

2019

## Planteamiento de alternativas para la reutilización del Drywall como residuo de construcción y demolición-RCD en Colombia

Juliana Alejandra Guzmán Cañón  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)



Part of the [Environmental Engineering Commons](#)

---

### Citación recomendada

Guzmán Cañón, J. A. (2019). Planteamiento de alternativas para la reutilización del Drywall como residuo de construcción y demolición-RCD en Colombia. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1179](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1179)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).



PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL DRYWALL  
COMO RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN-RCD EN COLOMBIA

JULIANA ALEJANDRA GUZMAN CAÑÓN

Trabajo de grado para optar al título de

Ingeniera Ambiental y Sanitaria

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PORGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA  
BOGOTÁ D.C.  
2019

PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL DRYWALL  
COMO RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN-RCD EN COLOMBIA

JULIANA ALEJANDRA GUZMAN CAÑÓN

Trabajo de grado para optar al título de

Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Directora

Dr. Arq. PAULA ANDREA CIFUENTES RUIZ

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PORGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA  
BOGOTÁ D.C.  
2019

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, a mi mamá, a mi hermana, a mi sobrina y a mi papá por haberme apoyado incondicionalmente durante todos estos años, por hacer de mí una persona más humana y por brindarme la oportunidad de estudiar en una universidad que me formó no solo como profesional sino también como un ser social dispuesto a servir incondicionalmente.

También quiero agradecer a mi directora de investigación y de semillero la Arquitecta Paula Andrea Cifuentes Ruíz, por haberme tenido en cuenta dentro de su semillero de investigación; por haber confiado en mí y por brindarme sus conocimientos, experiencia, tiempo y direccionamiento. Esta ha sido una de las experiencias más enriquecedoras que he podido tener, ya que me permitió conocer otro tipo de enfoques y profesionales de diferentes áreas.

De igual manera, quiero agradecer a los maestros del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, a los de Ingeniería Civil y a los de Arquitectura que me brindaron su apoyo para poder llevar a cabo mi formación profesional y el desarrollo de este proyecto.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeras y colegas Paula Bustos, Laura Amariles Guzmán y Stefania Jaramillo Quecan quienes me brindaron su amistad y apoyo incondicional cuando lo necesité.

**Tabla de contenido**

Glosario.....	1
Capítulo 1 Introducción, objetivos y alcance.....	6
1.1.  Introducción.....	6
1.2.  Planteamiento del problema .....	8
1.3.  Justificación.....	9
1.4.  Objetivos .....	11
1.5.  Alcance.....	11
Capítulo 2 Marco de referencia.....	13
2.1.  Marco teórico .....	13
2.2.  Marco legal.....	23
Capítulo 3 Metodología .....	33
3.1.  Fase 1: Revisión de impactos ambientales del ciclo de vida del Drywall.....	33
3.2.  Fase 2: Alternativas de aprovechamiento del Drywall.....	35
3.3.  Fase 3: Alternativas en Colombia .....	36
Capítulo 4: Desarrollo de la metodología .....	39
4.1.  Análisis de procesos de la producción del Drywall .....	39
4.2.  Análisis de Ciclo de Vida-ACV del Drywall .....	43
4.3.  Estudios realizados .....	52
4.4.  Marco de referencia de la Economía Circular .....	48

4.5. Empresas relacionadas con el Drywall en Colombia .....	51
4.6. Planteamiento e identificación de alternativas .....	54
4.7. Evaluación de alternativas para el manejo del Drywall. ....	55
4.8. Selección de alternativas para el manejo del Drywall.....	62
Capítulo 5: Análisis y discusión de resultados .....	66
5.1. Análisis del Ciclo de Vida del Drywall.....	66
5.2. Análisis de las alternativas de referencia que utilizaron ACV .....	68
5.3. Análisis de las alternativas propuestas .....	72
Capítulo 6: Conclusiones .....	74
Capítulo 7: Recomendaciones.....	78
Referencias Bibliográficas .....	79

**Índice de tablas**

Tabla 1 Grupo de clasificación de los RCD.....	13
Tabla 2 Clasificación del Drywall como RCD en Bogotá.....	15
Tabla 3 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida.....	49
Tabla 4 Contribución al calentamiento global por proceso. ....	50
Tabla 5 Cuadro comparativo de los escenarios de referencia.....	55
Tabla 6 Cuadro comparativo ventajas y desventajas del aprovechamiento del Drywall..	48
Tabla 7 Empresas gestoras del Drywall en Bogotá. ....	53
Tabla 8 Listado de aspectos alternativa A .....	58
Tabla 9 Análisis de estrategias alternativa A.....	58
Tabla 10 Listado de aspectos alternativa B.....	59
Tabla 11 Análisis de estrategia alternativa B.....	59
Tabla 12 Listado de aspectos alternativa C.....	60
Tabla 13 Análisis de estrategia alternativa C.....	60
Tabla 14 Listado de aspectos alternativa D .....	61
Tabla 15 Análisis de estrategia alternativa D. ....	61
Tabla 16 Resumen análisis de estrategias de las alternativas. ....	62

## Índice de figuras

Figura 1 Proceso productivo del yeso y uso en la industria.....	17
Figura 2 Placa estándar. ....	18
Figura 3 Placa H (Hidrófuga) .....	18
Figura 4 Placa F (Anti-fuego).....	19
Figura 5 Placa D (Alta dureza) .....	19
Figura 6 Metodología para el desarrollo del proyecto de investigación. ....	38
Figura 7 Proceso de producción del Drywall.....	40
Figura 8 Proceso del ACV del Drywall .....	44
Figura 9 Grafica del Perfil ambiental.....	47
Figura 10 Modelo de fin de ciclo de vida del Drywall. ....	51
Figura 11 Cemento reciclado.....	57
Figura 12 estabilización de suelos .....	59
Figura 13 Ciclo de reciclaje del Drywall en Brasil.....	43
Figura 14 Ciclo del yeso comercial y reciclado.....	47
Figura 15 Modelo de negocio para incorporar la Economía Circular. ....	49
Figura 16 Diferencia de la EC y otros conceptos similares. ....	51
Figura 17 Residuos que se han gestionado por MAAT .....	54
Figura 18 Organización matriz DOFA. ....	56



## Glosario

***Drywall:*** El Drywall o placa de yeso (Gypsum board or Plasterboard) como material de construcción, consiste en una placa de yeso laminado entre dos capas de cartón. Las materias primas más importantes que contiene este material es el yeso y la celulosa, pero también pueden variar según el tipo de aplicación (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017).

**Sistema Drywall:** Es un sistema es que es muy liviano, resistente al fuego, térmico, acústico y sísmicamente resistente. Está compuesto por perfiles metálicos unidos por tornillos, luego son revestidos por Drywall (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017).

***Residuos de Construcción y Demolición-RCD:*** Anteriormente eran conocidos como escombros y son los residuos provenientes de las actividades de excavación, construcción y demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas entre los cuales se pueden encontrar RCD susceptibles y no susceptibles de aprovechamiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

***RCD susceptibles a aprovechamiento:*** pueden ser materiales productos de excavación y sobrantes de la adecuación del terreno, productos de cimentación y pilotaje, materiales pétreos y los materiales no pétreos (cartón -yeso (Drywall), entre otros. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

***RCD no susceptibles de aprovechamiento:*** Son los materiales que están contaminados con residuos peligrosos, también que por el estado en que se encuentran no pueden ser aprovechados, y los que tengan características de alta peligrosidad que van a estar regidos por una normativa especial. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Residuos peligrosos:** son considerados como fuentes de riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Estos residuos generados a partir de actividades industriales, agrícolas, de servicios y aún de las actividades domésticas (DESARROLLO, 2005).

**Almacenamiento:** Es la ubicación temporal de los RCD en los recipientes contenedores y/o depósitos para su recolección y transporte con fines de aprovechamiento o disposición final. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Aprovechamiento de RCD:** Es el proceso que comprende la reutilización, tratamiento y reciclaje de los RCD con el fin de realizar su incorporación al ciclo económico. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Demolición selectiva:** Es la actividad planeada de desmantelamiento que busca obtener el aprovechamiento de los residuos de una demolición. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Gestión integral de RCD:** Es un conjunto de actividades dirigidas a prevenir reducir, aprovechar y disponer finalmente los RCD. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Generador de RCD:** Es la persona natural o jurídica que en ocasión de la realización de actividades de construcción demolición, reparación o mejoras locativas genera RCD. Existen los grandes generadores, quienes requieren de la expedición de una licencia de construcción de cualquiera de sus modalidades y/o licencia de intervención y pequeños generadores que no requiere de licencia de construcción (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Gestor de RCD:** Es la persona que realiza actividades de recolección, transporte, almacenamiento, aprovechamiento y/o disposición final de RCD. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Sitio de disposición final de RCD:** es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de RCD, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando los principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de dichos residuos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Reciclaje de RCD:** Es el proceso mediante el cual se transforman los RCD en materia prima o insumos para la producción de nuevos materiales de construcción. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).

