indicator'95. Final Report. PreConsultants, The Netherlands.

Goedkoop, M., Spriensma, R. 2000. The eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle assessment. Methodology Report, PreConsultants, The Netherlands.

González-Barragán, I., López Torres, D., Alonso, M.A., Arias, M. 2007. Aprovechamiento energético de sarmientos en calderas de biomasa mediante peletizado. Agricultura. Noviembre 07, 806-811.

González-García, S., Lozanol, R.G., Estévez, J.C., Pascual, R.C., Moreira, M.T., Gabarrell, X., Pons, J.R., Feijoo, G. 2012. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. International Journal of Life Cycle Assessment, 17 (4), 432-44.

Greenhouse Gas Protocol. 2011. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.

Guinee, J. Handbook on Life Cycle Assessment. An Operational Guide to the ISO standards, Kluwer Academic Publishers. 2002.

Halvarsson, S., Edlund, H., and Norgren, M. 2009. Manufacture of non-resin wheat straw fibreboards. Industrial crops and products, 29(2), 437-445.

Han, B., Wang, R., Yao, L., Liu, H., Wang, Z. 2015. Life cycle assessment of ceramic façade material and its comparative analysis with three other common façade materials. Journal of Cleaner Production, 99, 86-93.

Hasan, A., Vuolle, M., Sirén, K. 2008. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. Building and Environment, 43(12), 2022 – 2034.

Hashim, R., Said, N., Lamaming, J., Baskaran, M., Sulaiman, O., Sato, M., Hiziroglu, S., Sugimoto, T. 2011. Influence of press temperature on the properties of binderless particleboard made from oil palm trunk. Materials and Desing, 32(5), 2520-2525.

Hashim, R., Wan Nadhari, WNA., Sulaiman, O., Kawamura, F., Hiziroglu, S., Sato, M., Sugimoto, T., Seng, TG., Tanaka, R. 2011. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. Materials and Desing, 32(1), 246-252.

- Hauschild, M., Potting, J. 2005. The EDIP 2003 Methodology. Environmental News No. 80, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark.
- Hegazy, S.S., Aref, I.M. 2010. Suitability of Some Fast-Growing Trees and Date Palm Fronds Particleboard productions. *Forest products journal*, 60(7), 599-604.
- Hegazy, S., Ahmed, K., Hiziroglu, S. 2014. Oriented strand board production from water-treated date palm fronds. *BioResources*, 10(1), 448-456.
- Henao, E. M., Quintana, G. C., Ogunsile, B. O. 2014. Development of binderless fiberboards from steam-exploded and oxidized oil palm wastes. *BioResources*, 9(2), 2922-2936.
- Hidayat, H., Keijsers, E., Prijanto, U., Van Dam, J., Heeres, H. 2014. Preparation and properties of binderless boards from *Jatropha curcas* L. seed cake. *Industrial crops and products*, 52, 245-254.
- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H.J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R. 2010. Implementation of life cycle impact assessment methods. *Ecoinvent report no. 3, v2.2*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Hoxha, E., Habert, G., Chevalier, J., Bazzana, M., Le Roy, R. 2014. Method to analyse the contribution of material's sensitivity in buildings' environmental impact. *Journal of cleaner production*, 66, 54-64.
- Huberman, N., Pearlmutter, D. 2008. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40 (5), 837-848.
- Huijbregts, M.A.J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hungerbühler, K., Hendriks, A.J., 2008. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecol. Econ.* 64, 798-807.
- Humbert, S., De Schryver, A., Margni, M., Jolliet, O. 2012. *IMPACT2002: User Guide Draft for Version Q2.21 (Version Adapted by Quantis)*. Quantis, Lausanne, Switzerland.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D., Azapagic, A. 2013. Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 162-176.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D., Simó, A. 2011. Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 916-928
- IDEMAT database. 2001. Faculty of Industrial Design Engineering of Delft University of Technology, The Netherlands
- INIES. 2009. Database. <http://www.inies.fr/> (accessed 13.03.13.).
- Gabi PE International, 2010. Gabi V4.3, Germany. www.gabi-software.com (accessed 13.03.14.).
- Ioannidou, D., Zerbi, S., Habert, G. 2014. When more is better – comparative LCA of Wall systems with Stone. *Building and Environment*, 82, 628-639.

Ip, K., Miller, A. 2012. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1-9.

IPCC 2007. Technical Paper on 4AR, IPCC, Geneva, Switzerland.

Iribarren, D., Marvuglia, A., Hild, P., Guiton, M., Popovici, E., Benetto, E. 2014. Life cycle assessment and data envelopment analysis approach for the selection of building components according to their environmental impact efficiency: a case study for external walls. *Journal of cleaner production*, 87, 707-716.

Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Ahmed, L., Haque, N. 2014. Life cycle assessment and life cycle cost implications of wall assemblages designs. *Energy and Buildings*, 84, 33-45.

ISO 14025. 2006. Environmental labels and declarations. Type III environmental declarations. Principles and procedures.

ISO 14040. 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. European Committee for Standardization (CEN)

ISO 14044. 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. European Committee for Standardization (CEN).

ITEC. 2009. BEDEC PR/PCT ITEC Materials Database. Catalan Institute for Construction Technology. <[http://www.itec.es/nouBedec.e/presentacio bedec.aspx](http://www.itec.es/nouBedec.e/presentacio%20bedec.aspx)>

Jeon, J., Lee, J.H., Seo, J., Jeong, S.G., Kim, S. 2013. Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 111 (1), 279-288.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. 2003. IMPACT 2002: a new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324-30.

Jumhuri, N., Hashim, R., Sulaiman, O., Noor Aidawati, W., Salleh, K.M., Saharudin, N.I., Razali, M.Z. 2014. Effect of treated particles on the properties of particleboard made from oil palm trunk. *Materials and Design*, 64, 769-774.

Kellenberger, D., Althaus, H.J. 2009. Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, 44, 818-25.

Keoleian, G.A., Blanchard, S., Reppe, P. 2000. Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house. *Journal of Industrial Ecology*, 4 (2), 135–156.

Kim, K.H. 2011. A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system. *Energy and Buildings*, 43 (12), 3436-3445.

Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, H.J. 2013. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (5), 909-918.

Koroneos, C., Dompros, A. 2007. Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*, 42, 2114–2123.

Koroneos, C., Tsarouhis, M. 2012. Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment. *Journal of Cleaner Production*, 32, 52-60

Laemsak, N., Okuma, M. 2000. Development of boards made from oil palm frond II: properties of binderless boards from steam-exploded fibers of oil palm frond. *Journal of Wood Science*, 46(4), 322-326.

Lammaming, J., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Hashim, R., Said, N., Sato, M. (2013). Influence of chemical components of oil palm on properties of binderless particleboard. *BioResources*, 8(3), 3358-3371.

Luis, G., Rubio, C., Gutiérrez, A. J., Hernández, C., González-Weller, D., Revert, C., Hardisson, A. 2012. Miel de palma: composición nutricional de un edulcorante natural. *Nutrición Hospitalaria*, 27(2), 548-552.

Martínez-Alonso, C., Berdasco, L. 2015. Carbon footprint of sawn timber products of *Castanea sativa* Mill. in the north of Spain. *Journal of Cleaner Production*, 102, 127-135.

Materials Engineering Directorate. 2010. Annual reports. Ministry of Works, Bahrain.

Mateus, R., Neiva, S., Bragança, L., Mendonça, P., Macieira, M., 2013. Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls - Comparison with conventional technologies. *Building and Environment*, 67, 147-159.

Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., Dotelli, G. 2014. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, 80, 179-186.

Menoufi, K., Castell, A., Farid, M.M., Boer, D., Cabeza, L.F. 2013. Life Cycle Assessment of experimental cubicles including PCM manufactured from natural resources (esters): A theoretical study. *Renewable Energy*, 51, 398-403.

Mercante, I., Bovea, D., Ibáñez, V., Arena, P. 2011. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 232-241.

Ministerio de Fomento. Real Decreto 314/2006 y 1371/2007. Documentos Básicos del Código Técnico de la edificación.

Mobarak, F., Fahmy, Y., Agustin, H. 1982. Binderless lignocellulose composite from bagasse and mechanism of self-bonding. *Holzforschung*, 36, 131-135.

Monteiro, H., Freire, F. 2012. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy and Buildings*, 47, 572-583.

Moore, T., Morrissey, J. 2013. Life cycle costing sensitivities for zero energy housing in Melbourne, Australia. *Energy and Buildings*, 79, 1-11.

Nachhaltigesbauende, 2014. Berlin: Informations portal Nachhaltiges Bauen des BMUB; c2014.

- Nadhari, W. N. A. W., Hashim, R., Sulaiman, O., Sato, M., Sugimoto, T., Selamat, M. E. 2013. Utilization of oil palm trunk waste for manufacturing of binderless particleboard: optimization study. *BioResources*, 8(2), 1675-1696.
- Nemli, G., Kalaycioglu, H., Alp, T. 2001. Suitability of date palm (*Phoenix dactylifera*) branches for particleboard production. *HolzRoh- Werkst*, 6, 411–412.
- NIST, 2007. National Institute of Standards and Technology (NIST), 2007. BEES V4. <http://www.bfrl.nist.gov/oa/software/bees/>.
- Ortiz, O., Bonnet, C., Bruno, J.C., Castells, F. 2009. Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain. *Building and Environment*, 44, 584-594.
- Ortiz, O., Pasqualino, J.C., Díez, G., Castells, F. 2010. The environmental impact of the construction phase: an application to composite walls from a life cycle perspective. *Resources, conservation and recycling*, 54, 832-840.
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R. 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43 (12), 3419-3429.
-  zen, E., G ktas, O., Kasal, A., Efe, H., Demirci, S. 2014. Bending moment capacity of I-type furniture corner joints constructed of particleboard produced from vine pruning residues. *Wood Research*, 59(2), 313-322.
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W. 2014. Materials composition or energy characteristic - What is more important in environmental life cycle of buildings? *Building and Environment*, 72, 15-27.
- Pargana, N., Pinheiro, M.D., Silvestre, J.D., De Brito, J., 2014. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy Build.* 82, 466-481.
- Peleteiro, S., Rivas, S., Alonso, J. L., Santos, V., Paraj , J. C. 2016. Furfural production using ionic liquids: A review. *Bioresource technology*, 202, 181-191.
- Pintiaux, T., Viet, D., Vandenbossche, V., Rigal, L., Rouilly, A. 2015. Binderless Materials Obtained by Thermo-Compressive Processing of Lignocellulosic Fibers: A Comprehensive Review. *BioResources*, 10 (1), 1915-1963.
- Porhinak, M., Eřtokov, A. 2013. Comparative analysis of environmental performance of building materials towards sustainable construction. *Chemical Engineering Transactions*, 35, 1291-1296.
- Pr  Consultants. 2008. The Australian Impact Assessment Method v1.00 included in SimaPro v7.1.8 Software. PR  Consultants, B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- Pr  Consultants. 2011. SimaPro v7.3.2. PR  Consultants, B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- Pr  Consultants. 2014. ReCiPe 2009-Version 1.11 (December 2014). PR  Consultants, B.V., Amersfoort, The Netherlands.

- Pretot, S., Collet, F., Garnier, C. 2014. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating. *Building and Environment*, 72, 223-231.
- Radhi, H., Sharples, S. 2013. Global warming implications of facade parameters: A life cycle assessment of residential buildings in Bahrain. *Environmental Impact Assessment Review*, 38, 99-108.
- Rasat, M. S. M., Wahab, R., Sulaiman, O., Moktar, J., Mohamed, A., Tabet, T. A., Khalid, I. 2011. Properties of composite boards from oil palm frond agricultural waste. *BioResources*, 6(4), 4389-4403.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) (BOE de 28/3/2006).
- REE. 2012. Informe anual 2011. Red Eléctrica Española.
- Reza, B., Sadiq, R., Hewage, K. 2011. Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 25 (4), 2053-2066.
- Rincón, L., Castell, A., Pérez, G., Solé, C., Boer, D., Cabeza, L.F. 2013. Evaluation of the environmental impact of experimental buildings with different constructive systems using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 109, 544-552.
- Rincón, L., Coma, J., Pérez, G., Castell, A., Boer, D., Cabeza, L.F. 2014. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive Green roofs. A comparative life cycle assessment. *Building and Environment*, 74, 22-30.
- Rydh, C.J., Sun, M. 2005. Life cycle inventory data for materials grouped according to environmental and material properties. *Journal of Cleaner Production*, 13, 1258-1268.
- Saadaoui, N., Rouilly, A., Fares, K., Rigal, L. 2013. Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof. *Materials & Design*, 50, 302-308.
- Samani, P., Mendes, A., Leal, V., Guedes, J. M., Correia, N. 2015. A sustainability assessment of advanced materials for novel housing solutions. *Building and Environment*, 92, 182-191.
- Selamat, M. E., Sulaiman, O., Hashim, R., Hiziroglu, S., Nadhari, W. N. A. W., Sulaiman, N. S., Razali, M. Z. 2014. Measurement of some particleboard properties bonded with modified carboxymethyl starch of oil palm trunk. *Measurement*, 53, 251-259.
- Sharma, A., Shree, V., Nautiyal, H. 2012. Life cycle environmental assessment of an educational building in Northern India: a case study. *Sustainable Cities and Society*, 4, 22-28.
- Sho, N., Kenji, U., Shuichi, K. 2013. Characterization of bagasse binderless particleboard manufactured in high-temperature range. *Journal of Wood Science*, 59 (1), 50-56.

- Souza, D.M.D., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Bengoa, Z., Chappert, B., Duarte, F., Lima, L. 2015. Comparative life cycle assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. *Journal of Cleaner Production*, 89, 165-173.
- Stazi, F., Mastrucci, A., Munafò, P. 2012. Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: An application on solar wall systems. *Building and Environment*, 58, 278-288.
- Steen, B. 1999a. A systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). Version 2000. General Systems Characteristics. CPM report 1999:4, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia. 1999.
- Steen, B. 1999b. A systematic Approach to Environmental Strategies in Product Development (EPS). Version 2000. Models and Data of the Default Methods. CPM report 1999:5, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia. 1999.
- Suhaily, S., Jawaid, M., Khalil, H. A., Mohamed, A. R., Ibrahim, F. 2012. A review of oil palm biocomposites for furniture design and applications: potential and challenges. *BioResources*, 7(3), 4400-4423.
- Suzuki, S., Shintani, H., Park, S. Y., Saito, K., Laemsak, N., Okuma, M., Iiyama, K. 1998. Preparation of binderless boards from steam exploded pulps of oil palm (*Elaeis guineensis* Jaxq.) fronds and structural characteristics of lignin and wall polysaccharides in steam exploded pulps to be discussed for self-bindings. *Holzforschung*, 52(4), 417-426.
- Taborianski, V.M., Prado, R.T.A. 2012. Methodology of CO₂ emission evaluation in the life cycle of office building façades. *Environmental Impact Assessment Review*, 33 (1), 41-47.
- Tajuddin, M., Ahmad, Z., Ismail, H. 2016. A Review of Natural Fibers and Processing Operations for the Production of Binderless Boards. *BioResources*, 11 (2), 5600-5617.
- Takano, A., Hughes, M., Winter, S. 2014. A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, 82, 526-535.
- Takano, A., Pal, S.K., Kuitinen, M., Alanne, K., Hughes, M., Winter, S. 2015. The effect of material selection on life cycle energy balance: a case study on a hypothetical building model in Finland. *Building and Environment*, 89, 192-202.
- Thiel, C.L., Champion, N., Landis, A.E., Jones, A.K., Schaefer, L.A., Bilec, M.M. 2013. A materials life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies*, 6 (2), 1125-1141.
- Varun, Sharma, A., Shree, V., Nautiyal, H., 2012. Life cycle environmental assessment of an educational building in Northern India: a case study. *Sustain. Cities Soc.* 4 (1), 22-28.
- Verbeeck, G., Hens, H. 2010. Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis. *Building and Environment*, 45 (4), 964-967.

WBCSD. 2000a. Eco-Efficiency: Creating more value with less impact. World Business Council for Sustainable Development. ISBN 2-94-024017-5

WBCSD. 2000b. Measuring Eco-Efficiency: a guide to reporting company performance. World Business Council for Sustainable Development. ISBN 2-940240-14-0.

Widyorini, R., Xu, J., Umemura, K., Kawai, S. 2005. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse I: effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. *Journal of Wood Science*, 51 (6), 648.

Wuppertal Institute. 2003. Material intensity of materials, fuels, transport and services. Version 2.

Yasar, S., Guntekin, E., Cengiz, M., Tanriverdi, H. 2010. The correlation of chemical characteristics and UF-Resin ratios to physical and mechanical properties of particleboard manufactured from vine prunings. *Scientific Research and Essays*, 5(8), 737-741.