**Centros de Aprovechamiento y Tratamiento:** Sitio en el que se separan, clasifican, tratan y almacenan temporalmente de los RCD (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

**Recuperadores específicos:** se refiere a la persona natural o jurídica que realiza actividades de aprovechamiento de RCD diferentes a los pétreos y tierras de excavación (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

**Impacto ambiental:** alteración o perturbación al medio ambiente por parte del desarrollo de un proyecto o actividad en un área determinada, la actividad es realizada por el hombre o por la naturaleza (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017).

**Aspecto ambiental:** elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el ambiente. Este puede presentar mejora o deterioro de acuerdo con el impacto ambiental (SDA, 2013).

***Ciclo de vida:*** se refiere a las etapas que se llevan a cabo en un orden consecutivo, las cuales se relacionan por medio del sistema de un producto, desde la obtención de la materia prima o de su producción desde el uso de los recursos naturales hasta la disposición final de este como residuo (ISO - INCONTEC, 2007).

***Análisis de ciclo de vida (ACV):*** es la recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales que se pueden encontrar durante el ciclo de vida del producto (ISO - INCONTEC, 2007).

***Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV):*** es la primera fase de la metodología descrita en la ISO 14040 para el desarrollo del AVC, esta implica la recopilación y cuantificación de las entradas y salidas de cada proceso que se lleva a cabo para la producción del producto través de su ciclo de vida (ISO - INCONTEC, 2007).

***Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV):*** es la segunda fase descrita en la metodología de la norma ISO 14040 para el desarrollo del ACV, en donde se evalúa la importancia que tienen los impactos ambientales potenciales a través de todo el ciclo de vida del producto (ISO - INCONTEC, 2007).

***Análisis DOFA:*** es una herramienta de diagnóstico y análisis para la generación creativa de posibles estrategias a partir de la identificación de los factores internos y externos de un proyecto. Se identifican las áreas y actividades que tienen el mayor potencial para un mayor desarrollo y mejora y que permiten minimizar los impactos negativos del contexto, estos impactos se hacen en relación con antes del proyecto y después del proyecto (Universidad Nacional, 2015).

***Huella de carbono:*** representa de forma numérica la cantidad de Gases Efecto Invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Espíndola & Valderrama, 2012, p. 1).

***Economía Circular:*** Es un nuevo modelo de economía que promueve al máximo reintroducir los materiales a un ciclo productivo, relacionado específicamente con la sostenibilidad es decir el aspecto social, económico y ambiental. Se ha estado promoviendo para evaluar un sistema más eficiente en el manejo de los RCD (Ghisellini, Ripa, & Ulgiati, 2018).

## Capítulo 1 Introducción, objetivos y alcance

### 1.1.Introducción

Esta investigación hace parte del programa “Desarrollo de procesos ambientalmente sostenibles para el planteamiento y construcción utilizando materiales tipo-RCD” presentado en el “International Research Alliance Program” aprobado por VRIT de la Universidad de La Salle. Este programa se subdividió en dos proyectos, de los cuales en el presente documento se está desarrollando el de la “Evaluación del impacto ambiental ocasionado por los Residuos de la Construcción y Demolición-RCD y propuestas de reutilización”.

Respecto al proyecto de investigación es necesaria la formulación de propuestas de aprovechamiento del Drywall, debido a varias razones, dentro de las principales se encuentran las siguientes: es un material que al terminar su ciclo de vida se convierte en un RCD de carácter especial y según la Secretaria Distrital de Ambiente es un material no aprovechable (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014), pero existen varias investigaciones desarrolladas en países como España, Brasil, Inglaterra, Países Bajos, entre otros , donde se han propuesto diferentes alternativas de aprovechamiento, además es un material que se puede aprovechar totalmente y es muy económico (Geraldo et al., 2017a; Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2016; Pantini, Giurato, & Rigamonti, 2019; Pedreño-Rojas, Flores-Colen, De Brito, & Rodríguez-Liñán, 2019).

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que las principales materias primas del Drywall es el yeso y el papel. Respecto a las alternativas de aprovechamiento que se encontraron, ninguna considero el aprovechamiento del papel; sin embargo, en algunas de las investigaciones utilizaron agregados como papel Kraft de las bolsas de cemento (Araújo, Calil, Savastano, Tubino, & Carvalho, 2008).

De acuerdo con, la USGS (United States Geological Survey), afirmó que el sector de la construcción es el que está generando mayor consumo de los recursos naturales (Suárez, Calderón, Gassó, & Roca, 2018). Es por lo anterior que se deben proponer alternativas de aprovechamiento eficientes, como soluciones que ayuden a mitigar los problemas ambientales actuales relacionados con los Residuos de Construcción y Demolición-RCD entre los cuales se encuentran temas relacionados con el agotamiento de los recursos naturales, problemas a la salud humana, disminución de la calidad de los ecosistemas y emisiones que contribuyen al calentamiento global.

Para tener mayor conocimiento sobre los problemas ambientales generados por los RCD, fue necesario realizar el Análisis de Ciclo de Vida-ACV del material para un caso en Colombia, específicamente para Bogotá, con el fin de entender cuáles son los procesos que más impactan dentro de la industria del Drywall, además de explicar la importancia de porque exponer alternativas de aprovechamiento del material en el país. Para el desarrollo de la metodología de ACV se basó en la norma ISO 14040 de 2006 y se utilizó el software de SimaPro junto con las bases de datos de Ecoinvent.

La metodología de ACV se utiliza para poder realizar comparaciones entre las categorías de impactos por proceso, entre procesos y por categorías de daño (Icontec, 2007), las cuales van a variar dependiendo de la metodología de evaluación que se escoja. Para esta investigación se utilizó IMPACT 2002+ principalmente por dos razones, la primera es que dentro de los artículos de referencia usan esta metodología y sirve para poder comparar los resultados obtenidos y segundo porque recopila cuatro metodologías diferentes donde se evalúan quince categorías de impacto y cuatro categorías de daño, lo que al analizar la información permita tener más elementos para incluir dentro de esta investigación.

Por otro lado, se consideró el marco legal vigente en Colombia y de otros países a modo de referencia tales como: Australia, Estados Unidos, China, Japón, España, Países Bajos, Alemania y normas Europeas generales relacionadas con el Drywall, tanto como material de construcción como residuo. Es importante considerar lo que se ha hecho en los otros países con el fin de entender que hace falta y de qué forma se podría mejorar la eficiencia del sistema actual en cuanto a normatividad y políticas sobre aprovechamiento del Drywall reciclado en Colombia, además para la formulación de las propuestas se tuvo en cuenta el término de Economía Circular ya que dentro de este concepto se relaciona específicamente el tema de Desarrollo Sostenible.

Siguiendo con lo anterior, además del marco legal, se tuvieron en cuenta las investigaciones realizadas en diferentes países sobre el aprovechamiento del material como RCD para tener información de referencia y así poder evaluar la posibilidad de aplicar estas alternativas de aprovechamiento en Colombia.

Finalmente, fue necesario tener en cuenta las empresas relacionadas con el Drywall en cuanto a producción, Centros de Tratamiento y Aprovechamiento- CTA y recuperadores específicos (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019), para poder exponer las propuestas de aprovechamiento en Colombia, teniendo en cuenta áreas de aplicación como la arquitectura, la ingeniería Ambiental y la ingeniería civil principalmente, teniendo en cuenta el marco de aplicación del programa de investigación.

## **1.2.Planteamiento del problema**

En Colombia la industria de la construcción está generando cada vez más RCD, dentro de los cuales se encuentra el Drywall, el cual es un material de construcción liviana y relativamente nuevo en el país. Debido a esto último, existe un desconocimiento sobre las consecuencias que



habría por una mala disposición final del material y muchas veces se mezcla con residuos que hacen que este pase de ser un residuo de carácter especial a uno de tipo peligroso.

Por otro lado, cuando el material se dispone en sitios adecuados y autorizados por los entes gubernamentales encargados de los temas ambientales, existe otra problemática y es que los RCD son residuos que no son compactables, por lo que ocupan más espacio y en consecuencia requieren de grandes extensiones de tierra para poder terminar su ciclo de vida.

### **1.3. Justificación**

El Drywall es un material de construcción liviana que empezó a ser utilizado en Colombia en el siglo XX, a partir de los años 80 (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017). Antes, solo se utilizaban materiales pesados como el ladrillo, cemento y tejas para todas las construcciones ya que daban una sensación de resistencia y durabilidad (Construdata, 2014).

Siguiendo con lo anterior, desde que se empezó a utilizar el Drywall se evidencio una falta de conocimiento frente al uso y disposición de este material. A comparación de Colombia hay países que llevan utilizando este material desde hace mucho tiempo, como Estados Unidos que lleva manejándolo desde 1916 (Construdata, 2014), razón por la cual tienen mayor experiencia en el uso del material y de sistemas constructivos modulares como lo es el sistema Drywall, lo cual al momento de una demolición permite la deconstrucción (Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2018) de casas y edificios, es decir que es posible separar los materiales de construcción para llevarlos a procesos de aprovechamiento y reutilización óptimamente.

En Colombia no existen estadísticas actualizadas sobre la cantidad y caracterización de los RCD y solo hay datos de hace varios años sobre la cantidad que estaba generando en solo algunas ciudades. Basándose en una investigación realizada en España se están generando entre 0,02% y

0,04% de residuos de Drywall (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017; Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2016). De acuerdo con la estadísticas del 2014 de Bogotá se estaban generando alrededor de 6'595.570 ton/año (Forero, 2016). Es decir que, de acuerdo con los porcentajes, se estaban produciendo entre 13.191,14 ton/año y 26.382,28 ton/ año de solo residuos de Drywall.

De acuerdo con el problema de la investigación, las alternativas de aprovechamiento podrían servir como una solución óptima para la reducción de la generación de Drywall como RCD en los rellenos sanitarios, ya que además de ocupar espacio genera graves impactos sobre el medio ambiente cuando entra en contacto con humedad o con residuos orgánicos debido a que genera gases, que cuando se emiten a la atmosfera además de contribuir al calentamiento global, pueden entrar al recurso hídrico por medio de la lluvia (Geraldo et al., 2017b; Hooper et al., 2010; Kang, Chang, & Kim, 2018a; Sierra, 2017) no solo afectando la calidad de los recursos naturales sino que puede llegar a ser potencialmente peligroso para la salud humana, si se emite en grandes cantidades.

Por otro lado, se ha demostrado que es posible el aprovechamiento del material dentro de un marco del desarrollo sostenible de acuerdo con las investigaciones de referencia, es decir que no solo se ha visto la viabilidad a nivel ambiental, sino que también, dentro de los procesos de aprovechamiento se ha incluido la parte social y económica en donde se encuentran involucrados tanto los entes gubernamentales como entes privados como las empresas, instituciones académicas que desarrollan la parte de investigación. Por lo anterior, es posible poder aplicar las alternativas de aprovechamiento del Drywall en Colombia, siempre y cuando haya un interés por parte de todos los entes involucrados.

## **1.4.Objetivos**

### **Objetivo general.**

Plantear alternativas para la reutilización del Drywall como Residuo de Construcción y Demolición-RCD en Colombia

### **Objetivos específicos.**

- Revisar los Impactos generados durante el proceso productivo del Drywall haciendo uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida-ACV.
- Explicar las alternativas de aprovechamiento que se hayan realizado a nivel local, nacional e internacional con el Drywall como RCD.
- Identificar las alternativas que se pueden aplicar en Colombia.

## **1.5.Alcance**

Para el desarrollo de la metodología de ACV para el Drywall en Colombia fue necesario tener en cuenta el caso de Bogotá específicamente, debido a que la información debe ser exacta respecto al tema de los transportes de las materias primas, insumos, producto final, mercadeo del material, disposición final y/o reciclaje. Además, se consideraron valores del consumo energético y combustibles fósiles dentro del proceso productivo.

Por otro lado, con esta investigación se busca explicar las alternativas de aprovechamiento para el Drywall que se han realizado a nivel local, nacional e internacional, pero también se busca evaluar si es posible aplicar las alternativas al contexto colombiano, ya que hay diferentes aspectos y condiciones que no permiten el desarrollo de algunas alternativas como pueden ser limitantes en cuanto al transporte, las distancias, la disponibilidad de las empresas, la normatividad, entes

regulatorios que se encarguen de monitorear y hacer seguimiento tanto a la información relacionada con los RCD como con los mismos procesos de aprovechamiento, entre otros.

La finalidad del proyecto es poder brindar soluciones a los problemas ambientales que hay actualmente debido a la disposición final de los RCD, ya este proceso lleva consigo grandes impactos negativos sobre los recursos naturales como emisiones de material particulado, gases contaminantes, lixiviados y sustancias contaminantes para el suelo. Por otro lado, es una buena oportunidad para empezar a proponer soluciones, con ayuda de la Economía Circular-EC, ya que este modelo económico busca que haya un beneficio ambiental, incluyendo la parte social y la parte económica, ya que deben crearse modelos que sean rentables y que al mismo tiempo tengan un aporte valioso para mejorar la calidad del medio ambiente.

## Capítulo 2 Marco de referencia

### 2.1.Marco teórico

#### 2.1.1. ¿Que son los Residuos de Construcción y Demolición?

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), son residuos que se generan más comúnmente en zonas urbanas y son diferentes a lo que se conoce como Residuos Sólidos Urbanos (RSU), entre los cuales están los residuos domiciliarios y comerciales. (Sierra, 2017). Los RSU se componen por los residuos orgánicos e inorgánicos, teniendo como principal característica que estos no son de carácter peligroso.(SDA, 2013)

Al contrario de los RSU los RCD son residuos compuestos por elementos o materiales inertes, tales como suelos y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, ferrallas, madera, entre otros.(Sierra, 2017). En general son residuos que se generan de los procesos constructivos.

#### 2.1.2. Tipos de RCD.

Los RCD se clasifican por categoría, grupo, clase y componentes. Para el primero se dividen en aprovechables y los no aprovechables (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014), en cuanto a los grupos se clasifican de la siguiente manera (Tabla 1).

*Tabla 1 Grupo de clasificación de los RCD.*

<b>GRUPO</b>
<b>I-Residuos comunes mezclados.</b>
<b>II- Residuos de material fino.</b>
<b>III- Residuos comunes no inertes</b>
<b>IV- Residuos metálicos</b>
<b>V- Residuos orgánicos.</b>
<b>VI- Residuos contaminantes</b>

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014).

Respecto a la clase de residuos se refiere específicamente a qué tipo de RCD existen, entre los cuales se encuentran los residuos pétreos, residuos finos no expansivos, residuos finos expansivos, residuos no pétreos, residuos de carácter metálico, residuo de pedones, residuos de cespedones, peligrosos, especiales y contaminados. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014).

Según la (Tabla 2) el Drywall es un residuo no aprovechable y especial. Se denominan Residuos Especiales a los objetos, elementos o sustancias que se rechazan o que no se aprovechan fácilmente debido a que pueden ser potencialmente patógenos, tóxicos, combustibles, inflamables, explosivos, radiactivos o volatilizables (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014). Por otro lado, otra de las razones por las que se clasifican en esta categoría es porque debido a su calidad, cantidad, magnitud, volumen o peso puede transformarse en un residuo peligroso, razón por la cual debe haber un manejo especial. (Agencia presidencial de cooperación internacional de Colombia- APC, 2015).

Tabla 2 Clasificación del Drywall como RCD en Bogotá.

<b>Clasificación de los Residuos de Construcción y Demolición-RCD</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Grupo</b>	<b>Clase</b>	<b>Componentes</b>
<b>RCD no aprovechables</b>	VI- Residuos contaminantes	Residuos peligrosos	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, asfaltos, resinas, plastificantes, tintas, betunes, barnices, tejas de asbesto, escorias, plomo, cenizas volantes, luminarias convencionales y fluorescentes, desechos explosivos, entre otros.
		Residuos especiales	Poliestireno-Icopor, cartón-yeso (drywall), lodos residuales de compuestos.
		Residuos contaminados	Materiales que pertenecen a los grupos anteriores y que se encuentran contaminados por residuos especiales o peligrosos.

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014, p. 8).

### 2.1.3. Gestión y aprovechamiento de los RCD

La generación de RCD es un indicador del desarrollo en cuanto a infraestructura y servicios de vivienda y transporte. De acuerdo con el Observatorio Ambiental de Bogotá, para el año 2018 el porcentaje de aprovechamiento de RCD fue de 26,43%, por encima de la norma (Resolución 1115 de 2012) que debe ser del 25% (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2019).