Yeniocak, M., Goktas, O., Erdil, Y. Z., Ozen, E., Alma, M. H. 2014. Investigating the use of vine pruning stalks (*Vitis vinifera* L. cv. Sultani) as raw material for particleboard manufacturing. *Wood Research*, 59(1), 167-176.

Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., Scarpellini, S. 2009. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44 (12), 2510-2520.

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A. 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140.

Zhang, D., Zhang, A., Xue, L. 2015. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism. *Wood Science and Technology*, 49(4), 661-679.



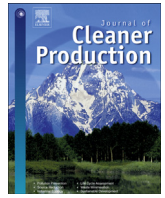
PUBLICACIONES

A continuación se muestran todas las publicaciones que se han empleado para la elaboración de esta Tesis.





**Publicación 1: ANÁLISIS DE ECO-
EFICIENCIA Y DE CICLO DE VIDA DE
PARTICIONES INTERIORES:
COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES
SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS**



Eco-efficiency analysis of the life cycle of interior partition walls: a comparison of alternative solutions



Antonio Ferrández-García, Valeria Ibáñez-Forés, María D. Bovea*

Department of Mechanical Engineering & Construction, Universitat Jaume I, Av. Sos Baynat s/n, 12071 Castellón, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 April 2015

Received in revised form

21 July 2015

Accepted 25 July 2015

Available online 1 August 2015

Keywords:

Interior partition wall

Life cycle assessment

Life cycle cost

Environmental performance

Economic performance

Eco-efficiency analysis

ABSTRACT

This paper presents an eco-efficiency analysis of the entire life cycle of 10 alternative solutions that can be used for interior partition walls that are variants on five building solutions commonly used in Spain (gypsum plasterboard system, hollow clay brick system, hollow concrete block system, autoclaved aerated concrete block system and gypsum block system). The full life cycle was considered for each of these interior partition wall solutions, which includes raw materials acquisition, transportation to the construction site, on-site installation and demolition and waste management at their end-of-life. For the environmental analysis, standard EN 15804, which provides product category rules for developing environmental declaration of construction elements based on the Life Cycle Assessment methodology, was applied. Main contributions for this application were the development of a comprehensive life cycle inventory adapted to the case study and the sensitivity analysis conducted for evaluating the influence of the characterisation factors in the environmental impact indicators. For the economic analysis, the costs of the life cycle of each solution were obtained. Finally, with the aim of selecting the alternatives with the best behaviour from both perspectives, an eco-efficiency study was conducted, the results of which showed that the gypsum plasterboard system and hollow concrete block system are the ones that combine the best environmental and economic performance. This is mainly due to the fact that they combine the lowest contribution to the impact for all the categories that were analysed, with lower life cycle costs.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The Construction Product Regulations (CPR 305, 2011) established, among other things, the need to develop environmentally-friendly construction products and to assess their environmental impact using the Environmental Product Declaration (ISO 14025, 2006), when available. To do so, the standard EN 15804:2012+A1 (2013) provides the core rules (Product Category Rules, PCR) for the development of Environmental Product Declarations (EPD) for building products and materials in a harmonised way. Moreover, this standard provides a consistent method to supply environmental information on building products that can then be combined with data for other products to evaluate the whole buildings. The application of the Life Cycle Assessment (LCA) (ISO 14040-44, 2006) methodology is recommendable when environmental

information is obtained, since it is the tool that is widely recognised internationally for evaluating the environmental performance of systems. Despite having some limitations, the LCA technique is still a powerful science-based tool for evaluating environmental impacts in the construction sector (Buyle et al., 2013).

Today, studies that apply the LCA methodology to analyse the environmental impact in the construction sector are mainly focused on analysing the energy performance of building solutions for the envelope of the building (Iribarren et al., 2015). The reason for this is that it is the outermost part and therefore has the greatest influence on the energy consumption of the building (Arena et al., 2006; Monteiro and Freire, 2012; Ottelé et al., 2011; Radhi and Sharples, 2013; Stazi et al., 2012; Taborianski and Prado, 2012; Zabalza Bribián et al., 2009) and on the alternative thermal energy systems for heating and cooling during the stage in which the building is in use (Blom et al., 2010; Dodoo et al., 2010; Jeon et al., 2013; Koroneos and Tsarouhis, 2012; Menoufi et al., 2013). Yet, sometimes, the environmental impacts of the stage in which the buildings are in use may even conceal the influence of the building

* Corresponding author. Tel.: +34 964 728112; fax: +34 964 728106.
E-mail address: bovea@uji.es (M.D. Bovea).

Table 1
Classification of the literature on the application of the LCA methodology to the environmental evaluation of construction systems.

Reference	Country	Life cycle inventory data													LCA stages										Impact assessment method																				
		Construction materials											Construction systems		Origin of data												Impact categories																		
		Gypsum/plaster	Clay/red brick	Concrete block/tile/panel	Plaster block	Concrete	Mortar/cement portland	Ceramic and quarry tiles	Insulation materials	Wood products – timber boards	Cellulose fibre board (papers/cardboards)	Stucco/stucco adhesive	Metals/ro metals	Plastics (PVC, polystyrene, EPS, etc.)	Others	Vertical external wall (fa- cade)	Vertical internal wall (partition wall)	Flooring system	Roof	House/building/dwellings	Primary data	Secondary data – major databases:	Raw material acquisition	Production of building materials	Transport to the building site	Construction	Usage and maintenance	Demolition	Transport	C & D waste management	Global warming potential	Acidification	Human toxicity	Eutrophication	Ozone layer depletion	Photochemical oxidation	Waste	Ecotoxicity (water/terrestrial)	Energy demand/embedded energy	Abiotic resources depletion	Others	End point method	Mid point method		
Arena et al. (2006)	–															x				n.s.		x	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Hauschild and Potting (2005)				
Asdrubali et al. (2013)	Italy																	x		Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x	x	x	x	x	x										x		Goedkoop and Spruiensma (2000)	Hischier et al. (2010)		
Asif et al. (2007)	UK	x			x	x	x	x	x			x		x				x		Literature		x	x	x						x	x			x								n.s.			
Audenaert et al. (2012)	–			x				x	x				x	x				x		Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x	x	x		x													Goedkoop and Spruiensma (2000)			
Azari (2014)	US														x	x				Athena IE databases ^a		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										Bare (2002)			
Bozorg Chenani et al. (2015)	Finland												x				x	x	Literature, Ecoinvent v2 (2007) & SimaPro databases ^b		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		Guinée (2002)	Guinée (2002)			
Broun and Menzies (2011)	UK	x	x					x								x			Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x												Bare (2002)			
Carreras et al. (2015)	Spain								x									x	x	Ecoinvent v2 (2007) & EnergyPlus ^c		x	x		x	x															x	Goedkoop and Spruiensma (2000)			
Chou and Yeh (2015)	Taiwan																	x	x	Literature		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		n.s.			
Condeixa et al. (2014)	Brazil	x														x			Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		Guinée (2002)	Guinée (2002)		
Cuéllar-Franca and Azapagic (2012)	UK																x		Gabi PE International (2010) & literature		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		Guinée (2002)	Guinée (2002)		
Densley Tingley et al. (2015)	UK														x				Literature, Ecoinvent v2 (2007) & Inventory of Energy and Carbon ^d		x	x	x	x																	European Union (2011)				
Dewulf et al. (2009)	Belgium	x						x					x	x	x			x	x	Ecoinvent v2 (2007) & literature							x	x	x															De Meester et al. (2009)	
Dylewski and Adamczyk (2014)	Poland																		Literature		x	x		x							x	x			x								Goedkoop and Spruiensma (2000)		
Feng and Hewage (2014)	–																		Literature & EnergyPlus ^c		x	x	x	x	x			x													x	Goedkoop and Spruiensma (2000)			
González-García et al. (2012)	Spain	x						x	x										Ecoinvent v2 (2007) & IDEMAT database (2001)		x	x	x	x	x					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			Guinée (2002)		
Han et al. (2015)	China																	x		Literature & CLCD 3.0 ^e		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			Guinée (2002)			
Hoxha et al. (2014)	France																	x		INIES (2009) & Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								x	AFNOR (2004)		
Huberman and Pearlmitter (2008)	Israel			x										x	x	x				QUICK II ^f & literature		x	x	x		x																	n.s.		
Ibáñez-Forés et al. (2011)	Spain																		Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					Guinée (2002)		
Ioannidou et al. (2014)	Switzerland																		Ecoinvent v2 (2007)		x	x	x	x																			Guinée (2002)		
Ip and Miller (2012)	UK																		Ecoinvent v2 (2007) & literature		x	x	x	x																			IPCC (2007)		
Iribarren et al. (2015)	Luxembourg	x	x	x	x	x	x	x	x	x									n.s.			x	x									x	x			x	x	x					Nachhaltiges Bauen (2014) ¹		
Islam et al. (2014)	Australia																					x	x	x	x	x	x	x	x	x												Pré Consultants (2008)			

Author(s)	Country	Year	Methodology	Database	Software	Method	Material	Energy	Water	Land	Other	Impact	Reference
Kellenberger and Althaus (2009)	Switzerland		Ecoinvent v2 (2007), AusLCI database ^a , & AccuRate software ^b										Hischier et al. (2010)
Kim (2011)	USA		SimaPro databases ^b										IPCC (2007)
Knoeri et al. (2013)	Switzerland		Ecoinvent v2 (2007)										Goedkoop and Spriensma (2000), Goedkoop and Spriensma (2000), Frischknecht et al. (2009), Goedkoop (1995)
Koroneos and Dompros (2007)	Greece		Literature										IPCC (2007)
Martínez-Alonso and Berdasco (2015)	Spain												IPCC (2007)
Mateus et al. (2013)	Portugal		Ecoinvent v2 (2007)										Guinée (2002)
Meilá et al. (2014)	Italy		Ecoinvent v2 (2007)										Greenhouse Gas Protocol (2011), Hischier et al. (2010), and Huijbregts et al. (2008)
Menoufi et al. (2013)	Spain		Ecoinvent v2 (2007)										Goedkoop and Spriensma (2000)
Mercante et al. (2011)	Spain		Ecoinvent v2 (2007)										Guinée (2002)
Monteiro and Freire (2012)	Portugal		Ecoinvent v2 (2007)										Guinée (2002) and Hischier et al. (2010)
Ortiz et al. (2010)	Spain		iTEC (2009) and Ecoinvent v2 (2007)										Guinée (2002)
Ottelé et al. (2011)	The Netherlands		Nationale Milieudatabase ¹										Guinée (2002)
Pajchrowski et al. (2014)	Poland		Ecoinvent v2 (2007) & literature										Joliet et al. (2003)
Pargana et al. (2014)	Portugal		Ecoinvent v2 (2007) & ELCD										Guinée (2002)
Porhničák and Estroková (2013)	Slovakia		Literature										Guinée (2002)
Pretot et al. (2014)	France		Ecoinvent v2 (2007)										AFNOR (2004)
Radhi and Sharples (2013)	Bahrain		Materials Engineering Directorate (2010), NIST (2007) & literature										Literature
Reza et al. (2011)	Iran		LEED ^c										Guinée (2002)
Rincón et al. (2013)	Spain		Wuppertal Institute (2003) and Ecoinvent v2 (2007)										Goedkoop and Spriensma (2000)
Rincón et al. (2014)	Spain		Ecoinvent v2 (2007)										Goedkoop and Spriensma (2000)
Rydh and Stun (2005)	—		SimaPro databases ^b										Guinée (2002)
Samani et al. (2015)	—		IDEMAT database (2001)										Guinée (2002)
Souza et al. (2015)	Brazil		Ecoinvent v2 (2007)										Literature
Taborianski and Prado (2012)	Brazil		SimaPro databases ^b										Literature
Takano et al. (2014)	Finland		Ecoinvent v2 (2007) & literature										n.s.
Takano et al. (2015)	Finland		Ecoinvent v2 (2007)										IDA ICE ^m
Thiel et al. (2013)	USA		Franklin Associates (1998) and Ecoinvent v2 (2007)										Bare (2002) and Hischier et al. (2010)
Vanun et al. (2012)	India		Literature										Literature

(continued on next page)

materials used in the construction and later demolition stages (Arena et al., 2006). The interior partition walls make the highest contribution to the material inputs, when compared to other non-load-bearing construction elements (Mateus et al., 2013).

Nevertheless, during the decision-making process, the cost is another important issue to be balanced against the environmental considerations of a building material or construction solution, in order to provide the best economic and ecological value for the market and for society, customers and users (Ortiz et al., 2009). The eco-efficiency analysis provides a method to relate both aspects. Although it can be defined in different ways, for this study, the eco-efficiency analysis considers the ratio between the economic value and the environmental burdens of the life cycle (WBSCD, 2000a).

Taking into account this framework, the aim of this article is to compare the eco-efficiency of the entire life cycle of ten alternative solutions that can be used for interior partition walls. These ten alternatives are variants on five building solutions commonly used in Spain: gypsum plasterboard system, hollow clay brick system, hollow concrete block system, autoclaved aerated concrete block system and gypsum block system. For each alternative solution, environmental and economic indicators are obtained for its full life cycle, including the following stages: raw materials acquisition, transportation to the construction site, on-site installation and demolition and waste management at their end-of-life.

Hence, this paper is structured in the following way: Section 2 presents a thorough review of the literature analysing the environmental and economic aspects of building materials, with special emphasis on the building solutions used for partition walls. Section 3 describes the characteristics of the different types of interior partition walls under study and Section 4 includes the life cycle analysis of each solution broken down into each of its life cycle stages. Section 5 presents the findings based on the eco-efficiency study (environmental impact vs. cost) and the sensitivity analysis results are discussed in Section 6. Finally, conclusions are presented in Section 7.

2. Background

Before undertaking the eco-efficiency study of the different alternative building solutions for interior partition walls most commonly used in Spain, a literature review was carried out on the studies conducted to date on the environmental and economic evaluation of building materials and building solutions, taking into account their entire life cycle.

From the environmental point of view, the LCA methodology has mostly been applied to obtain environmental indicators. The most important stage in any LCA study is the drafting of a Life Cycle Inventory (LCI) that includes all the materials and processes that make up the life cycle of the system to be analysed, since the quality and credibility of the results of the study largely depend on the quality of the data taken as the starting point (Cellura et al., 2011). The first stage of the life cycle of any construction system is to obtain the materials that will be used in it, and the last one is their treatment as construction and demolition waste (C&DW), once their useful life has come to end. Table 1 shows a classification of the main literature published in recent years dealing with the application of the LCA methodology to the environmental evaluation of construction systems, with special attention being paid to the materials to be included in them, the origin of the data in the inventory, as well as the stages of the life cycle that are considered in the study and the methods that are applied to evaluate the impact.

The inventory data found in the literature include data on both construction materials and construction systems. On analysing the publications focused on the analysis of construction systems, it was

found that only six studies evaluate the environmental behaviour of interior partition walls, which are the object of this study: an environmental comparison of the three most widely used partition systems in the UK (clay brick system, concrete block system and traditional timber frame) (Broun and Menzies, 2011); a comparison of two building solutions commonly used in Portugal (hollow brick system and plasterboard system) (Mateus et al., 2013) and other two commonly used in Brazil (masonry of ceramic brick and cement-sand made mortar) (Condeixa et al., 2014); an evaluation of the environmental impact of the production and construction of hemp-lime walls in the UK (Ip and Miller, 2012); an evaluation of the environmental behaviour of seven types of partition walls based on the Spanish Technical Building Code (Real Decreto 314/2006), with the aim of optimising a building as a whole (Ortiz et al., 2010); and, finally, a comparison of some lightweight solutions for prefabricated structural wall panels concerning physical performance as well as cost and environmental impact (Samani et al., 2015).

With regard to the origin of the data used to conform the life cycle inventory of each construction material and/or building solution, in Table 1 it can be seen that, in the majority of cases, commercial LCI databases are normally used, in particular Ecoinvent (Ecoinvent v2, 2007) and the material databases included in SimaPro software such as Idemat (IDEMAT database, 2001), Franklin USA database (Franklin Associates, 1998), BUWAL (BUWAL 250, 1996), and so on. The information obtained from these databases is usually completed with primary data and information from other literature.

As regards the environmental indicators that are taken into account, the different studies mainly obtain indicators for different impact categories (mid-point method), the most widely applied being the CML2001 method (Guinée, 2002). The most commonly used indicators are global warming potential and energy consumption. Of the studies in which a final weighting (end-point) method is applied, Eco-Indicator'99 (Goedkoop and Spriensma, 2000) is the most commonly used, followed by EPS 2000 (Steen, 1999a,b).