Existe una problemática y que es constante, sobre el gran impacto que hay en el medio ambiente al tener que utilizar grandes extensiones de terreno para la disposición final de los RCD.(Sierra, 2017). En países como España, Brasil, Estados Unidos y Canadá realizan un aprovechamiento óptimo de este material ya que cuentan con investigaciones, que se tomaron como referencia para la investigación y también tienen normatividad específica para el Drywall tal y como se puede observar en el marco legal.

Para el caso de Colombia falta apoyo para las investigaciones sobre recuperación y aprovechamiento del Drywall, normatividad y políticas, además es necesario mejorar la gestión por parte de los entes públicos encargados del manejo de los RCD.

#### 2.1.4. ¿Qué es el Drywall?

El Drywall es uno de los materiales más modernos de la construcción, debido a que empezó a tomar fuerza desde los años 80 en Colombia (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017); sin embargo, debido al gran consumo energético que hay al momento de su producción y también debido a la cantidad de residuos que este genera al momento de construir hay impactos negativos sobre diferentes aspectos ambientales (Geraldo et al., 2017b).

Las placas de Drywall están constituidas por: yeso- sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), con más del 85% de la composición del Drywall, papel (celulosa) con menos del 10%, almidón con menos del 3% y sílice cristalina con menos del 5%. También, dependiendo del tipo de placa puede contener fibra de vidrio y ácido bórico con menos de 1% y por último sulfato de calcio con menos del 5% (Subdirección de prácticas comerciales, 2016, p. 5).

Como el yeso se utiliza para diferentes tipos de aplicaciones, debe cumplir un estándar para poder ser utilizado en el Drywall para lo cual debe contener 32.6 % de CaO (Oxido de calcio) 46.5%  $\text{SO}_3$  (Trióxido de sulfato) y 20 %  $\text{H}_2\text{O}$  (agua) (Ecoingeniería, 2005). Por otro lado, el sulfato de calcio dihidratado es más conocido como yeso agrícola ya que se usa para tratar suelos ácidos (Dirección General de Desarrollo Minero, 2016).

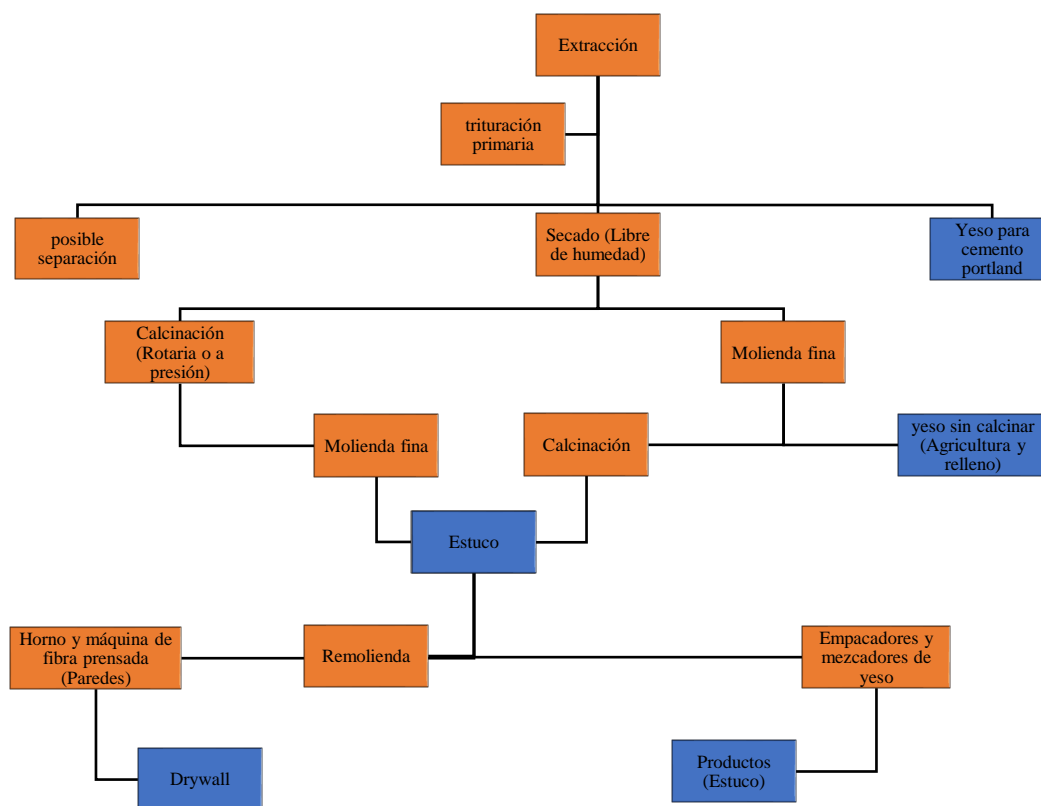
El yeso es una roca de origen sedimentario compuesto por varios iones entre los cuales está el sulfato cálcico, este se puede encontrar en varios lugares del mundo y en diferentes condiciones. (Sanchez Henao, 2003) por lo que no siempre se puede utilizar cualquier yeso para la producción de Drywall ya que debe cumplir con estándares de calidad y pureza. Las características físicas pueden variar dependiendo de la cantidad de materiales adheridos a la roca como: la densidad, estructura cristalina, resistencia, dureza y elasticidad. (Sanchez Henao, 2003). Para la producción



del Drywall en Colombia se importa el yeso crudo principalmente desde países como España y Estados Unidos, ya que dentro del país existen yacimientos pequeños y la extracción es más costosa (El tiempo, 2016).

Continuando con lo anterior, el yeso es un material importante en la construcción ya que es utilizado en forma de pasta (estuco) o mortero (agregado del cemento portland) para las construcciones, como materia prima principal para la producción de Drywall y bloques de mampostería (Geraldo et al., 2017b). De acuerdo con la Figura 1 se muestran los diferentes procesos que se llevan a cabo para la producción de yeso como agregado del cemento portland, como enmienda para los suelos en la agricultura, como estuco y Drywall.

Figura 1 Proceso productivo del yeso y uso en la industria.



Fuente: (Dirección General de Desarrollo Minero, 2016).

Para poder transformar el yeso en un material aglomerante como lo es en el Estuco o en el Drywall debe pasar por procesos de calcinación para esto debe tener mínimo un 90% de sulfato de calcio dihidratado, en caso de que el yeso haya anhidritas puede ser del 80% de pureza (Ecoingeniería, 2005) es necesario tener en cuenta que para poder conseguir el material en este estado hay que controlar la temperatura de calcinación entre 90 y 130 ° C, de lo contrario puede llegarse a transformar el yeso en hemihidratos alfa o beta o anhidritas tipo III, II o I, las cuales tienen otras características físicas en cuanto a fuerza, densidad, resistencia, entre otras.

### 2.1.5. Tipos de Drywall

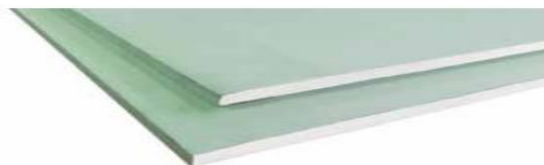
Para poder realizar el Drywall se debe tener en cuenta que el yeso, como una de las materias primas de la producción de este material, debe tener como principal característica que durante su proceso productivo debe pasar por procesos de deshidratación y nuevamente por uno de hidratación con el fin de hallar la calidad del material requerida, por otro lado, existen diferentes tipos de Drywall que se usan dependiendo de sus características.



*Figura 2 Placa estándar.*  
Fuente: (Gyptec Iberica, 2017).

La placa varía de acuerdo con las características del relleno que tiene internamente la placa. Los tipos de placas que se fabrican en GYPTEC o el actual Knauf Colombia son 4: Placa A (estándar), Placa H (hidrofuga), Placa F (anti-fuego) y Placa D (alta dureza). (Gyptec Iberica, 2017).

De las placas tipo A (Figura 2), existen dos clases. Ambas son producidas con relleno de yeso y recubiertas con cartón o papel grueso usadas para construir muebles en interiores, la diferencia es que uno es convencional y el otro es



*Figura 3 Placa H (Hidrofuga)*  
Fuente: (Gyptec Iberica, 2017).

light o liviano el cual se utiliza en sitios elevados para disminuir el peso en la estructura. (Gyptec Iberica, 2017)

Los paneles de tipo H (Figura 3), son resistentes a la humedad y al moho y son de color verde, son utilizados en cocinas o baños y pueden ser protegidos por medio del uso de cerámica, solo se utilizan en interiores. (Gyptec Iberica, 2017)

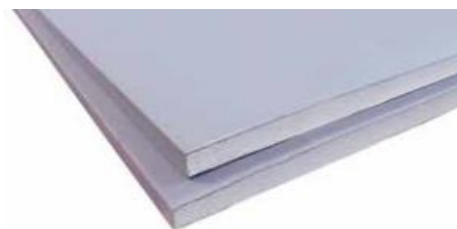


*Figura 4 Placa F (Anti-fuego)*

*Fuente: (Gyptec Iberica, 2017).*

Por otro lado, están las placas F (Figura 4), son resistentes al fuego y se utilizan en interiores de estructuras como en centros comerciales ya que la normatividad requiere un medio de prevención en caso de emergencia de incendio. (Discovery, 2017).