On analysing the economic aspect, of all the references examined in Table 1, only seven of the 55 reviewed papers incorporate the study of the economic factors in their environmental analyses (Mateus et al., 2013; Ortiz et al., 2010; Reza et al., 2011; Samani et al., 2015; Takano et al., 2014; Dylewski and Adamczyk, 2014; Islam et al., 2014), whereas the others focus on just the economic aspect of the dwellings (Cuéllar-Franca and Azapagic, 2014; Keoleian et al., 2000; Moore and Morrissey, 2014). Table 2 shows a classification of these studies, according to the construction material/system or the type of building that they analyse, the stages of the life cycle that are considered in the study, the origin of the economic data, and the types of costs taken into account.

In each of these studies, the costs are analysed from different points of view: calculation of the construction cost index based on the average market price of the building materials used and including the costs of labour and equipment employed during construction site operations (Mateus et al., 2013), consideration of the material, construction and occupation and maintenance costs (Reza et al., 2011), analysis of the construction phase of buildings (Ortiz et al., 2010) obtaining reference costs from the BEDEC database (iTEC, 2009), or maintaining the life cycle costs of a house as the sum of the costs of construction, use and end-of-life-waste management (Cuéllar-Franca and Azapagic, 2014). None of the reviewed articles relates environmental and economic indicators by means of an eco-efficiency analysis.

In Spain no specific life cycle inventory database on building materials or building solutions has been developed to date. Only certain commercial databases like BEDEC (iTEC, 2009) include

Table 2
Classification of the literature dealing with the application of the economic evaluation of building systems.

Reference	Country	Life cycle inventory data																
		Construction materials													Construction systems			
		Gypsum/plaster	Clay/red brick	Concrete block	Plaster block	Concrete	Mortar/cement portland	Ceramic and quarry tiles	Insulation materials	Wood products – timber boards	Cellulose fibre board (papers/cardboards)	Stucco/adhesive	Metals/no metals	Plastics (PVC, polystyrene, etc.)	Others	Vertical external wall (façade)	Vertical internal wall (partition wall)	Flooring system
Carreras et al. (2015)	Spain								x									
Cuéllar-Franca and Azapagic (2014)	UK																	
Dylewski and Adamczyk (2014)	Poland	x														x		
Hasan et al. (2008)	Finland																	
Islam et al. (2014)	Australia																	
Keoleian et al. (2000)	USA																	
Mateus et al. (2013)	Portugal																x	
Moore and Morrissey (2014)	Australia																	
Ortiz et al. (2010)	Spain															x	x	
Reza et al. (2011)	Iran		x	x										x				x
Samani et al. (2015)	–													x				x
Takano et al. (2014)	Finland																	

^a LIDER, V. 1.0. Ministerio de Fomento, Government of Spain –www.codigotecnico.org.

^b AccuRate software. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).

^c CES EduPack software application, Granta Design Limited, 2013. <http://www.grantadesign.com/education/edupack/>.

economic information that can be used to draw up estimates for construction work, in addition to environmental data about the global warming potential (GWP) or about the C&DW generated by different construction materials and/or solutions.

Therefore, from this exhaustive literature analysis it can be concluded that there is a need to analyse interior partition walls from an eco-efficient point of view, with special emphasis on obtaining inventory data adapted to the case study in Spain.

3. Description of the construction systems under study

An interior partition wall is a wall constructed to separate different spaces within a single dwelling. Although current partition systems do not have any load-bearing function, they must comply with other requirements concerning their durability, safety in case of fire, structural safety and soundproofing, which, in Spanish legislation, is all set out in the Technical Building Code (Real Decreto 314, 2006).

In this study, 10 alternative methods of interior partitioning in dwellings, which are in fact variants on five building solutions, will be compared from the environmental point of view:

1. Gypsum plasterboard system: drywall partition consisting of a galvanised steel frame, studs with dimensions $48 \times 30 \times 0.55$ mm every 400–600 mm and two channels with dimensions $48 \times 36 \times 0.6$ mm, one attached to the floor and the other to the ceiling, with an acoustic seal. This frame is encased in two gypsum plasterboards with a thickness of 15 mm on both sides attached with steel screws and the inner space is filled with a panel of insulation material. The joints are then taped and finished with gypsum jointing compounds.
Two alternative insulation materials are commonly used:
 - 1a) with a 40 mm-thick rock wool insulation panel as the inside material

- 1b) with a 40 mm-thick cellulose fibre board panel as the inside material
2. Hollow clay brick system: masonry partition built with hollow clay bricks and plaster veneer on both sides of the wall. Depending on the dimensions of the brick, the material used for the joints and the thickness of the plaster veneer, we can find three alternatives:
 - 2a) hollow clay brick with dimensions of 240 mm (length) by 115 mm (height) by 100 mm (depth) joined with 10 mm of cement mortar and 15 mm-thick plaster veneer.
 - 2b) hollow clay brick with dimensions of 240 mm (length) by 115 mm (height) by 100 mm (depth) joined with 10 mm of cement mortar and 10 mm-thick plaster veneer.
 - 2c) large format hollow clay brick with dimensions of 700 mm (length) by 520 mm (height) by 70 mm (depth) joined with 5 mm of stucco adhesive and 10 mm-thick plaster veneer and acoustic seal.
 3. Hollow concrete block system: masonry partition built with hollow concrete blocks with dimensions of 400 mm (length) by 200 mm (height) by 80 mm (depth) joined with 10 mm of cement mortar and plaster veneer on both sides of the wall. Depending on the thickness of the plaster veneer, we can find two alternatives:
 - 3a) plaster veneer with a thickness of 15 mm
 - 3b) plaster veneer with a thickness of 10 mm
 4. Autoclaved aerated concrete block system: masonry partition built with autoclaved aerated concrete blocks with dimensions of 625 mm (length) by 500 mm (height) by 80 mm (depth) joined with 10 mm of cement mortar and plaster veneer on both faces of the wall. Depending on the thickness of the plaster veneer, we can find two alternatives:
 - 4a) plaster veneer with a thickness of 15 mm
 - 4b) plaster veneer with a thickness of 10 mm

Life cycle inventory data		LCA stages								Included costs								
Construction systems		Origin of data		Raw material acquisition	Production of building materials	Transport to the building site	Construction	Usage and maintenance	Demolition	Transport	C&D waste management	Materials costs	Workmanship/ labour costs	Energy costs/ saves	Fuel costs	Equipment costs	Overhead/ general costs	Present value
x	Roof	Primary data	Secondary data – major databases: iTEC (2009) & LIDER ^a	x	x	x	x	x				x		x				
x	House/ building/ dwellings	Market value	Literature	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x		Market value	Literature	x	x		x	x	x			x	x					x
x		Market value	Literature				x	x				x	x					x
x		Market value	Literature				x	x				x	x					x
x		Accurate software ^b	iTEC (2009)	n.s.														
		Iranian construction list of price range		x	x		x	x										x
		CES EduPack ^c		x	x								x	x				x
x		Market value	Literature	x	x								x	x				

5. Gypsum block system: masonry partition built with gypsum blocks with dimensions of 666 mm (length) by 500 mm (height) by 70 mm (depth) jointed with 5 mm of stucco adhesive, without any coating but gypsum jointing compounds and acoustic seal.

Fig. 1 shows a vertical section of the solutions described above.

4. Environmental analysis

In order to obtain the indicators that measure the environmental performance of each alternative solution for interior partition walls, the LCA methodology (ISO 14040-44, 2006) is applied taking into account the recommendations provided by the standard EN 15804:2012+A1 (2013).

4.1. Definition of goal and scope

The main aim of this study is to conduct an environmental analysis of the life cycle of five alternative solutions for partition

walls that can be applied in the construction of housing in Spain (building solutions 1, 2, ..., 5 in Fig. 1). In addition, the aim is also to analyse how aspects like modifying the insulating filler material in solution 1, the thicknesses of the plaster in solutions 2, 3 and 4 or the format of the bricks used in solution 2 can influence the environmental impact of each solution. With these combinations in mind, this study analyses the 10 alternatives shown in Fig. 1.

The results obtained from this study can be used for facilitating the decision making process for selecting the best building solution for interior partition walls from an environmental point of view. Moreover, the environmental indicators obtained can be used for obtaining the corresponding EPD, since PCR recommended by EN 15804:2012+A1 (2013) are followed for the LCA study.

For each alternative under study, the scope includes the life cycle stages shown in Fig. 2, which are based on the module groups proposed by EN 15804:2012+A1 (2013). Note that the product stage (modules A1–A3) represents the minimum processes that shall be included in an EPD of a construction product. This study took into account all the flows of inputs (raw materials, energy, fuel, water, etc.) and outputs (airborne emissions, emissions into water

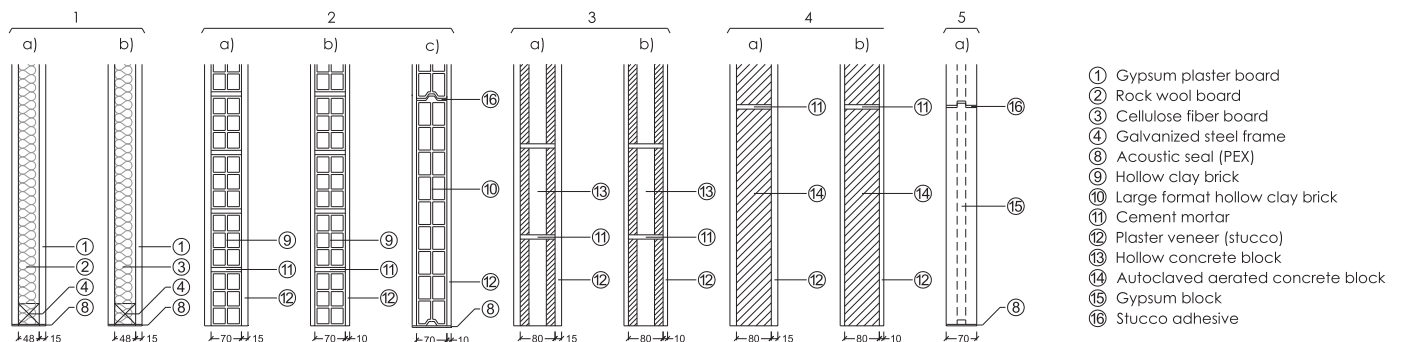


Fig. 1. Vertical section of the building solutions under study.

EN 15804:2012+A1:2013

			BUILDING SOLUTIONS					
			1a 1b	2a 2b 2c	3a 3b	4a 4b	5	
Building Assessment Information	PRODUCT STAGE A1 – A3	A1	Raw material supply	Gypsum plaster board Rock wool/Cellulose board Galvanized steel Acrylic paing Steel screws PEX Kraft paper bleached	Hollow brick Cement mortar / PEX Stucco	Hollow concrete block Cement mortar Stucco	Autoclaved concrete block Cement mortar Stucco	Plaster block Stucco adhesive PEX
		A2	Transport	Pallet, Kraft paper unbleached & LDPE				
		A3	Manufacturing	Cardboard & HDPE				
	CONSTRUCTION PROCESS STAGE A4 - A5	A4	Transport	Diesel + Pallets <i>(depending on volume and mass to be transported)</i>				
		A5	Construction-installation process	Electricity + Water <i>(depending on the building material and construction technique demands)</i>				
	USE STAGE B1 – B7	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7	Use Maintenance Repair Replacement Refurbishment Operational energy use Operational water use					
	END OF LIFE STAGE C1 – C4	C1	Deconstruction Demolition	Diesel <i>(depending on volume, mass and resistance of construction system to be demolished)</i>				
		C2	Transport	Diesel (transportation to de landfill)				
		C3	Waste Processing	Diesel + Water + Electricity (waste management and landfilling)				
		C4	Disposal					
BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARY	D	Reuse-Recovery-Recycling Potential	Cast iron			Gravel		

Fig. 2. Scope of the study.

and soil, as well as solid waste) produced throughout the stages that make up the life cycle of the selected partition walls. Regarding the life cycle stages that were considered, the use stage (modules B1–B7) lies beyond the scope of this study, as it is common to all the building solutions under analysis (paintwork and its upkeep), and because it is assumed that no heat is exchanged between rooms separated by the interior partition walls analysed here. This is due to the fact that both of them are considered to be heated and there is therefore no energy gain or loss that has to be offset.

The declared functional unit is 1 m² of partition wall system over a period of 60 years, the average life span of the principle materials that make up the building solutions analysed [Taborianski and Prado \(2012\)](#), which fulfils the minimum functional requirements for a partition wall ([Real Decreto 314, 2006](#)). Specifically, the system under analysis has to ensure a proper separation between the rooms and comply with an acoustic insulation specification greater than 35 dBA, as well as being capable of bearing a uniformly distributed load of 70 kg/m².

4.2. Life cycle inventory

The life cycle inventory that was drafted covers all the stages of the life cycle of the partition walls detailed in [Fig. 2](#), from the production of the materials needed for each alternative building solution described in [Section 3](#), to their management as C&DW at their end-of-life.

In this study special emphasis was placed on drawing up an inventory adapted to the case of application and the geographic situation of its location (Spain) for each of the materials and processes involved in the life cycle of the different building solutions.

The inventory was based on the Ecoinvent ([Ecoinvent v2, 2007](#)) database, which was adapted to the Spanish context by modifying the electric mix ([Table 3](#)), distances, mean of transport, etc., and for incorporating the specifications issued by Spanish manufacturers and builders, which are detailed below for each stage of the life cycle.

• Product stage (A1–A3):

Obtaining the materials that make up each alternative. As shown in [Table 4](#), the inventory was produced for each of the materials that make up each alternative bearing in mind the following aspects: product supply format, losses of material during its application on-site, characteristics of both the secondary (boxes, supply bags, etc.) and tertiary or transport packaging (pallet, shrink-wrapped plastic, etc.). The last column of the table specifies the building solution each alternative is applied to, although the amounts of each material that make up the functional unit of each alternative are given in [Table 7](#).

Table 3
Electric mix for Spain ([REE, 2012](#)).

Primary energy	%
Coal	15
Nuclear	21
Hydropower	12
Natural gas	19
Cogeneration	12
Wind power	16
Other renewable (solar, etc.)	5

Table 4

Specifications incorporated into the inventory referring to the materials that make up each alternative.

	Material characteristics		Packaging			Pallet total weight ^a	% Losses ^b	Alternative building solution
	Format	Unit weight (kg/unit)	Secondary	Tertiary	Units/pallet			
Gypsum plasterboard	1.2 × 2.5 m	33.9	–	Pallet special (1.2 × 2.5 m ³): 26 kg Shrink film: 0.34 kg/pallet	30 units	1043.34	5	1a, 1b
Rock wool board	1 × 1.2 m	7.2	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.53 kg/pallet	52 units	175.33	5	1a
Cellulose fibre board	1 × 1.2 m	2.4	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.53 kg/pallet	52 units	149.33	5	1b
Galvanised steel (upright)	2.5 m	1.45	Cardboard box 12 units	Pallet special (1.2 × 2.5 m ³): 26 kg Shrink film: 0.53 kg/pallet	504 units	953.26	5	1a, 1b
Galvanised steel (channels)	3 m	1.38	Cardboard box 12 units	Pallet special (1.2 × 3 m ³): 26 kg Shrink film: 0.12 kg/pallet	588 units	889.99	5	1a, 1b
Acrylic paint	Sack	20	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.20 kg/pallet	56 sacks/1120 kg	1150.36	5	1a, 1b
Steel screws	1 unit	0.001	HDPE box of 12,000 units	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.22 kg/pallet	1,152,000 units	1226.14	5	1a, 1b
Kraft paper bleached	1 tambour of 150 m-l	0.22	Bag of 15 tambours	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.22 kg/pallet	240 tambours	77.88	10	1a, 1b
Acoustic seal (PEX)	1 tambour of 70 m-l	0.44	Bag of 11 tambours	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.03 kg/pallet	44 tambours	43.76	10	1a, 1b, 5
Hollow brick (standard)	0.240 × 0.115 m	1.4	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.24 kg/pallet	550 units	794.24	5	2a, 2b
Double hollow brick (large format)	0.700 × 0.520 m	15.8	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.18 kg/pallet	28 units	467.58	5	2c
Cement mortar	Sack	25	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.24 kg/pallet	48 sacks	1230.44	5	2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b
Stucco	Sack	19	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.20 kg/pallet	64 sacks	1246.6	5	2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b
Hollow concrete block	0.4 × 0.2 m	7.37	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.24 kg/pallet	164 units	1232.91	5	3a, 3b
Autoclaved concrete block	0.625 × 0.5 m	13.75	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.22 kg/pallet	40 units	563.97	5	4a, 4b
Gypsum block	0.666 × 0.5 m	22	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.22 kg/pallet	44 units	992.23	5	5
Stucco adhesive	Sack	25	–	Europallet (1.2 × 0.8 m ³): 24 kg Shrink film: 0.20 kg/pallet	48 sacks	1230.44	5	5

^a Pallet + pallet package + material weight.^b During on-site installation stage.