También están las placas tipo D (Figura 5), que son las que se pueden utilizar en exteriores ya que por sus componentes pueden resistir caída de agua. Son de dos clases. Esta el panel que tiene núcleo de yeso, la cubierta exterior está compuesta por fibra de vidrio, usualmente los



*Figura 5 Placa D (Alta dureza)*

*Fuente: (Gyptec Iberica, 2017).*

que instalan esta placa utilizan unas sustancias para proteger los paneles. Finalmente el panel conocido como “permabase”, compuesto en su núcleo por cemento portland, y como cubierta una malla especial para brindarle resistencia (Los Bestauradores, 2018).

Los paneles normalmente tienen dimensiones estándar de 1,22m X 2,44m, que tienen un núcleo de yeso intercalado entre dos caras de papel pesada, además. Por otro lado, las placas tienen una anchura estandarizada de 1,20 metros y diferentes longitudes que pueden ser de 2 a 3 m (Sierra, 2017).

### **2.1.6. Ventajas del uso del Drywall**

Las principales características de las placas son: buena estabilidad, excelente adherencia, fraguado rápido y modificable, tiene propiedades aislantes y acústicas, baja transferencia del calor, bajo peso, bajo costo, optima textura, poca solubilidad en agua, no requiere de mucha agua en su producción y tiene baja conductividad (Ecoingeniería, 2005, p. 1; Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017, p. 31), además la densidad del materia varía dependiendo si es dihidrato, hemihidrato o anhidrita, para el dihidrato la densidad es de  $2.3 \text{ g/cm}^3$  (Ecoingeniería, 2005).

Por otro lado, debido a diferentes tipos de estudios que se han realizado a nivel nacional e internacional, donde se ha encontrado que es un material que es susceptible de aprovechamiento (Geraldo et al., 2017a; Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017; Sierra, 2017), ya que su composición solo varia físicamente y no químicamente, además el aprovechamiento de este material ayudaría a disminuir la cantidad de energía que se gasta cuando se produce material aglomerante como lo es el cemento (Ecoingeniería, 2005).

### **2.1.7. Desventajas del uso del Drywall**

Al usar el Drywall en sitios de altas temperaturas y gran humedad tienden a generar bacterias y moho dentro de las paredes (Kang, Chang, & Kim, 2018b). La aparición de moho no solo genera problemas en la estructura del Drywall sino también problemas a la salud de las personas y del medio ambiente. Durante los años 2007 a 2010 se utilizó un Drywall corrosivo, el cual estaba emitiendo gases sulfurosos los cuales dañaban las propiedades de aislamiento y ventilación del sistema de aire acondicionado (Hooper et al., 2010).

Cuando el Drywall no se encuentra en las condiciones de ser reutilizado se debe disponer (Hooper et al., 2010) en sitios autorizados por los entes ambientales; sin embargo, hay estudios

que dicen que llevar a cabo este proceso conlleva impactos negativos sobre el medio ambiente (Geraldo et al., 2017b; Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017a), donde una de las principales razones, es porque se produce ácido sulfúrico gaseoso, el cual es tóxico e inflamable (Kang et al., 2018b; Sierra, 2017).

Además, en presencia de humedad el yeso genera una acción corrosiva sobre el hierro, por lo que estos deben estar recubiertos, y además cuando el yeso se usa como agregado del cemento el ion sulfato reacciona con los aluminato tricálcicos del cemento por lo que hay un aumento del volumen del material y puede llevar a generar fisuras en el material (Ecoingeniería, 2005).

#### **2.1.8. Reutilización del Drywall**

Se han propuesto tanto alternativas de reutilización como estrategias para poder recuperar eficientemente el material dentro de un marco de la Economía Circular-EC (Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017a, 2018; Leising, Quist, & Bocken, 2018), es decir que se pueda volver a reintroducir el material en un modelo de negocio que sea ecoeficiente, donde se incluyan aspectos como comunidad recicladora, empresas productoras de Drywall y que usen el yeso como materia prima, gestores de RCD como centros de aprovechamiento y recuperadores específicos del material (DNP et al., 2016; Secretaria Distrital de Ambiente, 2019).

Respecto a la información referente a Colombia y América Latina, no hay iniciativas de esquemas de reciclaje ni aprovechamiento de RCD como los hay en países como Bélgica, Países Bajos y Dinamarca, que son líderes en temas de aprovechamiento ya que el porcentaje de reutilización de los RCD oscila entre el 90%, 87% y 81%, respectivamente (DNP et al., 2016). En América Latina, los residuos usualmente son dispuestos inadecuadamente o son llevados a rellenos

sanitarios en los municipios donde no existen escombreras y para el caso de Colombia, se tiene registrado que se está aprovechando de un 20 a 30% de los RCD en general (DNP et al., 2016).

### **2.1.9. ¿Qué es la Economía Circular y de donde nace?**

Se comenzó a hablar de Economía Circular (EC) por primera vez en 1991 por Pearce y Turner en el libro de “Economics of natural resources and the environment”, gracias al concepto de sistema económico circular propuesto por el economista K. Boulding en 1966 en el libro de “the economy of the coming spaceship earth”.(Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016). Se define la EC como un sistema económico que se basa en modelos de negocios sostenibles (Ghisellini et al., 2016), se reemplaza el concepto de fin de vida útil por medio de la reducción, reutilización y reciclaje de materiales en cualquier fase del proceso, teniendo en cuenta propuestas de modelos de negocios sostenibles (Ghisellini et al., 2018; Kirchherr et al., 2018; Saidani, Yannou, Leroy, Cluzel, & Kendall, 2019).

La EC se puede desarrollar en un micro nivel es decir directamente a los productos, compañías y consumidores, nivel medio como parques eco industriales y finalmente a nivel macro como ciudades, regiones y países (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017). La EC se ha propuesto como un modelo económico y político innovador, el cual implica un cambio de pensamiento, en vez de desechar el material, tal como se hace con la economía lineal, se debe convertir en un recurso aprovechable (Ghisellini et al., 2018).

### **2.1.10. Economía circular y Residuos de Construcción y Demolición.**

Hasta hace poco se empezó a hablar del uso de la EC, para darle un mejor manejo a los RCD (Ghisellini et al., 2018). El modelo lineal actual, es poco sostenible debido al agotamiento de los recursos naturales, contaminación del medio ambiente, calentamiento global, problemas a

la salud humana, entre otros. Al hablar de desarrollo sostenible (Saidani et al., 2019), se está hablando de mejorar la calidad del medio ambiente, prosperidad económica y equidad social (Kirchherr et al., 2018).

El primer documento en el que se habló del concepto de EC en Colombia, para el manejo de los residuos sólidos fue el CONPES 3874 en el 2016 (DNP et al., 2016), en el cual el país se comprometió con el cumplimiento con los objetivos de desarrollo sostenible de la OCDE para la conservación y uso de recursos naturales conscientemente, con el fin de disminuir la huella de carbono, luchar contra el cambio climático, incrementar los índices de inclusión y bienestar social. (Moreno, 2018, p. 27).

Por lo anterior se diseñaron las propuestas de aprovechamiento para el Drywall teniendo en cuenta no solo la normatividad como inclusión de los entes gubernamentales, sino que también se identificaron las empresas e industrias que deberían estar involucradas en la recuperación de este material. En la actualidad solo existen 7 programas de posconsumo que incluye el manejo de algunos de los RCD, llantas usadas y bolsas plásticas (DNP et al., 2016), pero dentro de los proyectos de aprovechamiento de los RCD no se ha incluido el Drywall como material potencialmente aprovechable.

## **2.2. Marco legal**

A continuación, se presenta la legislación que se maneja a nivel local (Bogotá), nacional e internacional. Se tuvieron en cuenta normas sobre la gestión y aprovechamiento de los RCD y normas ambientales generales, las cuales buscan prevenir, mitigar y controlar los impactos negativos que se dan desde la generación de los residuos, transporte a sitios de disposición final o sitios de gestión o aprovechamiento, disposición final y procesos de aprovechamiento.

También se tendrán en cuenta las normas técnicas relacionadas con el Drywall es decir con la extracción de las materias primas, producción del Drywall, especificaciones de los materiales, certificaciones a nivel técnico y ambiental y finalmente normas relacionadas con la EC.