• Construction process stage (A4–A5):

A4 – Transportation of the materials to the site. The distances and lorry tonnages detailed in Table 5 were taken into account to model the inventory corresponding to the stage in which the materials are carried to the site, while the data on diesel fuel for each type of lorry used for the inventory were taken as those in Ecoinvent (Ecoinvent v2, 2007). For the case of transporting the materials directly to the building site or an intermediary warehouse, a standard container with a maximum authorised weight of 44 t was considered (REE, 2012). Furthermore, transportation of the materials from the intermediary warehouse to the building site was assumed to have been carried out by means of a standard container with a maximum authorised weight of 18 t (Ministerio de Fomento de España, 2009). In all cases the container was considered to be empty on its return journey.

Table 7 includes the tkm for each type of transport, assigned to 1 m² of each alternative under study. Transport takes into account the weight of the material and its secondary and tertiary packaging material, as set out in Table 4.

A5 – On-site installation. Once the materials have arrived at the building site, it was assumed that they were moved by means of a 24.1 kW crane from level 0 to the corresponding floor, while installation or placement was considered to have been performed manually. Assuming an average time of 5 min per movement of each pallet of material on the site and the weight of each material together with its secondary and tertiary packaging materials, as

shown in Tables 4 and 7, the consumptions detailed in Table 6 are obtained. Moreover, as shown in Table 4, a 5% loss during installation was also taken into account for all materials except for the jointing and acoustic seals, which was assumed to be 10%.

Table 5

Characteristics of transporting the materials to the building site.

	Distance (km)		
	Direct to building site (44 t)	To interim storage area (44 t)	From interim storage area to building site (24 t)
Gypsum plasterboard	52.5		
Rock wool board		132	10
Cellulose fibre board		132	
Galvanised steel (upright)	52.6		
Galvanised steel (channels)	52.6		
Acrylic paint		42.6	10
Steel screws		42.6	10
Kraft paper bleached		42.6	10
PEX		42.6	10
Hollow brick (standard)	10		
Double hollow brick (large format)	10		
Cement mortar		76.9	10
Stucco		42.6	10
Hollow concrete block		76.9	10
Autoclaved concrete block		76.9	10
Plaster block		42.6	10
Stucco adhesive		76.9	10

Table 8
Impact categories.

Environmental impact (mandatory elements)	
Impact category	Unit
Acidification for soil and water	kg SO ₂ eq.
Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ eq.
Global warming (climate change)	kg CO ₂ eq.
Ozone depletion	kg CFC-11 eq.
Photochemical ozone creation	kg C ₂ H ₄ eq.
Depletion of abiotic resources – elements	kg Sb eq.
Depletion of abiotic resources – fossil fuels	MJ, net calorific value

average distance among the treatment plants that currently exist in the study area, which was 22.7 km. Table 7 includes the assignation of these data for each of the alternative building solutions under study.

• Benefits and loads beyond the system boundary stage (D):

D – Recovery. Recovery of C&DW generates an avoided burden derived from the recovery of steel present in the C&DW due to the self-supporting interior vertical division of plasterboard panels (alternatives 1a and 1b) and from the recovery in the form of gravel from the inert fraction of the C&DW from alternatives 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 4a and 4b (Mercante et al., 2011). Table 7 shows the assignation of these data for each of the alternative building solutions under study.

Finally, Table 7 shows the inventory for 1 m² of each of the alternative building solutions under analysis, taking into account the individual inventory data for the materials involved in each case.

4.3. Life cycle impact assessment

Once the inventory that covers the life cycle of the alternative interior partition walls has been drawn up, the next step in the methodology is the life cycle impact assessment (LCIA). The LCIA consists of both mandatory and optional elements (ISO 14044, 2006). The mandatory elements allow indicators to be obtained for different impact categories. Following the standard EN 15804:2012+A1 (2013), the impact categories shown in Table 8 were selected by applying the characterisation factors proposed by this standard to calculate the environmental indicators of construction products.

Once the inventory for each life cycle stage and for each alternative building solution for the interior partition walls and the characterisation factors according to EN 15804:2012+A1 (2013), have been modelled in SimaPro 7.3.2 (PRé Consultants, 2011), the impact assessment results shown in Fig. 3 are obtained for each impact category reported in Table 8.

4.4. Life cycle interpretation

From results obtained in Fig. 3, it can be identified the alternative and the product stage that makes the greatest contribution to the environmental impact, for each impact category.

The most significant contributions in the categories depletion of abiotic resources (elements), acidification, eutrophication and ozone depletion are those involved in alternative 5. In the category global warming the greatest impact is produced by alternative 4 and in that of reducing the ozone layer, alternative 1 has the greatest impact. In the case of alternative 1, recycling the steel structure significantly attenuates the contribution to the impact, above all in photochemical oxidation.

Alternative 3b improves on the results of 3, and is the one that makes the smallest contribution to depletion of abiotic resources (elements), ozone depletion and photochemical ozone creation. Alternative 2c is seen as the best for acidification and eutrophication, whereas the best for global warming is 1b.

Substituting the insulation between alternatives 1a and 1b does not have any significant influence on the category ozone depletion, since in this case manufacturing the rock wool did not produce important emissions. In contrast and for the same reason, there is an important reduction in the category of global warming.

Reducing the thickness of the plaster does bring about a pronounced environmental improvement in all the categories, above all in depletion of abiotic resources (elements) and acidification.

5. Eco-efficiency study

Eco-efficiency is seen as an “administrative philosophy” driving businesses and markets towards the production and marketing of environmentally friendly, but at the same time cost effective, products (WBCSD, 2000a). Within the field of sustainable construction, eco-efficiency analyses can be used to facilitate the identification of environmentally and economically optimal construction systems/materials. Therefore, once the environmental behaviour has been assessed (see Section 4), it is needed to obtain the economic parameters which characterise the building solutions under study in order to combine them with the environmental results to make it easier to identify the best economic and environmental alternative for the market.

The life cycle cost incurred by each alternative interior partition wall is considered to measure the economic indicator within the eco-efficiency study. To obtain it, calculations were performed to determine the unit costs of each input and output flows of materials and energy involved in each of the stages of the life cycle of each construction system under analysis, based on data from BEDEC database (ITEC, 2009). Table 9 shows the considered unit costs.

By considering the unit cost of each flow of material and energy defined in Table 9 and the LCI data for 1 m² of each alternative building solution under study in Table 7, Fig. 4 shows the cost incurred by each life cycle stage of each alternative under study.

As can be seen in Fig. 4, the construction stage is the one that has the greatest economic cost throughout the whole life cycle of the interior partitions, mainly due to the economic cost of the labour required to install them. The stage involving the extraction and manufacture of the raw materials is the next one in terms of the greatest costs, in this case mainly due to the amount of energy consumed at this stage. It should be highlighted that the recovery stage does little to offset the economic impact produced by the building solutions. In general systems 1a and 1b, based on a gypsum plasterboard system, are identified as being the interior partition walls with the lowest cost throughout their life cycle.

After obtaining the indicators that quantify the environmental and economic behaviour throughout the life cycle of each alternative building solution for interior partition walls, an eco-efficiency analysis was performed on the proposed construction systems. To do so, in accordance with the eco-efficiency principles defined by WBCSD (2000b), the economic impact of each construction system under analysis was compared with the environmental impact produced throughout their whole life cycle. In other words, an XY eco-efficiency graph was produced for each environmental indicator that had been calculated. The x-axis of these graphs shows the economic cost (€) involved in the whole life cycle of each construction system, while the y-axis represents the cradle-to-grave environmental impact produced for each environmental indicator.



Fig. 3. Life cycle impacts for the building solutions (expressed per functional unit) grouped in the module groups proposed by EN 15804:2012+A1 (2013).

To identify the eco-efficient alternatives, the eco-efficiency graphs were divided into four equal areas limited by the maximum and minimum values that the alternatives had on both the x-axis (economic cost) and the y-axis (environmental impact) (Ibáñez-Forés et al., 2013). Each area represented a different level of environmental and economic efficiency. In the case study, the lower left area, shaded in green (in the web version) in the eco-efficiency graphs in Fig. 5, represents the area of maximum eco-efficiency,

where the building solutions reach the lowest environmental impact with the minimum cost and can therefore be considered the best options.

As can be seen in Fig. 5, building solutions 1b (gypsum plasterboard system) and 3b (hollow concrete block system), followed by their variants 1a and 3a (depending on the impact category), are the most eco-efficient construction systems and are therefore the most recommendable from the environmental and economic

Table 9

Unit costs involved throughout the life cycle of each of the construction systems under study.

Stage	Material	Unit	Cost (€/unit)
Product stage (A1–A3)	Gypsum plasterboard	kg	4.00E–01
	Rock wool board	kg	7.35E–01
	Cellulose fibre board	kg	9.08E–01
	Galvanised steel (upright)	kg	3.13E+00
	Galvanised steel (channels)	kg	3.13E+00
	Acrylic paint	kg	1.15E+00
	Steel screws	kg	1.66E+02
	Kraft paper bleached	kg	2.94E+00
	PEX	kg	1.27E+03
	Hollow brick (standard)	kg	7.72E–02
	Double hollow brick (large format)	kg	9.47E–02
	Cement mortar	kg	1.03E–01
	Stucco	kg	8.65E–02
	Hollow concrete block	kg	7.51E–02
	Autoclaved concrete block	kg	2.73E–01
	Plaster block	kg	9.57E–02
	Stucco adhesive	kg	7.35E+00
Construction process stage (A4–A5)	Transport lorry 44 t	tkm	3.50E–02
	Transport lorry 18 t	tkm	4.32E–02
	Water	kg	6.50E–04
	Labour (manpower)	h	1.77E+01
End of life stage (C1–C4)	Electricity	kWh	1.40E–01
	Operation (demolition)	h m ³	1.72E+01
	Equipment	h m ³	5.85E+01
	Diesel (demolition)	MJ	3.82E–02
	Diesel (transportation)	kg	1.65E+00
	Water	kg	6.50E–04
	Electricity	kWh	1.40E–01
	Diesel (waste treatment)	kg	1.65E+00
	Operation (waste treatment)	t	4.21E+01
	Gravel (valorisation)	t	2.21E+00
Benefits and loads beyond the system boundary (D)	Cast iron (valorisation)	t	7.15E+00

point of view for all the environmental indicators that were analysed.

6. Sensitivity analysis

Conducting a sensitivity analysis on the LCA study allows to estimate the effects of the choice made regarding the LCIA methods applied on the environmental indicators and therefore, on the eco-efficiency analysis. According to ISO 14044 (2006), it is relevant for reaching consistent conclusions and recommendations.

In addition to the impact categories proposed by EN 15804:2012+A1 (2013), which include the mandatory elements

of an LCIA, the ISO 14044 (2006) also proposes the application and use of normalisation, grouping and weighting methods as optional elements which can help to verify the results obtained from the application of the characterisation factors used. To do it, it is desirable to use different weighting methods, in order to assess the consequences on the results of the LCIA (ISO 14044, 2006).

In this case, Eco-Indicator'99 (Goedkoop and Spriensma, 2000), EPS2000 (Steen, 1999a,b) and ReCiPe (PRé Consultants, 2014) were applied in order to analyse not only how the environmental results vary depending on the indicators and characterisation factors used but also how the eco-efficiency results are affected by them.

Fig. 6 shows, on one hand the indicators that were obtained for each alternative (left column) and, on the other hand, the eco-efficiency results obtained by using these indicators (right column).

Note that both Eco-Indicator'99 and ReCiPe were obtained under the hierarchical perspective, which integrates the values obtained for the three damage categories: human health, quality of the ecosystem, and resource depletion, with a ratio of 40–40–20%, respectively.

As can be seen in left column of Fig. 6, alternatives 1b, 2b, 2c, 3b and 4b have the best environmental behaviour for all the impact categories. However, the best alternative changes with the characterisation method used, for example the alternative 2c, which is the best according to ReCiPe, would be the third best option if Eco-Indicator'99 is considered. Taking into account the economic aspect it can be seen, in the right column of Fig. 6, that the best options from an economic and environmental perspective are limited to 1a, 1b and 3b, these results agree with those obtained in Section 5. Therefore, it can be stated that the consideration of the economic perspective is crucial to facilitate the decision process when building solutions are benchmarking, being the eco-efficiency a useful methodology to do it.

7. Conclusions

This paper has presented a study of the eco-efficiency of different alternative building solutions for the interior partition walls commonly used in Spain. This study combines an economic analysis with the application of the LCA methodology, from the cradle to the grave, for each of the partitions under study. To do so, an exhaustive Life Cycle Inventory was drawn up. This LCI includes economic information and data concerning the input and output flows of material and energy of the building solutions for each stage of their life cycle, from the extraction of the raw materials needed

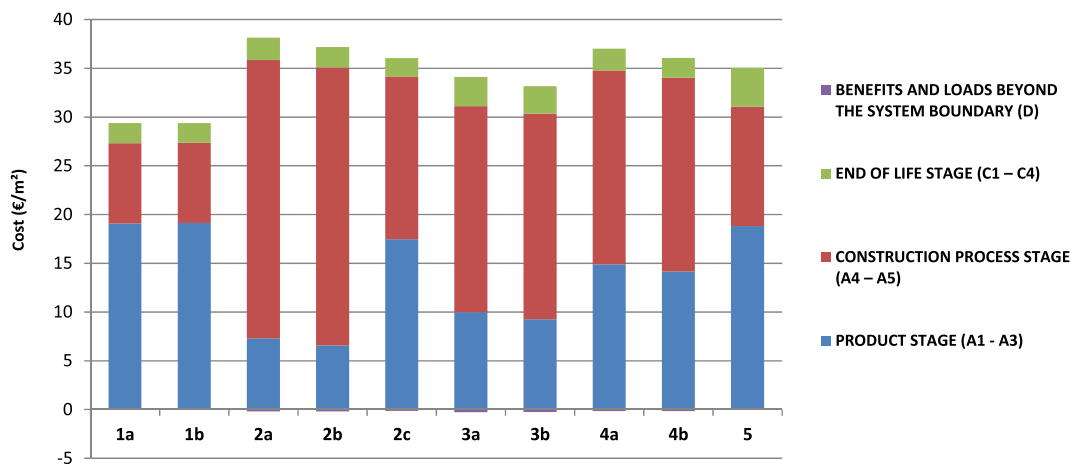


Fig. 4. Economic costs of each building solution, by stage of the life cycle.

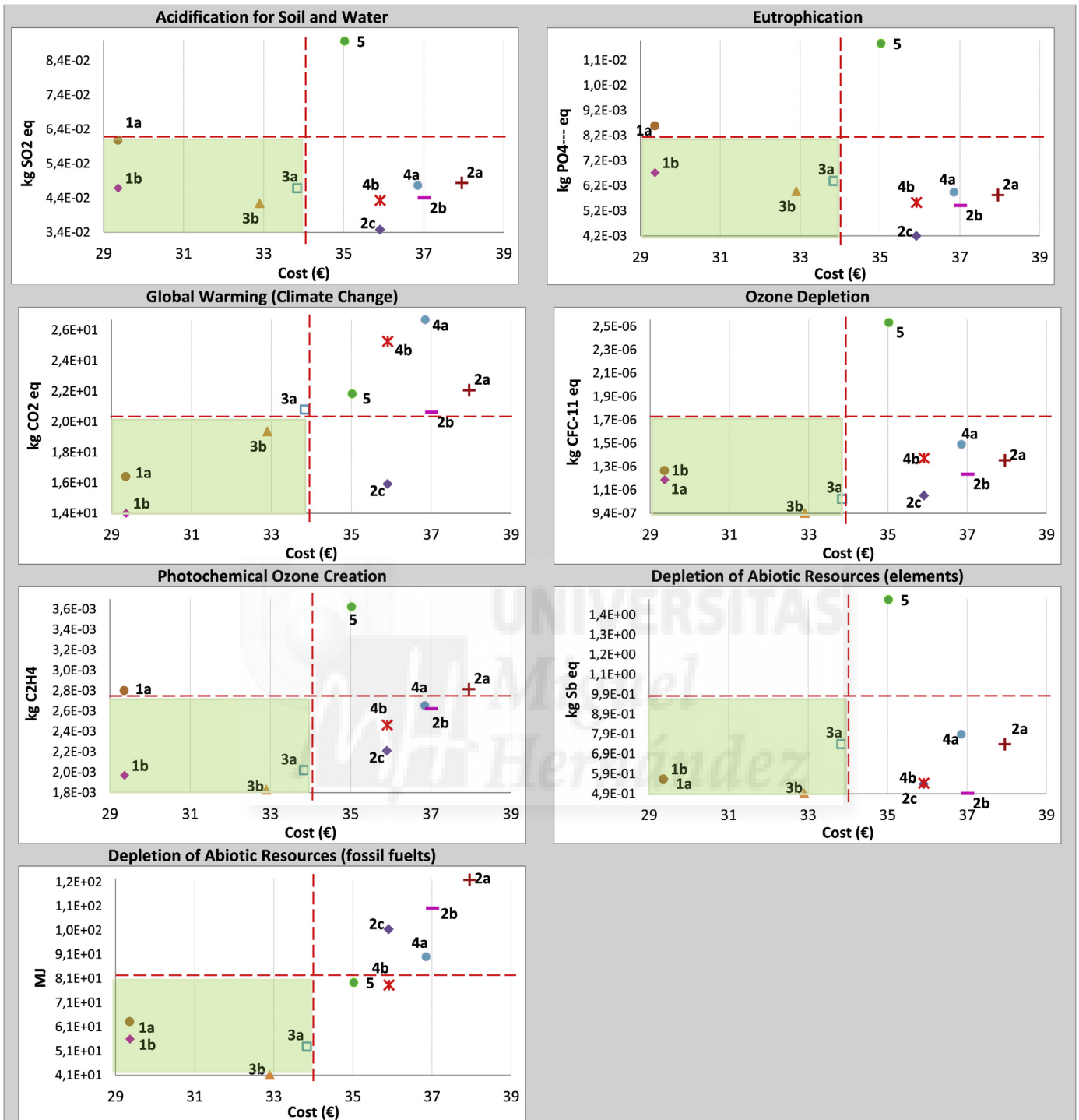


Fig. 5. Eco-efficiency analysis: environmental impact vs. total cost (€).

to manufacture the interior partition walls to their management as C&DW, at the end of their useful life.