### **2.2.1. Normativa relacionada con la gestión y aprovechamiento de los RCD**

#### *Normativa a nivel local.*

##### *Gestión y aprovechamiento de los RCD*

- ✓ Resolución 472 de 2017: se reglamenta la gestión integral de los RCD, además se incluye una guía para el programa de manejo ambiental de los RCD en la obra y se dictan otras disposiciones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017a).
- ✓ Decreto 586 de 2015: Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los RCD en Bogotá D.C. Busca una mayor recuperación y reincorporación en los procesos constructivos de la ciudad, por medio de la participación de los agentes del ciclo, el uso de herramientas e infraestructuras y su implementación a través de líneas programáticas, a corto, mediano y largo plazo (Alcalde Mayor, 2015).
- ✓ Resolución 1138 de 2013: Por la cual se adopta la Guía de Manejo Ambiental para el Sector de la Construcción y se toman otras determinaciones (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013).
- ✓ Resolución 715 de 2013: Por medio de la cual se modifica la Resolución 1115 de 2012 y se adoptan los lineamientos técnico- ambientales para el aprovechamiento y tratamiento de los RCD en Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, 2012).
- ✓ Decreto 357 de 1997: Se regula el manejo, transporte y disposición final de los escombros y materiales de construcción en el distrito capital. (Alcaldía mayor de Bogotá, 1997).



### *Normatividad a nivel nacional*

- ✓ Decreto 1713 de 2002: De acuerdo con el artículo 44 “Recolección de escombros. Es responsabilidad de los productores de escombros su recolección, transporte y disposición en las escombreras autorizadas” (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).
- ✓ Ley 685 de 2001: Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. De acuerdo con el artículo 2 el código regula las relaciones jurídicas de sus diferentes fases desde la prospección, exploración construcción y montaje, explotación, beneficio, transformación, transporte y promoción de los minerales que se encuentren en el suelo o el subsuelo, ya sean de propiedad nacional o de propiedad privada. (Congreso de Colombia, 2001).

### *Normas ambientales generales*

- ✓ Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones (El congreso de Colombia, 1993).
- ✓ Ley 2811 de 1974: Se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Por medio de esta norma se busca la preservación y restauración del medio ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, asegurando una relación armónica entre el ser humano y el uso de los recursos naturales (Presidente de la república, 1974)
- ✓ Resolución 2254 de 2017: Por la cual se adopta la Norma de Calidad del Aire Ambiente, se establecen los niveles máximos permisibles de los contaminantes y cálculos de Índice de Calidad del Aire ICA, deroga la resolución 601 de 2006, 610 de 2010 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b).

- ✓ Resolución 68 de 2001: se modifica parcialmente la Resolución 898 de 1995, adicionada por la Resolución 125 de 1996 y modificada por la Resolución 623 de 1998, que regula los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).
- ✓ Decreto 1076 de 2015: se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en donde se habla de los comparendos ambientales por un mal manejo y disposición final de los escombros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

*Normas Técnicas Colombianas NTC*

- ✓ NTC 6155 de 2017: Etiquetas ambientales tipo I. Sello Ambiental Colombiano (SAC). Correspondiente a criterios ambientales para placas planas de fibrocemento y yeso cartón para el uso en sistemas constructivos livianos en seco (Icontec, 2017c).
- ✓ NTC 14040 de 2006: marco de referencia para realizar un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y la metodología (Icontec, 2007).
- ✓ NTC 1335 de 2015: Reglamenta los requisitos que deben cumplir las pinturas de agua que son de tipo emulsión (blancas y de color), utilizadas para recubrir superficies tales como mampostería, pañete, estuco y materiales de fibrocemento, con fines de protección y decorativos (Icontec, 2015).
- ✓ NTC 6224 de 2017: Norma adoptada por la ASTM C475/C475M:2015, que trata sobre la estandarización de procesos para la realización de masilla para junta; cinta para junta; placa de yeso; fisuración, putrefacción; encogimiento; muestreo; inspección; rechazo; certificación; empaque y marcado.(Icontec, 2017a)

- ✓ NTC 6159 de 2017: Norma adoptada de la ASTM C1396/C1396M: 2014<sup>a</sup>, sobre los requisitos que deben cumplir las placas de yeso para los diferentes usos y tipos de Drywall que existen.(Icontec, 2017b)
- ✓ Resolución 5926 de 2011: Crea y regula el programa de reconocimiento ambiental a Edificaciones Ecoeficientes, PRECO, cuyo objeto es promover proyectos constructivos Ecoeficientes, amigables con el entorno, que propendan por la implementación de nuevas tecnologías que favorezcan la sostenibilidad ambiental.(Secretaria Distrital de Ambiente, 2011).

#### *Certificaciones a nivel internacional*

- ✓ ISO 14001 de 2015: Sistemas de Gestión Ambiental (SGA). Esta encargada de proporcionar a las organizaciones un marco de referencia para proteger el medio ambiente y responder a las condiciones ambientales cambiantes, teniendo en cuenta las necesidades socioeconómicas de las empresas de la organización. Esto se hace con el fin de disminuir, prevenir o mitigar los impacto generando estrategias para mejorar el desempeño ambiental.(ISO, 2015).
- ✓ Certificación LEED: Leadership in Energy and Environmental Design. Se da a partir de un puntaje de 55 sobre 100, cuando se usan materiales sostenibles de acabado(Sierra, 2017).
- ✓ BREEAM: es una certificación creada en Reino Unido en 1990, significa “*Building Research Establishment’s Environmental Assessment Method*”. Tiene como objetivos reducir impactos; reconocer los proyectos y comunidades según sus beneficios ambientales, sociales y económicos; proporcionar una etiqueta creíble para urbanismos enfocada en la sostenibilidad; estimular la demanda y asegurar el desarrollo efectivo de comunidades sostenibles (Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017a).

- ✓ PASSIVHAUS: es un certificado que busca que las construcciones que se certifiquen puedan reducir un 75% las necesidades de calefacción y refrigeración, es decir que su gasto energético sea muy bajo para el propietario y el planeta (Plataforma de Edificación Passivhaus-PEP, 2019).

### **2.2.2. Normatividad relacionada con la EC**

#### *Normatividad a nivel nacional*

- ✓ CONPES 3874 de 2016: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Es el primer documento oficial en Colombia, en donde se habla de la EC. Con este documento se busca generar herramientas para la gestión de los residuos sólidos, promover la cultura ciudadana, educación e innovación y finalmente implementación de acciones para mejorar el monitoreo, verificación y divulgación de esta política pública. Dentro de las líneas de acción se encuentra el sector de la construcción.(DNP et al., 2016)
- ✓ CONPES 3919 de 2018: Política nacional de edificaciones sostenibles. Hace referencia a la sostenibilidad, a nivel nacional de los materiales de construcción.(MAAT soluciones Ambientales, 2019). Este documento busca cumplir con los compromisos asumidos en la agenda internacional de desarrollo sostenible, respecto a los ODS, haciendo énfasis en el objetivo 11 y 12 sobre ciudades y comunidades sostenibles y de garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles respectivamente. La meta es reducir el 20 % de los GEI establecido en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible. (Gobierno de Colombia, 2018).

## *Normatividad a nivel internacional*

### *Unión Europea*

- ✓ Directiva (UE) 2018/851 del parlamento europeo y el consejo de 30 de mayo de 2018, (modifica la directiva 2008/98): Mejora y transformación de la gestión sostenible de las materias con miras a proteger, preservar y mejorar la calidad del medio ambiente, proteger la salud humana y mejorar la eficiencia del uso de los recursos y asegurarse de que los residuos se valoren como recursos. Esto debe contribuir los objetivos de crecimiento inteligente, sostenible e integrador establecidos en la Estrategia Europa 2020.(Comisión Europea, 2018).
- ✓ Directiva 2008/98/CE del parlamento europeo y el consejo de 2 de diciembre de 2015: Esta norma se encarga de aplicar la EC a los residuos no peligroso, residuos municipales, RCD, entre otros. En cuanto a los RCD, se promoverá el desarrollo de sistemas de clasificación de madera, áridos, metales, vidrio y yeso (Directiva del parlamento europeo y del consejo, 2008).
- ✓ Decisión 2014/955/UE en la versión vigente a 4 de julio de 2018. (capitulo 17): Comprende la EC desarrollada para los RCD para grandes y pequeños generadores (Comisión Europea, 2018).

### *España*

- ✓ UNE-EN 128559:2012: Esta norma anula la norma UNE-En 12859:2009, 12859:2004 y la 12859:2001. Trata sobre Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.(Dirección General de Desarrollo Minero, 2016).
- ✓ UNE-EN 13279-1:2009: Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo (Dirección General de Desarrollo Minero, 2016).

- ✓ UNE-EN 13950:2014: Esta norma anula la norma UNE-EN 13950:2006. Trata sobre Transformados de placa de yeso laminado con aislamiento térmico acústico. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo (Dirección General de Desarrollo Minero, 2016).
- ✓ UNE-EN 14190:2014: Esta norma anula la norma UNE-EN14190:2006. Transformados de placa de yeso laminado procedentes de procesos secundarios. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo (Dirección General de Desarrollo Minero, 2016).

De acuerdo con las normas anteriormente descritas, fueron presentadas por medio de la Plataforma Europea para la Eficiencia de Recursos (EREP) en el 2012 en donde una de las recomendaciones fue la posibilidad de introducir el “pasaporte de productos”, en donde se registrarán los componentes, contenidos del producto, para así poder dar mayor información del producto a la hora de reutilizarse, reciclarse o remanufacturarse.(Fundación Ellen Macarthur, 2014).

Por otro lado, la unión Europea tiene como objetivo para el año 2020 no tener que disponer en vertederos o utilizar sistemas de incineración para los residuos haciendo uso de la EC (Fundación Ellen Macarthur, 2014). Las políticas formuladas buscan promover la ventaja económica de los modelos de negocio circular.

#### *Otros países*

En Australia se ha intentado hablar de la EC, para el año 2014 se desarrolló un programa de Ecología industrial llamado Australian Industrial Ecology Network (AIEN), basado en un programa del Reino Unido, el cual tuvo como objetivo desarrollar sinergias entre industrias similares para identificar reutilización de residuos y proyectos de reciclaje, aumentar la eficiencia

y ahorrar dinero reduciendo la cantidad de residuos que se deposita en vertederos (Cerdà & Khalilova, 2016).

Para los Estados Unidos no hay iniciativa política sobre EC a nivel federal, solo hay leyes de conservación y recuperación de recursos de 1976 o la ley de prevención de la contaminación de 1990.(Cerdà & Khalilova, 2016; Ghisellini et al., 2018). A nivel de estado, la mayoría han adoptado desde 1980 leyes sobre gestión de residuos en la que la reducción y la reutilización están en la parte superior de la jerarquía. (Cerdà & Khalilova, 2016).

Finalmente, quienes realmente se encargaron de impulsar la EC fueron países como Alemania desde el año 1996 con la ley sobre ciclo cerrado de sustancias y gestión de residuos y Japón desde el año 2000 con la ley básica para el establecimiento de una sociedad basada en reciclaje, junto con otras 8 leyes (Cerdà & Khalilova, 2016).

Poco después, la Administración Estatal de Protección Ambiental de China (SEPA) se interesó en la EC y se convirtió en una agencia que lideró la filosofía de la EC en China a principios de siglo, apoyando estudios e involucrando actores implicados, proyectos piloto sobre producción limpia, parques eco-industriales, construcción de regiones de reciclaje a nivel local y regional y finalmente incentivando el uso de estos materiales para darle la importancia debida a la EC. (Cerdà & Khalilova, 2016).

La EC en China se define como los procesos de reducir, reutilizar y reciclar materiales en procesos de producción, distribución y consumo. En el artículo 19 de la Ley de Promoción de la EC es relevante la importancia del diseño de los procesos, equipos, productos y envasado. La EC aún tiene sus limitaciones; sin embargo, el modelo de EC propuesto por China es más integral. (Fundación Ellen Macarthur, 2014, p. 8).

Las políticas en Japón se centran en la gestión de los residuos y la conservación de los recursos naturales, es por ello por lo que tienen una ley de promoción de utilización eficiente de los recursos del año 2000, esta ley cubre el ciclo de vida del producto desde la extracción de los materiales hasta su reutilización o reciclaje. Según cifras del 2007 Japón recicla un 98% de metales y 89% de materiales electrónicos, enviando a vertedero un 5% de los residuos generados. Los materiales fueron llevados a recuperación en el mismo sitio de fabricación cerrando el ciclo allí.(Fundación Ellen Macarthur, 2014, p. 8).

En cuanto América latina existen normas de aprovechamiento y parámetros necesarios para la fabricación de nuevos productos a partir del Drywall reciclado algunas de las normas encontradas fueron de unos países latinoamericanos, tales como México, Argentina y Chile. Estas describen las características que deben cumplir para ser apto para uso en construcciones o aprovechadas dentro de otros procesos.



## **Capítulo 3 Metodología**

Como metodología de investigación se utilizó la descriptiva, debido a que se tomó como tema principal el aprovechamiento de los RCD, pero específicamente se analizó el material del Drywall y las alternativas que se podían desarrollar para proponer soluciones que evitaran el final del ciclo de vida del material, es decir impedir que se llevara a cabo el proceso de disposición final en algún relleno sanitario.

Debido a lo anterior se desarrollaron 3 fases, las cuales abarcaron información específica sobre el material como: los procesos que se llevan a cabo durante todo su ciclo de vida y los impactos generados en cada uno de ellos por medio de la metodología de ACV, revisión de las propuestas que se han realizado en diferentes países incluyendo Colombia respecto a las alternativas de aprovechamiento y a los marcos que se han planteado dentro de la EC, todo directamente relacionado con la normatividad nacional e internacional y finalmente la evaluación de las alternativas para el caso de Colombia con el fin de especificar los usos potenciales del Drywall reciclado en el país, para lo cual se tuvieron en cuenta de igual manera las empresas involucradas dentro del aprovechamiento del material.

### **3.1.Fase 1: Revisión de impactos ambientales del ciclo de vida del Drywall.**

#### **3.1.1. Análisis de Proceso**

Se realizó un análisis de proceso para el Drywall, con el fin de conocer las entradas y salidas durante el proceso productivo del material, es decir que materias primas e insumos y que productos o subproductos fueron generados por cada una de las actividades realizadas en esta industria.

El análisis del proceso sirvió como base para el desarrollo de la metodología de ACV, ya que a partir de esta se realizó la evaluación de impactos no solo para el proceso productivo, sino también para los procesos de mercadeo, uso, disposición final y reciclaje del material, ya que a partir de esta información se va a determinar la importancia de llevar a cabo procesos de aprovechamiento para el Drywall en Colombia.

### **3.1.2. Análisis de Ciclo de Vida del Drywall**

Para el desarrollo de esta metodología se utilizó el software de SimaPro y las bases de datos se tomaron desdeecoinvent ya que la información que se da allí se pueden aplicar a diferentes contextos alrededor del mundo (Pascual-González, Guillén-Gosálbez, Mateo-Sanz, & Jiménez-Esteller, 2016). Finalmente se escogió como metodología de evaluación de impacto el modelo de IMPACT 2002+ debido a que reúne 4 métodos de evaluación como IMPACT 2002, Eco-indicator 99, CML 2002 e IPCC de 2001 (Humbert, De Schryver, Margni, & Jolliet, 2012, p. 7), lo cual fue útil para poder contrastar la información con la que se da en otras investigaciones sobre el Drywall que también manejan la metodología de ACV.

Dentro de esta metodología existen 15 categorías de impacto a las que se les denomina categorías de medio punto ya que se encuentran agrupadas por 4 categorías de daño y se clasifican de la siguiente manera: salud humana (toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, daño a la capa de ozono, oxidación fotoquímica, agua turbinada, extracción de agua, y consumo de agua), calidad del ecosistema (daño a la capa de ozono, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, acidificación acuática, eutrofización acuática, acidificación y nutricación terrestre, ocupación de tierras, agua turbinada, extracción de agua, y consumo de agua), cambio climático (calentamiento global) y recursos naturales (energías no renovables y extracción mineral) (Humbert et al., 2012).

Finalmente, en el desarrollo de ACV se tomó como base 1Kg de Drywall, es decir que, para todos los impactos analizados, corresponden a la producción, mercadeo, uso y disposición final o reciclaje para ese kilogramo de material. Además, dentro de esta metodología no solo se evaluaron los procesos, sino que también estuvieron involucrados las salidas de aportes por parte del transporte y gasto energético tanto por energía eléctrica como por combustibles fósiles.

### **3.2. Fase 2: Alternativas de aprovechamiento del Drywall**

#### **3.2.1. Recopilación de los estudios realizados para el aprovechamiento y recuperación del Drywall.**

Se tomaron en cuenta todas las alternativas encontradas para el aprovechamiento del Drywall, con el fin de poder evaluar los usos potenciales del material en diferentes tipos de industria. Algunas de estas alternativas fueron analizadas por medio de ACV y con la metodología de evaluación de IMPACT 2002+ o con algunas de las metodologías que están siendo utilizadas dentro de esta, por lo que ayudo a entender mejor las ventajas y desventajas de las alternativas, además de entender los impactos negativos que son evitados dependiendo de la alternativa propuesta y de los impactos positivos que podría haber.