The results of the Life Cycle Analysis identify the product stage (A1–A3) in which the component materials are manufactured as the key variable in the environmental impact of the building solutions for interior partition walls. In general, the environmental impact resulting from the process of manufacturing gypsum plasterboard (1a) and gypsum blocks (5) is greater than that from manufacturing Portland cement and ceramic bricks due to higher

fuel and electricity consumption. Furthermore, manufacturing hollow concrete blocks, which makes a contribution that is slightly lower than that of ceramic bricks for all the categories except global warming, has a greater impact than that of conventional hollow concrete, also due to higher fuel and electricity consumption.

The end of life stage (including demolition and transport of materials to the C&DW plants), as well as the construction stage (including the transport and installation of the solution into the building) do not have a crucial effect on the overall impact of the

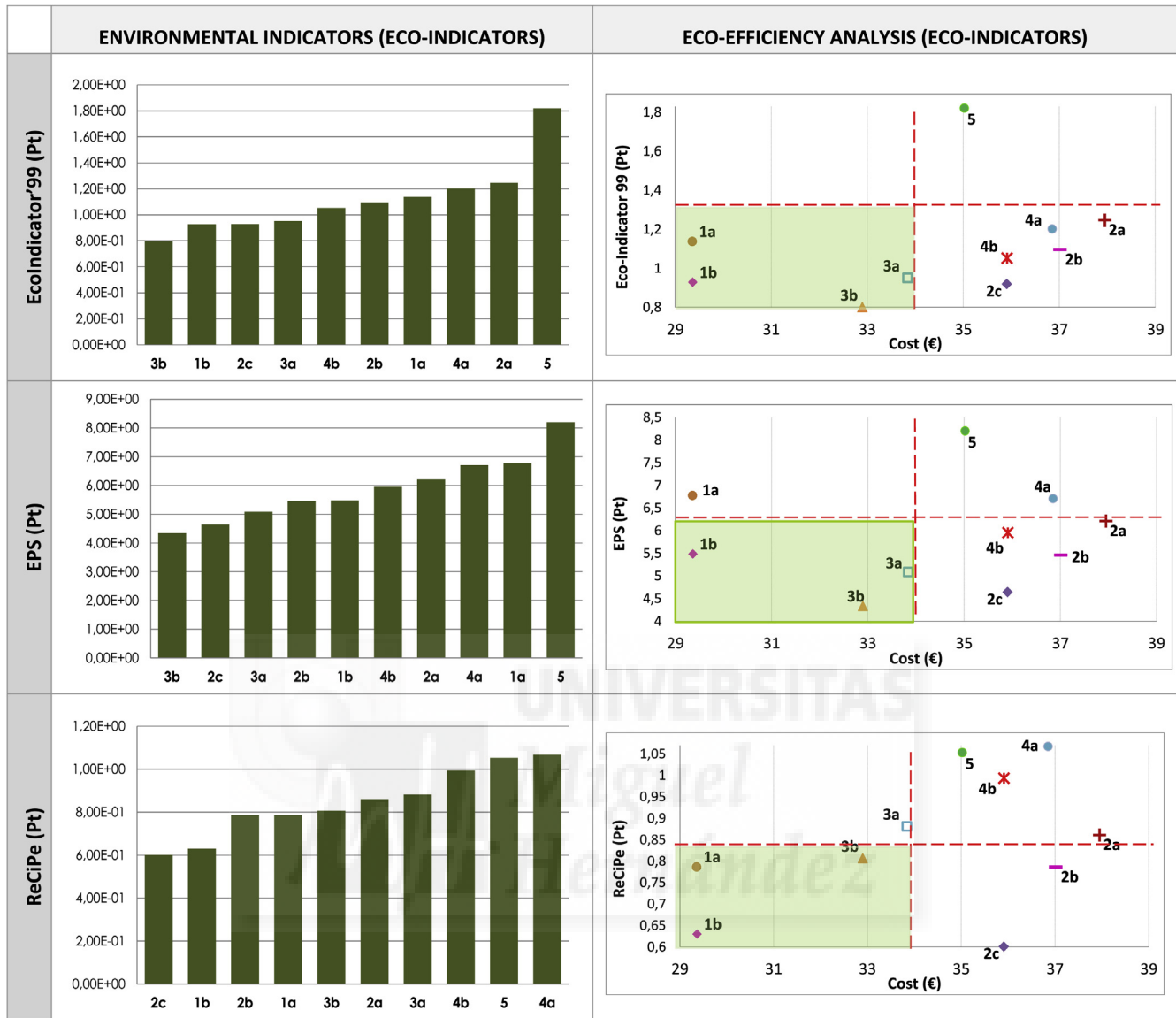


Fig. 6. Sensitivity analysis: environmental indicators and eco-efficiency study by using ReCiPe, Eco-Indicator'99 and EPS methods.

alternative solutions for interior partition walls. These stages mainly depend on the weight of the materials to be transported and/or managed as C&DW and the distance between the plants or between the factories making the materials and the building site or between the building site and the C&DW treatment plants. The recovery of materials such as the galvanised steel structure and the nuts and bolts in alternatives 1a and 1b and the production of gravel in the case of the factories (alternatives 2a, 2b, 3a, 3b, 4a and 4b) make it possible to lessen the contribution to the impact, especially for the case of photochemical oxidation.

Although the weight of alternatives 3a and 3b (hollow concrete block system) makes these the ones with the greatest contribution to all the impact categories in the construction and end of life stages, the reduced contribution of the manufacturing process of those blocks (product stage) allowed them to be identified as the alternatives with the best environmental behaviour for categories such as depletion of abiotic resources, photochemical ozone oxidation or ozone depletion.

Furthermore, if the economic results are incorporated into the environmental results through the eco-efficiency study, it can be

seen how building solutions 1b (gypsum plasterboard system) and 3b (hollow concrete block system) are the ones that combine the best environmental and economic behaviour, since they make a low contribution to the impact for all the categories that were analysed, with very low manufacturing, transport, construction, demolition and, at the end of their useful life, C&DW management costs. Therefore, these alternatives are considered optimal options from the point of view of eco-efficiency.

References

- AFNOR, 2004. Environmental Quality of Construction Products-Environmental and Health Declaration of Construction Products. French Standardization Agency, France.
- Arena, A.P., Basso, M., Fernandez, J., 2006. Análisis comparativo del ciclo de vida de envolventes livianas prefabricadas y pesadas de mampostería para viviendas. *Av. Energías Renov. Medio Ambiente* 10, 43–48.
- Asdrubali, F., Baldassarria, C., Fthenakis, V., 2013. Life cycle analysis in the construction sector: guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build.* 64, 73–89.
- Asif, M., Muneer, T., Kelley, R., 2007. Life cycle assessment: a case study of a dwelling home in Scotland. *Build. Environ.* 42 (3), 1391–1394.

- Audenaert, A., De Cleyn, S., Buyle, M., 2012. LCA of low-energy flats using the Eco-indicator'99 method: impact of insulation materials. *Energy Build.* 47, 68–73.
- Azari, R., 2014. Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes. *Energy Build.* 82, 156–162.
- Bare, J., 2002. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI). United States Environmental Protection Agency, Washington, USA.
- Blom, L., Itard, L., Meijer, A., 2010. LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. *Build. Environ.* 45 (11), 2362–2372.
- Bozorg Chenani, S., Lehvavirta, S., Häkkinen, T., 2015. Life cycle assessment of layers of green roofs. *J. Clean. Prod.* 90, 153–162.
- Broun, R., Menzies, G., 2011. Life cycle energy and environmental analysis of partition Wall systems in the UK. *Procedia Eng.* 21, 864–873.
- BUWAL 250, 1996. Buwal 250 Database. Swiss Federal Environmental Protection Agency, Bern, Switzerland.
- Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 379–388.
- Carreras, J., Boer, D., Guillén-Gosálbez, G., Cabeza, L.F., Medrano, M., Jiménez, L., 2015. Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental. *Energy Build.* 88, 335–346.
- Cellura, M., Longo, S., Mistretta, M., 2011. Sensitivity analysis to quantify uncertainty in life cycle assessment: the case study of an Italian tile. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 4697–4705.
- Chou, J.-S., Yeh, K.-C., 2015. Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. *J. Clean. Prod.* 101, 137–147.
- Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D., 2014. Life cycle impact assessment of masonry system as inner walls: a case study in Brazil. *Constr. Build. Mater.* 70, 141–147.
- CPR 305, 2011. Regulation (EU) 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 Laying Down Harmonised Conditions for the Marketing of Construction Products and Repealing Council Directive 89/106/EEC.
- Cuellar-Franca, R.M., Azapagic, A., 2012. Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses. *Build. Environ.* 54, 86–99.
- Cuellar-Franca, R.M., Azapagic, A., 2014. Life cycle cost analysis of the UK housing stock. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19 (1), 174–193.
- De Meester, B., Dewulf, J., Verbeke, S., Janssens, A., Van Langenhove, H., 2009. Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment. *Build. Environ.* 44, 11–17.
- Densley Tingley, D., Hathway, A., Davison, B., 2015. An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Build. Environ.* 85, 182–189.
- Dewulf, J., Van der Vorst, G., Versele, N., Janssens, A., Van Langenhove, H., 2009. Quantification of the impact of the end-of-life scenario on the overall resource consumption for a dwelling house. *Resour. Conserv. Recycl.* 53, 231–236.
- Dodoo, A., Gustavsson, L., Sathre, R., 2010. Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 1152–1160.
- Doka, G., 2007. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report no. 13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Dylewski, R., Adamczyk, J., 2014. The comparison of thermal insulation types of plaster with cement. *J. Clean. Prod.* 83, 256–262.
- Ecoinvent v2, 2007. Life Cycle Inventory of Building Products. Report N° 7. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Switzerland.
- EN 15804:2012+A1, 2013. Sustainability of Construction Works. Environmental Product Declarations. Core Rules for the Product Category of Construction Products.
- European Union, 2011. JRC-IES. ILCD Handbook, International Reference Life Cycle Data System, Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context-based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Feng, H., Hewage, K., 2014. Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance. *J. Clean. Prod.* 69, 91–99.
- Franklin Associates, 1998. Franklin USA LCI Database Documentation. Prairie Village, USA.
- Frischknecht, R., Steiner, R., Jungbluth, N., 2009. The Ecological Scarcity Method. Federal Office for the Environment, Switzerland.
- Goedkoop, M., 1995. The Ecoindicator'95: Final Report. Pré-Consultants BV, The Netherlands.
- Goedkoop, M., Spriensma, R., 2000. The Eco-Indicator 99. A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment. Methodology Report. PreConsultants, The Netherlands.
- González-García, S., Lozano, R.G., Estévez, J.C., Pascual, R.C., Moreira, M.T., Gabarrell, X., Pons, J.R., Feijoo, G., 2012. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DFE perspective. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17 (4), 432–444.
- Greenhouse Gas Protocol, 2011. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.
- Guinée, J., 2002. Handbook on Life Cycle Assessment: an Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Han, B., Wang, R., Yao, L., Liu, H., Wang, Z., 2015. Life cycle assessment of ceramic façade material and its comparative analysis with three other common façade materials. *J. Clean. Prod.* 99, 86–93.
- Hasan, A., Vuolle, M., Sirén, K., 2008. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Build. Environ.* 43 (12), 2022–2034.
- Hauschild, M., Potting, J., 2005. The EDIP 2003 Methodology. Environmental News no. 80. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark.
- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H.J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., 2010. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report no. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Hoxha, E., Habert, G., Chevalier, J., Bazzana, M., Le Roy, R., 2014. Method to analyse the contribution of material's sensitivity in buildings' environmental impact. *J. Clean. Prod.* 66, 54–64.
- Huberman, N., Pearlmutter, D., 2008. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy Build.* 40 (5), 837–848.
- Huijbregts, M.A.J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hungerbühler, K., Hendriks, A.J., 2008. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecol. Econ.* 64, 798–807.
- Humbert, S., De Schryver, A., Margni, M., Joliet, O., 2012. IMPACT 2002p: User Guide Draft for Version Q2.21 (Version Adapted by Quantis). Quantis, Lausanne, Switzerland.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D., Simó, A., 2011. Life cycle assessment of ceramic tiles: environmental and statistical analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 916–928.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D., Azapagic, A., 2013. Assessing the sustainability of best available techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *J. Clean. Prod.* 51, 162–176.
- IDEMAT database, 2001. Faculty of Industrial Design Engineering of Delft University of Technology, The Netherlands.
- INIES, 2009. Database. <http://www.inies.fr/> (accessed 08.04.15).
- Gabi PE International, 2010. Gabi V4.3, Germany. www.gabi-software.com (accessed 13.03.14).
- Ioannidou, D., Zerbi, S., Habert, G., 2014. When more is better – comparative LCA of wall systems with stone. *Build. Environ.* 82, 628–639.
- Ip, K., Miller, A., 2012. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK. *Resour. Conserv. Recycl.* 69, 1–9.
- IPCC, 2007. Technical Paper on 4AR. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- Iribarren, D., Marvuglia, A., Hild, P., Guiton, M., Popovici, E., Benetto, E., 2015. Life cycle assessment and data envelopment analysis approach for the selection of building components according to their environmental impact efficiency: a case study for external walls. *J. Clean. Prod.* 87, 707–716.
- Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Ahmed, I., Haque, N., 2014. Life cycle assessment and life cycle cost implications of wall assemblages designs. *Energy Build.* 84, 33–45.
- ISO 14025, 2006. Environmental Labels and Declarations. Type III Environmental Declarations. Principles and Procedures.
- ISO 14040, 2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. European Committee for Standardization (CEN).
- ISO 14044, 2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. European Committee for Standardization (CEN).
- iTEC, 2009. BEDEC PR/PCT ITC Materials Database. Catalan Institute for Construction Technology. http://www.itec.es/nouBedec/e/presentacio_bedec.aspx (accessed 13.03.14).
- Jeon, J., Lee, J.H., Seo, J., Jeong, S.G., Kim, S., 2013. Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption. *J. Therm. Anal. Calorim.* 111 (1), 279–288.
- Joliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., 2003. IMPACT 2002: a new life cycle impact assessment methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8 (6), 324–330.
- Kellenberger, D., Althaus, H.J., 2009. Relevance of simplifications in LCA of building components. *Build. Environ.* 44, 818–825.
- Keoleian, G.A., Blanchard, S., Reppe, P., 2000. Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house. *J. Ind. Ecol.* 4 (2), 135–156.
- Kim, K.H., 2011. A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system. *Energy Build.* 43 (12), 3436–3445.
- Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, H.J., 2013. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18 (5), 909–918.
- Koroneos, C., Dompros, A., 2007. Environmental assessment of brick production in Greece. *Build. Environ.* 42, 2114–2123.
- Koroneos, C., Tsarouhis, M., 2012. Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment. *J. Clean. Prod.* 32, 52–60.
- Martínez-Alonso, C., Berdasco, L., 2015. Carbon footprint of sawn timber products of Castanea sativa Mill. in the north of Spain. *J. Clean. Prod.* 102, 127–135.
- Materials Engineering Directorate, 2010. Annual Reports. Ministry of Works, Bahrain.
- Mateus, R., Neiva, S., Bragança, L., Mendonça, P., Macieira, M., 2013. Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls: comparison with conventional technologies. *Build. Environ.* 67, 147–159.
- Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., Dotelli, G., 2014. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *J. Clean. Prod.* 80, 179–186.
- Menoufi, K., Castell, A., Farid, M.M., Boer, D., Cabeza, L.F., 2013. Life cycle assessment of experimental cubicles including PCM manufactured from natural resources (esters): a theoretical study. *Renew. Energy* 51, 398–403.
- Mercante, I., Bovea, M.D., Ibáñez, V., Arena, P., 2011. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 232–241.