#### **3.2.2. Marco de referencia del uso de la EC como modelo de aprovechamiento del Drywall.**

Para el desarrollo de una EC respectivamente para el Drywall se tuvo en cuenta la estructura enmarcada tanto de la recirculación del Drywall de la unión europea llamada Gypsum to Gypsum (GtoG) y también se tuvo en cuenta una lista de ítems propuestos en una investigación que fue desarrollada en los países bajos.

Dos de las cosas que son más importantes para el planteamiento de una EC son: la identificación de un marco legal que soporte el uso de este modelo económico para el planteamiento de propuestas como la de la presente investigación y la identificación de los interesados dentro de los cuales se encuentran empresas privadas que se encarguen del aprovechamiento de este material, ya sean productores o gestores del material.

### **3.2.3. Empresas relacionadas con el Drywall en Colombia**

Debido a que el marco de referencia de la EC involucra a los interesados incluyendo a productores y gestores del Drywall, es importante referenciar las empresas que podrían estar interesadas en las alternativas acá propuestas para poder dar un destino a los residuos de Drywall.

### **3.3. Fase 3: Alternativas en Colombia**

Se compararon los artículos y se analizaron las ventajas y desventajas respecto a las diferentes oportunidades de aprovechamiento del yeso y el papel a partir de las placas de Drywall reciclado que se han propuesto en Colombia y en el mundo. Se tuvo en cuenta operatividad, costo-eficiencia, transporte, operaciones unitarias necesarias, localización, beneficios ambientales y sociales, entre otros aspectos específicos. Posteriormente Se enlistaron las posibles alternativas para tener en cuenta como opciones para recirculación del material en Colombia.

#### **3.3.1. Evaluación de alternativas para el manejo del Drywall.**

Para la actividad de evaluación de alternativas se examinó la viabilidad del uso de este material como materia prima para la producción de nuevos materiales. Esto se realizó con ayuda de la herramienta matricial DOFA, la cual sirvió para la visualización de las Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas para cada una de las propuestas de acuerdo con el contexto colombiano.

Por otro lado, las alternativas de aprovechamiento se evaluaron relacionando directamente las empresas que se encargan de la producción de materiales a base de yeso y las empresas gestoras de residuos de Drywall en específico, ya que de esto depende que el aprovechamiento del material sea óptimo y posible llevarlo a cabo.

Después de haberse aplicado la metodología DOFA, donde primero se realizó una matriz para cada una de las alternativas con la descripción de cada uno de los aspectos para tener en cuenta como se dijo antes, se evaluaron las alternativas usando un análisis de estrategias DO, DA, FO, FA. Estas estrategias significan: que debilidades hay y como se pueden mejorar con las oportunidades, que debilidades pueden convertirse en amenaza con el fin de evitarlas, que fortalezas hay y que oportunidades hay de reforzarlas y finalmente que fortalezas pueden ser o convertirse en una amenaza.

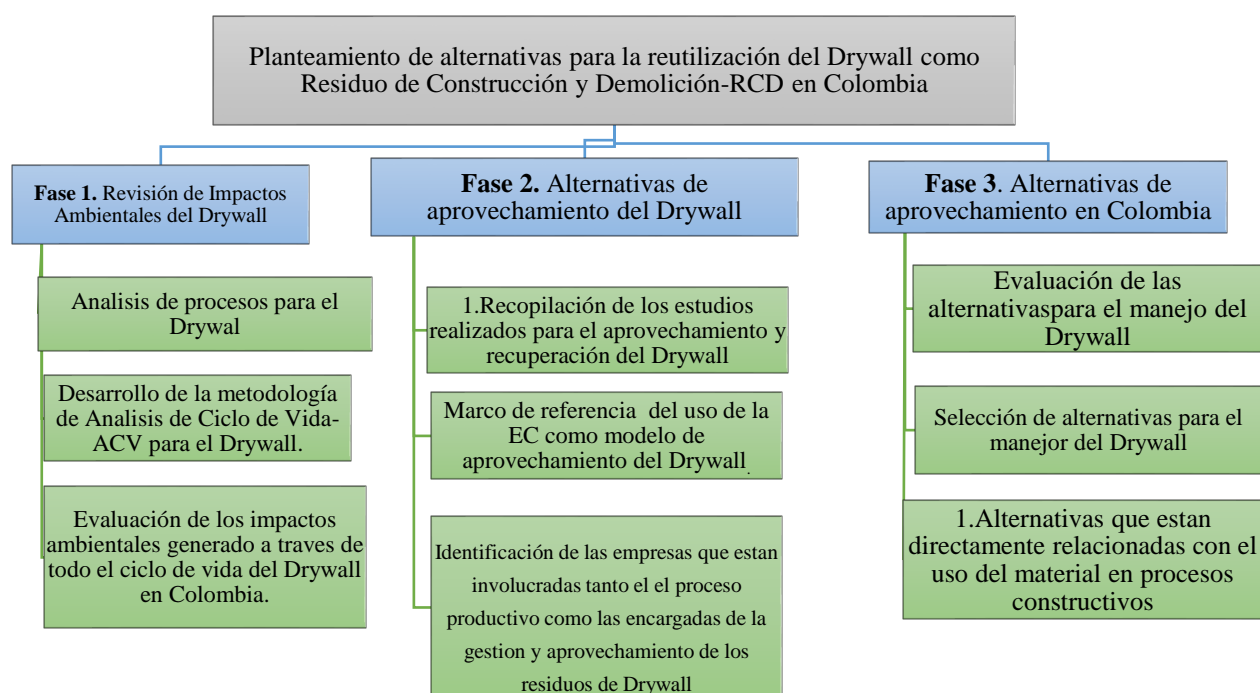
### **3.3.2. Selección de alternativas para el manejo del Drywall**

Se tendrá en cuenta que la investigación se centra en buscar alternativas de aprovechamiento que no solo se estén utilizando actualmente en Colombia, sino que hayan sido exitosas en otras partes del mundo, donde se involucre la arquitectura y la ingeniería, además de tener en cuenta los aspectos legales, sociales y culturales.

Para esta actividad se usó el análisis DO, FO, DA, FA y se compararon los resultados de cada una de las alternativas, con el fin de saber cuáles de las opciones que tiene un gran potencial de ser aplicadas en Colombia y como podrían ser introducidas de un marco de EC de forma eficiente, teniendo en cuenta las empresas que se encargan de gestionar, tratar y aprovechar los residuos de Drywall, además de temas operacionales como necesidad de infraestructura, transporte, entre otras cosas.

De acuerdo con el marco de la investigación en la que se desarrolló este proyecto de investigación, era necesario proponer alternativas que se encuentren directamente relacionadas con el proceso de recuperación del Drywall como RCD en procesos constructivos, por lo que se especificaron los beneficios del uso del material para la construcción.

Figura 6 Metodología para el desarrollo del proyecto de investigación.



## Capítulo 4: Desarrollo de la metodología

### 4.1. Análisis de procesos de la producción del Drywall

Tal y como se muestra en la Figura 1, para el desarrollo de la producción del Drywall se tienen que llevar a cabo diferentes procesos de transformación del yeso, con el fin del que llegue a tener la calidad requerida y cumpla con las normas de estandarización de las placas y materiales a base de yeso.

Por otro lado, como cualquier proceso productivo cada una de las actividades requieren de gasto energético o mano de obra. La energía puede ser eléctrica o por combustibles fósiles y la mano de obra va a depender de lo industrializado que sea el proceso. Para el caso de Colombia la empresa encargada de la producción de placas es Knauf Colombia, una empresa alemana (Knauf Colombia, 2019), la cual cuenta con un proceso netamente industrial. Para las otras empresas encargadas de la comercialización de los paneles los puntos de producción se encuentran fuera del país como Panel Rock que se encuentra ubicado en México.

A partir del análisis de procesos, se pueden determinar que los impactos se están generando en cada uno de los procesos; sin embargo, también sirve como línea guía para el desarrollo de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ya que dentro de este análisis existen bases de datos que cuentan con datos y valores estandarizados para cada uno de los procesos, gracias a las bases de datos a las que se pueden acceder fácilmente desde el software de SimaPro. Dentro de estas bases de datos se pueden acceder a cada una de las actividades que sean señaladas como representativas para el campo de estudio que se quiera evaluar.