- Ministerio de Fomento de España, 2009. Documentos básicos del Código Técnico de la Edificación. <http://www.codigotecnico.org/web/> (accessed 08.04.15.).
- Monteiro, H., Freire, F., 2012. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: comparison of three impact assessment methods. *Energy Build.* 47, 572–583.
- Moore, T., Morrissey, J., 2014. Lifecycle costing sensitivities for zero energy housing in Melbourne, Australia. *Energy Build.* 79, 1–11.
- Nachhaltigesbauende, 2014. Berlin: Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMUB; c2014. Available from: <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html> (accessed 08.04.15.).
- NIST, 2007. BEES V4. National Institute of Standards and Technology. <http://www.bfrl.nist.gov/oe/software/bees/> (accessed 13.03.13.).
- Ortiz, O., Bonnet, C., Bruno, J.C., Castells, F., 2009. Sustainability based on LCM of residential dwellings: a case study in Catalonia, Spain. *Build. Environ.* 44, 584–594.
- Ortiz, O., Pasqualino, J.C., Díez, G., Castells, F., 2010. The environmental impact of the construction phase: an application to composite walls from a life cycle perspective. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 832–840.
- Ottel, M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R., 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy Build.* 43 (12), 3419–3429.
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W., 2014. Materials composition or energy characteristic: what is more important in environmental life cycle of buildings? *Build. Environ.* 72, 15–27.
- Pargana, N., Pinheiro, M.D., Silvestre, J.D., De Brito, J., 2014. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy Build.* 82, 466–481.
- Porhincák, M., Estoková, A., 2013. Comparative analysis of environmental performance of building materials towards sustainable construction. *Chem. Eng. Trans.* 35, 1291–1296.
- Pré Consultants, 2008. The Australian Impact Assessment Method v1.00 Included in SimaPro v7.1.8 Software. PRé Consultants, B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- PRé Consultants, 2011. SimaPro 7.3.2. PRé Consultants, B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- PRé Consultants, 2014. ReCiPe 2008-Version 1.11 (december 2014). PRé Consultants, Radboud University Nijmegen, Leiden University, RIVM.
- Pretot, S., Collet, F., Garnier, C., 2014. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating. *Build. Environ.* 72, 223–231.
- Radhi, H., Sharples, S., 2013. Global warming implications of facade parameters: a life cycle assessment of residential buildings in Bahrain. *Environ. Impact Assess. Rev.* 38, 99–108.
- Real Decreto 314, 2006. de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) (BOE 28/3/2006).
- REE, 2012. Informe Anual 2011. Spanish Electric Net, Spain.
- Reza, B., Sadiq, R., Hewage, K., 2011. Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: an AHP-based life cycle analysis. *Constr. Build. Mater.* 25 (4), 2053–2066.
- Rincón, L., Castell, A., Pérez, G., Solé, C., Boer, D., Cabeza, L.F., 2013. Evaluation of the environmental impact of experimental buildings with different constructive systems using material flow analysis and life cycle assessment. *Appl. Energy* 109, 544–552.
- Rincón, L., Coma, J., Pérez, G., Castell, A., Boer, D., Cabeza, L.F., 2014. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative life cycle assessment. *Build. Environ.* 74, 22–30.
- Rydh, C.J., Sun, M., 2005. Life cycle inventory data for materials grouped according to environmental and material properties. *J. Clean. Prod.* 13, 1258–1268.
- Samani, P., Mendes, A., Leal, V., Miranda Guedes, J., Correia, N., 2015. A sustainability assessment of advanced materials for novel housing solutions. *Build. Environ.* 92, 182–191.
- Souza, D.M.D., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Bengoa, X., Chappert, B., Duarte, F., Lima, L., 2015. Comparative life cycle assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. *J. Clean. Prod.* 89, 165–173.
- Stazi, F., Mastrucci, A., Munafò, P., 2012. Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: an application on solar wall systems. *Build. Environ.* 58, 278–288.
- Steen, B., 1999a. A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). General Systems Characteristics. CPM report 1999: 4. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Steen, B., 1999b. A Systematic Approach to Environmental Strategies in Product Development (EPS). Models and Data of the Default Methods. CPM report 1999: 5. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Taborianski, V.M., Prado, R.T.A., 2012. Methodology of CO₂ emission evaluation in the life cycle of office building façades. *Environ. Impact Assess. Rev.* 33 (1), 41–47.
- Takano, A., Hughes, M., Winter, S., 2014. A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: a case study in a Finnish context. *Build. Environ.* 82, 526–535.
- Takano, A., Pal, S.K., Kuittinen, M., Alanne, K., Hughes, M., Winter, S., 2015. The effect of material selection on life cycle energy balance: a case study on a hypothetical building model in Finland. *Build. Environ.* 89, 192–202.
- Thiel, C.L., Campion, N., Landis, A.E., Jones, A.K., Schaefer, L.A., Bilec, M.M., 2013. A materials life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies* 6 (2), 1125–1141.
- Varun, Sharma, A., Shree, V., Nautiyal, H., 2012. Life cycle environmental assessment of an educational building in Northern India: a case study. *Sustain. Cities Soc.* 4 (1), 22–28.
- Verbeeck, G., Hens, H., 2010. Life cycle inventory of buildings: a contribution analysis. *Build. Environ.* 45 (4), 964–967.
- WBSCD, 2000a. Eco-Efficiency: Creating More Value with Less Impact. World Business Council for Sustainable Development, ISBN 2-94-024017-5.
- WBSCD, 2000b. Measuring Eco-Efficiency: a Guide to Reporting Company Performance. World Business Council for Sustainable Development, ISBN 2-940240-14-0.
- Wuppertal Institute, 2003. Material Intensity of Materials, Fuels, Transport and Services. Version 2. http://www.wupperinst.org/Projekte/mipsonline/download/MIT_v2.pdf (accessed 08.04.15.).
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., Scarpellini, S., 2009. Life cycle assessment in buildings: state-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Build. Environ.* 44 (12), 2510–2520.
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ.* 46, 1133–1140.



**Publicación 2: VALORIZACIÓN DE
PODA DEL VIÑEDO COMO MATERIA
PRIMA EN LA FABRICACIÓN DE
TABLEROS DE PARTÍCULAS**



**Publicación 3: INFLUENCIA DEL
ALMIDÓN EN PANELES DE TRONCOS
DE PALMERA CANARIA SIN
ADHESIVOS SINTÉTICOS**



**Publicación 4: POTENCIAL DE LA
BIOMASA DE PALMERA CANARIA
PARA PRODUCCIÓN DE TABLEROS
SIN ADHESIVOS A BAJA
TEMPERATURA Y PRESIÓN**

Potential Use of *Phoenix canariensis* Biomass in Binderless Particleboards at Low Temperature and Pressure

Antonio Ferrández-García,* Manuel Ferrández-Villena, Clara. E. Ferrández-García, Teresa García-Ortuño, and María T. Ferrández-García

Binderless particleboards of *P. canariensis* were manufactured by hot pressing at a low temperature (120 °C) and low pressure (2.6 MPa). Nine different configurations were analyzed to study different palm tissues. The experimental panels were tested for their mechanical and physical properties according to the procedures defined by the European Union (EN) standards. The microstructure of the raw material was investigated by scanning electron microscopy (SEM) equipped with an energy dispersive X-ray detector for microanalysis (EDXA). The physical and mechanical behavior seemed to be influenced by the amount of parenchymatous tissue. Raw material and particle size have a profound effect on the board properties. The mechanism of self-bonding could have resulted from the high content of sugars, which were partly transformed into furfural. The use of this waste material could be beneficial to the environment because it is a method of carbon fixation, helping to decrease atmospheric CO₂.

Keywords: Palm tree; Self-bonded board; SEM observations; Eco-friendly; Microstructure; Without adhesive; Plant tissue

Contact information: Department of Engineering, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Spain; * Corresponding author: aferrandezgarcia@gmail.com

INTRODUCTION

Phoenix canariensis is a large palm native to the Canary Islands, Spain. It is the main indicator species of the protected habitats in the Canary Islands by the Habitats Directive of the European Union. The palms are often used in ornamental landscapes around the world and have grown spontaneously in certain areas of Mediterranean countries, as well as in California, New Zealand, *etc.* It hybridizes naturally with the *Phoenix dactylifera* (date palm), but *P. canariensis* is stronger and has bigger leaves. Historically in Spain there have been no major incidents with pathogens or pests in palms, but in recent years exotic pests have arisen as a result of the importation of palms from different countries. The most dangerous pests are the red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus* Oliv.) and the moth (*Paysandisia archon* Burm.). Prophylactic measures have been implemented such as quarantines, early detection, and the removal of infected palms. This procedure creates large amounts of biomass that are currently disposed of at a dumping site, though they could be used and valorized.

Particleboards have been generated using various species of palm trees as the main material such as date palm (Nemli *et al.* 2001; Hegazy and Aref 2010; Amirou *et al.* 2013; Saadaoui *et al.* 2013; Hegazy *et al.* 2015), Washingtonia palm (García-Ortuño *et al.* 2013), and oil palm (Laemsak and Okuma 2000; Hashim *et al.* 2011a; Rasat *et al.* 2011; Suhaly

et al. 2012; Wad Nadhari *et al.* 2013; Jumhuri *et al.* 2014; Henao *et al.* 2014; Tajuddin *et al.* 2016). The behavior of the particleboard depends on the species of palm tree and the origin of the particles from the trunk or the leaf. Current investigations in vegetal biomass aim to obtain binderless particleboards without adhesives.

Several reviews of research on binderless particleboards have been published. Recently, Pintiaux *et al.* (2015) analyzed pressure, time, and particle size for their influence on particleboards. One important factor in the manufacture of binderless particleboards is the press temperature. Binderless particleboards without pretreatments need high temperatures, and there are reduced possibilities to produce boards at temperatures below 125 °C (Suzuki *et al.* 1998; Laemsak and Okuma 2000; Pintiaux *et al.* 2015). By using higher temperatures (above 180 °C), longer time, and more pressure than in conventional panels, the mechanical properties and stability of the boards improves (Boon *et al.* 2013). However, a high press temperature is not recommended due to its energy consumption. According to Widyorini *et al.* (2005), the size and shape of the particles have an important effect on the properties of binderless particleboards. Thus, determining the range of size of the particles is a key parameter to strengthen the bonding. Another factor to consider is the moisture content. The presence of water in raw materials is crucial to the heat transfer during the hot press, and the ideal content is 8% by weight (Hidayat *et al.* 2014).

It is still difficult to clarify the self-bonding mechanism that occurs when the particles are pressed. This makes the costs of the process and the performance of the products noncompetitive (Zhang *et al.* 2015). Because the raw material has cellulose, hemicellulose, lignin, and polysaccharides, the self-bonding of natural fibers is most likely due to fusion/glass transition of the degradation of the lignin and hemicellulose, although the contribution of each component remains unknown. Alternatively, particle self-bonding could depend on the content of starch and sugars in the vegetable materials (Lamaming *et al.* 2013; Nonaka *et al.* 2013).

P. canariensis sap has been used traditionally as a natural sweetener to produce molasses and liquor. Its chemical composition is 37.8% sucrose, 9.5% glucose, and 4.8% fructose (Luis *et al.* 2012). This characteristic renders its biomass as an ideal candidate to study the self-bonding mechanism. This paper examined *P. canariensis* as a raw material to manufacture binderless particleboards at a low temperature and pressure. The influence of the size and nature of the particles was analyzed. The influence of the size and nature of the particles was analyzed. The results were compared with other authors, and SEM observations and EDS analysis were conducted in order to elucidate which processes are involved in the bonding.

EXPERIMENTAL

Materials

The raw material was the *Phoenix canariensis* palm tree. Palm residues were obtained from the Polytechnic School of Orihuela (Universidad Miguel Hernández de Elche). They were manually cut and classified into three groups: leaves, leaf sheaths, and trunks. From the first group, the leaflets were manually removed, leaving the rachis.

After 2 months exposed to open air in order to reduce the initial moisture content of 72±11%, the pieces were cut again in a laboratory-scale ring-knife chipper to obtain the particles, which were dried again in ambient conditions for 6 months, from March to August. During this period, particles were placed in layers of 5 cm thick and were manually

stirred every 2 days. The moisture reduction is shown in the Table 1, and was evaluated by following the Standard EN 322 (1993).

The particles were classified by size in a horizontal screen shaker with sieves of < 0.25 mm, 0.25 to 1 mm, and 1 to 2 mm.

Water was procured from the public water supply network.

Table 1. Moisture content (%) of the particles evaluated following the Standard EN 322 (1993)

Leaf sheath		Trunk		Rachis	
Chipped	Dried	Chipped	Dried	Chipped	Dried
55.76±1.66	8.76±0.81	54.81±0,45	7.76±0,47	53.94±0.86	7.63±0.34

Methods

Mats were formed manually in stainless steel frames with dimension of 700 mm x 400 mm. First 2000 g of particles were added, and 60 g of water (3% in weight) was sprayed over the surface. The mats were then pressed in a hot press under 2.6 MPa of pressure at 120 °C for 30 min. No adhesives or waxes were used.

Nine types of single-layer panels were made according to the part of the palm (rachis, leaf sheath, and trunk) and the particle size. Four replicate panels were made for each board type.

Table 2. Typologies of Particleboard

Type	Material	N	Particle diameter (mm)
1	Leaf sheath	4	< 0.25
2	Leaf sheath	4	0.25 to 1
3	Leaf sheath	4	1 to 2
4	Trunk	4	< 0.25
5	Trunk	4	0.25 to 1
6	Trunk	4	1 to 2
7	Rachis	4	< 0.25
8	Rachis	4	0.25 to 1
9	Rachis	4	1 to 2

All panels had dimensions of 600 mm × 400 mm × 6.825±0.415 mm after trimming the edges to avoid imperfections. After pressing, panels were placed in a vertical position to cool. Once cooled, samples were prepared to study the mechanical and physical properties of each of the nine types of panels. Prototypes were conditioned at 20 °C and 65% relative humidity prior to testing.

Physical and Mechanical Properties

From all 4 repetitions of each type of panel, samples were cut as shown in Fig. 1: 6 samples for MOR and MOE (1T, 2T, 3T, 1=, 2=, and 3=), 6 for density (3, 5, 6, 7, 8, and 9), 3 for IB (5, 6, and 8), and 3 for TS and WA (3, 7, and 9). The samples tested for density were reused, since the test does not ruin the samples. One sample that was used for thermal conductivity (λ) was thereafter divided into 3 samples, for the reaction to fire test.

The mechanical and physical properties of the boards were evaluated following the European standards for wood-based panels, as follows: density, EN 323 (1993); thickness swelling (TS) and water absorption (WA) after 2 and 24 h immersion, EN 317 (1993);

flexural strength (modulus of rupture [MOR] and modulus of elasticity [MOE], EN 310 (1997); and internal bonding strength (IB), EN 319 (1993). The panels were also classified according to EN 312 (2010).

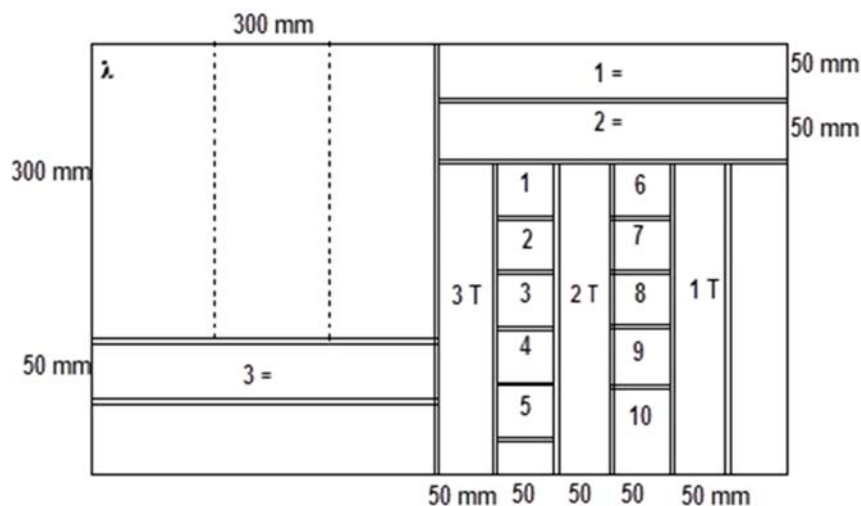


Fig. 1. Layout of the samples of the panels

Statistical Analyses

Data for each test were analyzed statistically using IBM SPSS Statistics v.22.0 software (IBM, New York, USA). From the average results, the standard deviation was obtained, and an analysis of variance (ANOVA) was conducted. Duncan test calculations ($P < 0.05$) were used to compare the differences among types.

Scanning Electron Microscopy (SEM)

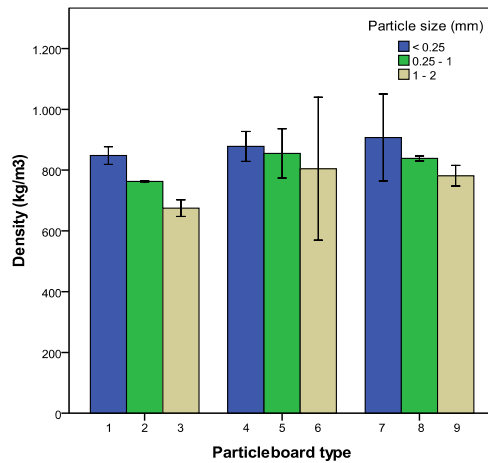
The morphology of the interior of the three raw materials was evaluated using a scanning electron microscope (Hitachi S3000N, Tokyo, Japan) equipped with an X-ray detector (Bruker XFlash 3001, Billerica, MA, USA). Elemental analysis (quantitative and semi-quantitative) was conducted by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Pictures were taken from fractured cross sections of 5 mm × 5 mm.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical Properties

The average values of the physical properties are shown in Figs. 2 and 3. Density ranged from 675.0 to 901.3 kg/m³, demonstrating that the panels had medium density. Bigger particles are more difficult to compress, resulting in thicker panels with less density.

Thickness swelling (TS) after 2 h depended on the raw material and on the particle size, as 1 to 2 mm boards were the more affected in all cases. TS after 24 h showed the same tendency as TS after 2 h but, in this case, the results of the types with particles of < 0.25 mm and 0.25 to 1 mm increased an average of 70% compared with an average of 28% of the boards made of particles of 1 to 2 mm.



Error bars: 95% IC

Fig. 2. Density of *P. canariensis* binderless particleboards

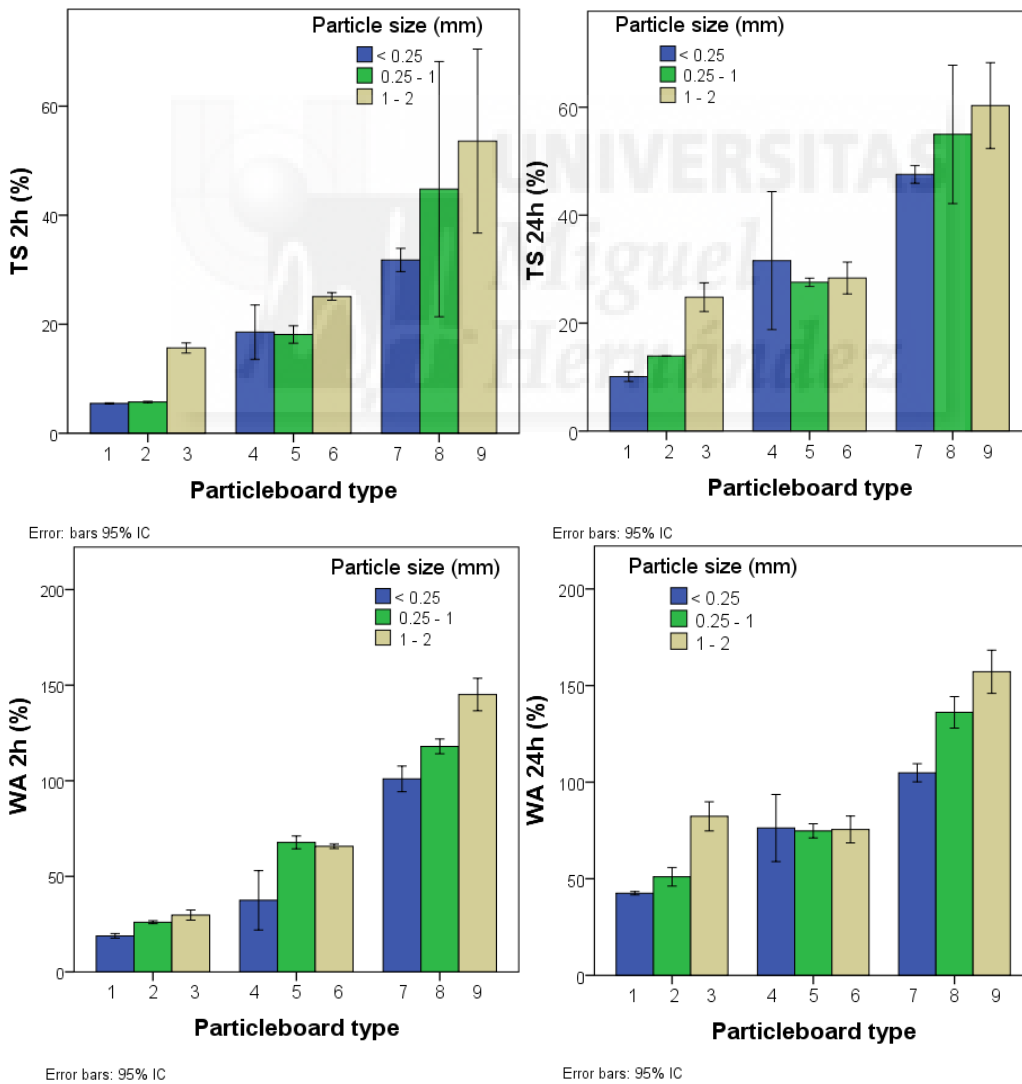


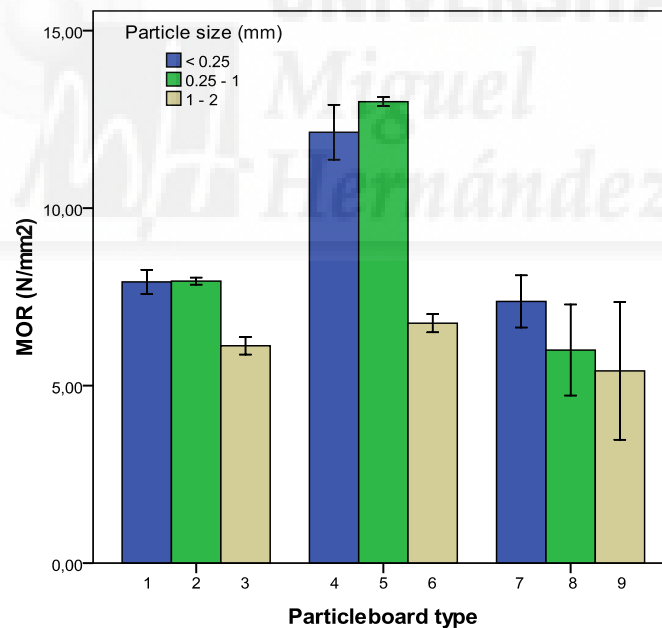
Fig. 3. Thickness swelling and WA values after 2 and 24 h for *P. canariensis* particleboards

There was a correlation between the results of TS and water absorption (WA). These results were probably caused by the porosity of the boards. Bigger particle size resulted in more porosity and less density. Once submerged, the gaps filled with water faster than the rest of the material.

In general, the physical properties of the particleboards depended on the material and particle size. Smaller particle size results in better physical behavior. The panels made of leaf sheath exhibited the lowest TS and WA followed by trunk panels and finally rachis boards.

Mechanical Properties

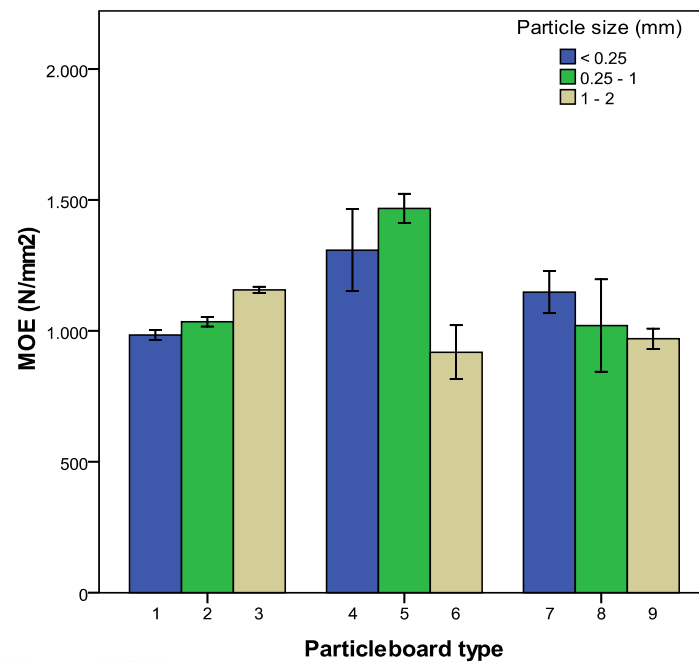
Flexural strength or modulus of rupture (MOR), the modulus of elasticity (MOE), and internal bonding strength (IB) test results are shown in Figs. 4, 5, and 6. The MOR values were higher in the samples made from trunk particles. This value depended on the material and particle size; poorer results were obtained with the biggest particle size for the three materials. Modulus of elasticity depended only on the raw material, reaching a maximum value of 1467.81 N/mm² (type 5) with particles of 0.25 to 1 mm from the trunk. Internal bonding strength test showed good results since ranged from 0.17 to 0.64 N/mm² and all but the type 9 panel exceeded the minimum requirement for a P1 type panel (EN 312 2010), which is 0.28 N/mm². This property depended on the raw material. Panels made from rachis had an average 40% lower IB compared with the others.



Error bars: 95% IC

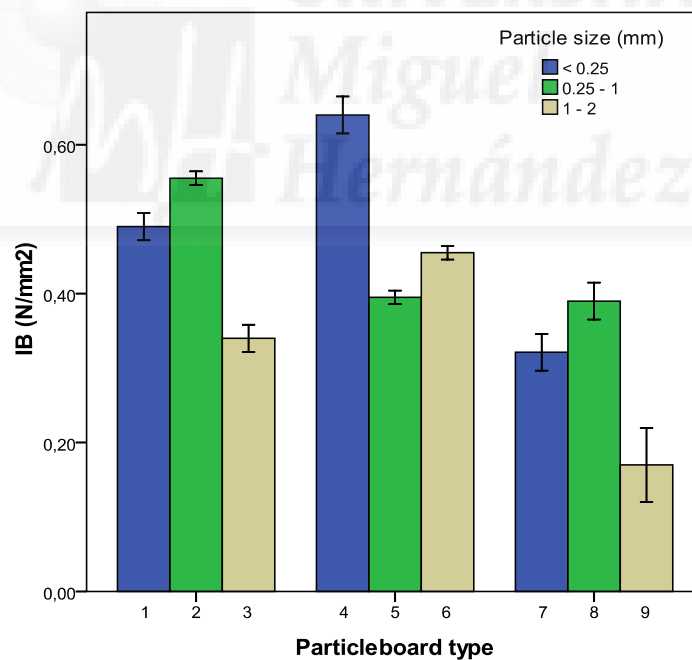
Fig. 4. Modulus of rupture values of *P. canariensis* binderless particleboards

In general, samples made from rachis had worse physical and mechanical properties with average values TS 24h and WA 24h of 54.32 and 132.53% and average values of MOR, MOE and IB of 6.26, 1045.92 and 0.29 N/mm². Samples made of leaf sheath had the best physical behavior with average values of TS 2h and WA 2h of 16.27 and 58.61%, and trunk panels had the best mechanical performance with average values of MOR, MOE and IB of 10.63, 1248.14 and 0.50 N/mm².



Error bars: 95% IC

Fig. 5. Modulus of elasticity values of *P. canariensis* binderless particleboards



Error bars: 95% IC

Fig. 6. Internal bonding strength values of *P. canariensis* binderless particleboards

Particle size had a profound effect on the board properties. According to EN 312 (2010), the minimum requirements for a P1 type panel (thickness from 6 to 13 mm) are a MOR value of 12.5 N/mm² and an IB value of 0.28 N/mm². There is no MOE requirement. The type 5 binderless particleboards (made from trunk of *P. canariensis* with particles of

0.25 to 1 mm) met these requirements (MOR and IB of 13.0 and 0.40 N/mm²) and could be implemented in general applications.

Several authors have studied the properties of binderless panels made of other palm tree species. The results from these studies are compared in Tables 3 and 4.

Table 3. Processing Parameters of Binderless Particleboards Made of Palm Trees

Reference	Material	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)	T (°C)	Pressure (MPa)	Time (min)	Particle size (mm)
Saadaoui <i>et al.</i> 2013	Date palm	1200	4	180	10	2	< 1.25
Hashim <i>et al.</i> 2011a	Oil palm	800	4.8	180	12	20	< 1
This study	<i>P. canariensis</i>	763.0, 838.5, 855.0	6.825	120	2.6	30	0.25 to 1

Table 4. Results of the Properties Obtained by the Authors of Table 3

Author	Material	Particle origin	TS 24 h (%)	WA 24 h (%)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)
Saadaoui <i>et al.</i> 2013	Date palm	Leaf sheath	150	100	8.4	928	0.13
		Rachis	210	270	8.5	927	0.04
Hashim <i>et al.</i> 2011a	Oil palm	Trunk (core)	20	60	13.37		0.71
		Leaf	40	98	11.52		0.2
		Rachis	75	130	2.0		0.01
This study	<i>P. canariensis</i>	Leaf sheath	13.90	51.01	7.95	1034.80	0.56
		Trunk	27.56	74.79	13.00	1467.82	0.40
		Rachis	55.22	136.13	6.00	1020.22	0.39

Using date palm, Saadaoui *et al.* (2013) manufactured particleboards with higher temperatures and pressure, but in shorter time than the present study. In their paper, the panels obtained had higher density and TS, and lower MOR, MOE, and IB than the panels made of *P. canariensis*, which, in comparison with the present study, indicated that *P. canariensis* biomass was more suitable for producing binderless particleboards than the date palm.

The results obtained by Hashim *et al.* (2011a) with oil palm are in accordance with those reported in this study. They concluded that the self-bonding mechanism could be due to the sugars, having used high temperatures and pressure. The process used in the present study had less energy consumption. Their trunk panels showed the best results, although the bark of the palm was removed. In contrast, the *P. canariensis* trunk panels included the bark. It is possible that the removal of this spongy tissue could improve the properties of the panels, but further research must be conducted.

In another study, the addition of 20% sucrose enhanced the properties of binderless panels made of date palm (Lamaming *et al.* 2013). Apparently, sugars play a key role in the self-bonding mechanism. Because *P. canariensis* sap contains 37.8% sucrose, this mechanism could be attributed to this high amount of sugar.

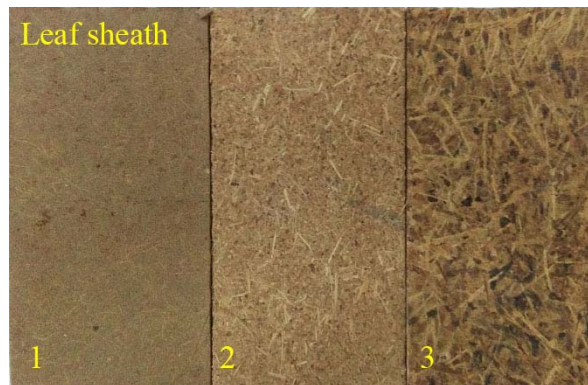


Fig. 7. Particleboards from leaf sheath of *P. canariensis* type 1 (<0.25), 2 (0.25-1), and 3 (1-2)

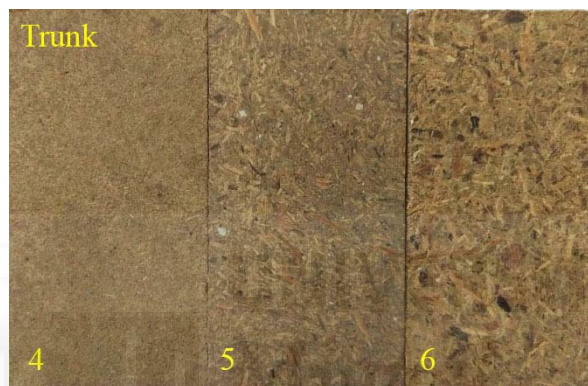


Fig. 8. Particleboards made from trunk of *P. canariensis* type 4 (<0.25), 5 (0.25-1), and 6 (1-2).



Fig. 9. Particleboards made from rachis of *P. canariensis* type 7 (<0.25), 8 (0.25-1), and 9 (1-2).

In the raw material, two types of particles were observed: slender white particles from the vascular bundles and small brown particles from the parenchymatous tissue. The physical and mechanical behavior was influenced by the amount of parenchymatous tissue, as noted by Hashim *et al.* (2011a).

As shown in Figs. 7, 8, and 9, the leaf sheath and trunk boards were darker than rachis panels, which could be explained by the higher amount of vascular bundle particles present in these parts of the palm tree.

SEM Observations and EDS Analysis

Cross section images of the leaf sheath, trunk, and rachis of *P. canariensis* are shown in Figs. 11, 12, and 13. The typical characteristics of the vascular bundles (fibers, vessels, and phloem embedded in the parenchymatous tissue) were observed, but no starch was found. The vascular bundles were covered by large amounts of siliceous phytoliths aligned in the trunk and rachis.

Similar to the particleboards, there was more parenchymatous tissue in the leaf sheath than in the rachis. As Mobarak *et al.* (1982) found in bagasse, this feature could increase the capacity of the particles to compress, resulting in a stronger bond and probably contributing to less TS in the leaf sheath and higher in the rachis particleboards.

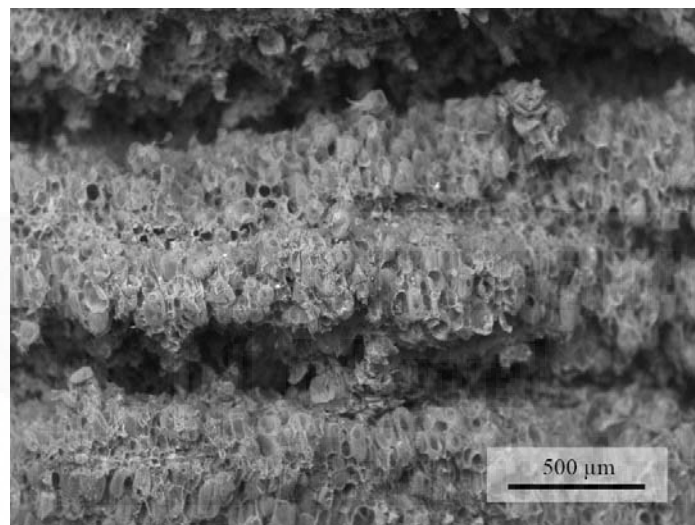


Fig. 11. Cross section micrograph of the leaf sheath

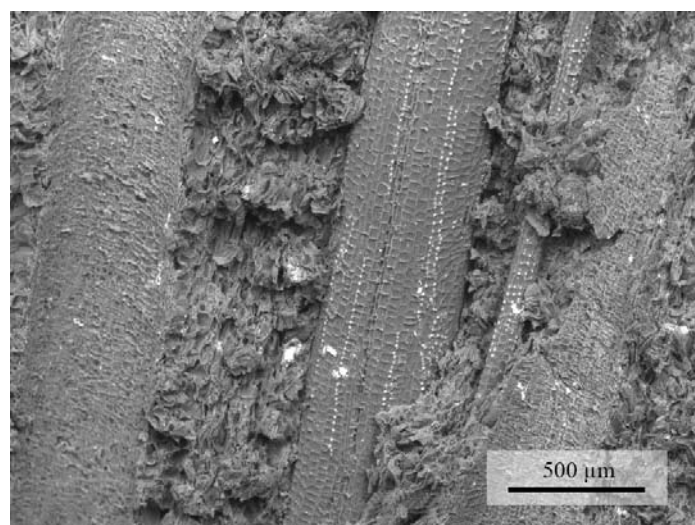


Fig. 12. Cross section micrograph of the trunk

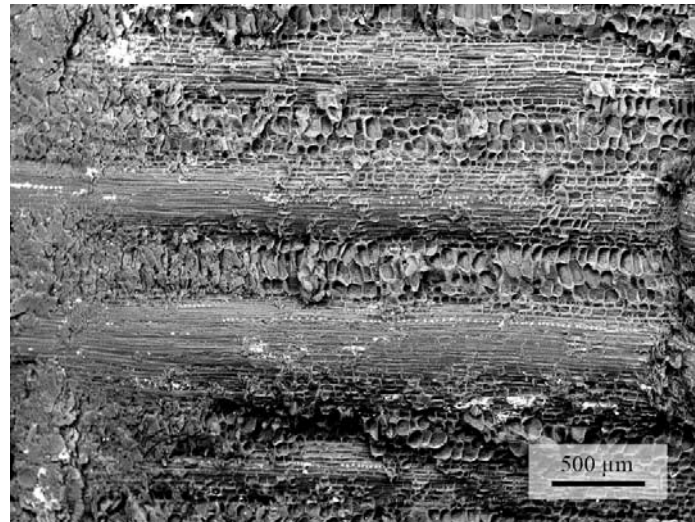


Fig. 13. Cross section micrograph of the rachis

The energy dispersive X-ray spectroscopy analysis results are shown in Table 5. The main difference in the composition of the tissues was that trunk samples had half of the amount of carbon atoms compared to the other tissues, but much more sulfur, potassium, and calcium. It is possible that these elements could have been present in oxide form because there was the same oxygen in the trunk as in the rachis and leaf sheath. Aluminum and phosphorus were found in the leaf sheath samples in tiny amounts, and there were more silicon and chlorine atoms in the rachis than in the other parts of the *P. canariensis*.

Silicon may influence the bonding (Hashim *et al.* 2011b), but this cannot be concluded from this study. Halvarsson *et al.* (2009) showed that the addition of CaCl_2 to wheat straw particles resulted in a 25% decrease in the WA of particleboards. In *P. canariensis*, the presence of Ca and Cl were higher in the leaf sheath and lower in the rachis, and this content could explain the TS and WA behavior of the panels.

Table 5. EDS Chemical Composition of Different Parts of the *P. canariensis*

Element	AN	Leaf Sheath		Trunk		Rachis	
		C norm. [wt.%]	C Atom. C [at.%]	C norm. [wt.%]	C Atom. C [at.%]	C norm. [wt.%]	C Atom. C [at.%]
Carbon	6	51.56	60.17	22.56	32.51	49.14	57.84
Oxygen	8	43.01	37.68	50.92	55.08	45.03	39.78
Magnesium	12	0.26	0.15			0.27	0.16
Silicon	14	0.14	0.07			0.70	0.35
Sulfur	16	0.25	0.11	7.54	4.07	0.44	0.19
Chlorine	17	1.11	0.44	0.50	0.24	1.94	0.78
Potassium	19	2.61	0.94	11.12	4.92	2.47	0.89
Aluminum	13	0.22	0.12				
Phosphorus	15	0.21	0.10				
Calcium	20	0.59	0.21	7.35	3.17		

Study of the Self-bonding Mechanism

The elucidation of the self-bonding mechanism in binderless particleboards has been discussed in several reviews. One popular theory attributes the bonding to the glass transition of cellulose, hemicellulose, and lignin. Anglés *et al.* (1999) reported that the values of the glass transition temperature of these biopolymers are, in dry state, 220 °C, 170 °C, and 200 °C, respectively. Pintiaux *et al.* (2015) reported that this process is extremely dependent on the moisture content. According to this analysis, the glass transition temperatures decrease as the moisture content increases. In this paper, panels were made at 120 °C and 11% of total moisture content (an initial 8% of the particles and the 3% of water sprayed before pressed), thus it was feasible that some carbohydrates reached the temperature of glass transition and helped in the self-bonding.

Another suggested mechanism of self-bonding is the hydrolysis of sugars. By pressing and heating the particles in an acid aqueous media, some of the sugars could have been transformed into furfural, which then would solidify into a thermosetting resin. Peleteiro *et al.* (2016) showed that furfural could be obtained from different lignocellulosic materials at temperatures that are in accordance to the present paper. In another study, Suzuki *et al.* (1998) stated that the steam explosion of oil palm particles produced furfural, and the self-bonding was attributed to the link of lignin-furfural.

CONCLUSIONS

1. It is feasible to manufacture binderless particleboards of *P. canariensis* at a low temperature (120 °C) and pressure (2.6 MPa).
2. The best performance in terms of mechanical properties was obtained by using trunk particles from 0.25 to 1 mm. They exceeded the MOR, MOE, and IB values for the P1 grade (EN 312 2010).
3. Raw material and particle size have a profound effect on the board properties.
4. The mechanism of self-bonding could be due to the high content of sugars. At the pressing temperature of 120 °C, some of the sugars could have been transformed into furfural, enhancing the bond.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge the support of the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain through the program “Retos,” project AGL2013-41612-R.

REFERENCES CITED

- Amirou, S., Zerizer, A., Pizzi, A., Haddadou, I., and Zhou, X. (2013). “Particleboards production from date palm biomass,” *European Journal of Wood and Wood Products* 71(6), 717-723. DOI: 10.1007/s00107-013-0730-3
- Anglès, M. N., Reguant, J., Montané, D., Ferrando, F., Farriol, X., and Salvadó, J. (1999). “Binderless composites from pretreated residual softwood,” *Journal of*

- Applied Polymer Science* 73(12), 2485-91. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990919)73:12<2485::AID-APP17>3.0.CO;2-G
- Boon, J. G., Hashim, R., Sulaiman, O., Hiziroglu, S., Sugimoto, T., and Sato, M. (2013). "Influence of processing parameters on some properties of oil palm trunk binderless particleboard," *European Journal of Wood and Wood Products* 71(5), 583-589. DOI: 10.1007/s00107-013-0712-5
- EN 310 (1993). "Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength," European Commission for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 312 (2010). "Particleboards–Specifications," European Commission for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 317 (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water," European Commission for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 319 (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board," European Commission for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 322 (1993). "Wood-based panels. Determination of moisture content," European Commission for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 323 (1993). "Wood-based panels. Determination of density," European Commission for Standardization, Brussels, Belgium.
- García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M. T., Ferrández-García, C. E., Medina, E., Parades, C., Perez-Murcia, M. D., and Moreno-Caselles, J. (2013). "Evaluation of the different uses of *Washingtonia robusta* pruning waste," *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44(1-4), 623-631. DOI: 10.1080/00103624.2013.745371
- Halvarsson, S., Edlund, H., and Norgren, M. (2009). "Manufacture of non-resin wheat straw fibreboards," *Industrial Crops and Products* 29(2-3), 437-445. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.08.007
- Hashim, R., Said, N., Lamaming, J., Baskaran, M., Sulaiman, O., Sato, M., Hiziroglu, S., and Sugimoto, T. (2011b). "Influence of press temperature on the properties of binderless particleboard made from oil palm trunk," *Materials and Design* 32(5), 2520-2525. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.01.053
- Hashim, R., Wan Nadhari, W. N. A., Sulaiman, O., Kawamura, F., Hiziroglu, S., Sato, M., Sugimoto, T., Seng, T. G., and Tanaka, R. (2011a). "Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass," *Materials and Design* 32(1), 246-254. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.059
- Hegazy, S. S., and Aref, I. M. (2010). "Suitability of some fast-growing trees and date palm fronds particleboard productions," *Forest Products Journal* 60(7-8) 599-604. DOI: 10.13073/0015-7473-60.7.599
- Hegazy, S., Ahmed, K., and Hiziroglu, S. (2015). "Oriented strand board production from water-treated date palm fronds," *BioResources* 10(1), 448-456. DOI: 10.15376/biores.10.1.448-456
- Heno, E. M., Quintana, G. C., and Ogunbile, B. O. (2014). "Development of binderless fiberboards from steam-exploded and oxidized oil palm wastes," *BioResources* 9(2), 2922-2936. DOI: 10.15376/biores.9.2.2922-2936
- Hidayat, H., Keijsers, E. R. P., Prijanto, U., Van Dam, J., and Heeres, H. (2014). "Preparation and properties of binderless boards from *Jatropha curcas* L. seed cake,"

- Industrial Crops and Products* 52, 245-254. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.10.024
- Jumhuri, N., Hashim, R., Sulaiman, O., Wan Nadhari, W. N. A., Salleh, K. M., Saharudin, N. I., and Razali, M. Z. (2014). "Effect of treated particles on the properties of particleboard made from oil palm trunk," *Materials and Design* 64, 769-774. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.053
- Laemsak, N., and Okuma, M. (2000). "Development of boards made from oil palm frond II: properties of binderless boards from steam-exploded fibers of oil palm frond," *Journal of Wood Science* 46, 322-326. DOI: 10.1007/BF00766224
- Lamaming, J., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Hashim, R., Said, N., and Sato, M. (2013). "Influence of chemical components of oil palm on properties of binderless particleboard," *BioResources* 8(3), 3358-3371. DOI: 10.15376/biores.8.3.3358-3371
- Luis, G., Rubio, C., Gutiérrez, A. J., Hernández, C., González-Weller, D., Revert, C., Castilla, A., Abreu, P., and Hardisson, A. (2012). "Miel de palma: Composición nutricional de un edulcorante natural," *Nutrición Hospitalaria* 27(2), 548-552.
- Mobarak, F., Fahmy, Y., and Augustin, H. (1982). "Binderless lignocellulose composite from bagasse and mechanism of self-bonding," *Holzforschung* 36(3), 131-135. DOI: 10.1515/hfsg.1982.36.3.131
- Nemli, G., Kalaycioglu, H., and Alp, T. (2001). "Suitability of date palm (*Phoenix dactylifera*) branches for particleboard production," *Holz als Roh- Werkst* 59(6), 411-412. DOI: 10.1007/s00107-001-0257-x
- Nonaka, S., Umemura, K., and Kawai, S. (2013). "Characterization of bagasse binderless particleboard manufactured in high-temperature range," *Journal of Wood Science* 59(1), 50-56. DOI: 10.1007/s10086-012-1302-6
- Peleteiro, S., Rivas, S., Alonso, J. L., Santos, V., and Parajó, J. C. (2016). "Furfural production using ionic liquids: A review," *Bioresource Technology* 202, 181-191. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.12.017
- Pintiaux, T., Viet, D., Vandenbossche, V., Rigal, L., and Rouilly, A. (2015). "Binderless materials obtained by thermo-compressive processing of lignocellulosic fibers: A comprehensive review," *BioResources* 10(1), 1915-1963. DOI: 10.15376/biores.10.1.1915-1963
- Rasat, M. S. M., Wahab, R., Sulaiman, O., Moktar, J., Mohamed, A., Tabet, T. A., and Khalid, I. (2011). "Properties of composite boards from oil palm frond agricultural waste," *BioResources* 6(4), 4389-4403. DOI: 10.15376/biores.6.4.4389-4403
- Saadaoui, N., Rouilly, A., Fares, K., and Rigal, L. (2013). "Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof," *Materials and Design* 50, 302-308. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.03.011
- Suhaily, S. S., Jawaid, M., Abdul Khalil, H. P. S., Mohamed, A. R., and Ibrahim, F. (2012). "A review of oil palm biocomposites for furniture design and applications: potential and challenges," *BioResources* 7(3), 4400-4423. DOI: 10.15376/biores.7.3.4400-4423
- Suzuki, S., Shintani, H., Park, S. Y., Saito, K., Laemsak, N., Okuma, M., and Iiyama, K. (1998). "Preparation of binderless boards from steam exploded pulps of oil palm (*Elaeis guineensis* Jaxq.) fronds and structural characteristics of lignin and wall polysaccharides in steam exploded pulps to be discussed for self-bindings," *Holzforschung* 52(4), 417-426. DOI: 10.1515/hfsg.1998.52.4.417
- Tajuddin, M., Ahmad, Z., and Ismail, H. (2016). "A review of natural fibers and processing operations for the production of binderless boards," *BioResources* 11(2), 5600-5617. DOI: 10.15376/biores.11.2.5600-5617

- Wad Nadhari, W. N. A., Hashim, R., Sulaiman, O., Sato, M., Sugimoto, T., and Selamat, M. E. (2013). "Utilization of oil palm trunk waste for manufacturing of binderless particleboard: optimization study," *BioResources* 8(2), 1675-1696. DOI: 10.15376/biores.8.2.1675-1696
- Widyorini, R., Xu, J., Umemura, K., and Kawai, S. (2005). "Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse. I: effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process," *Journal of Wood Science* 51(6), 648. DOI: 10.1007/s10086-005-0713-z
- Zhang, D., Zhang, A., and Xue, L. (2015). "A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism," *Wood Science and Technology* 49(4), 661-679. DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6

Article submitted: May 4, 2017; Peer review completed: July 14, 2017; Revised version received and accepted: July 20, 2017; Published:

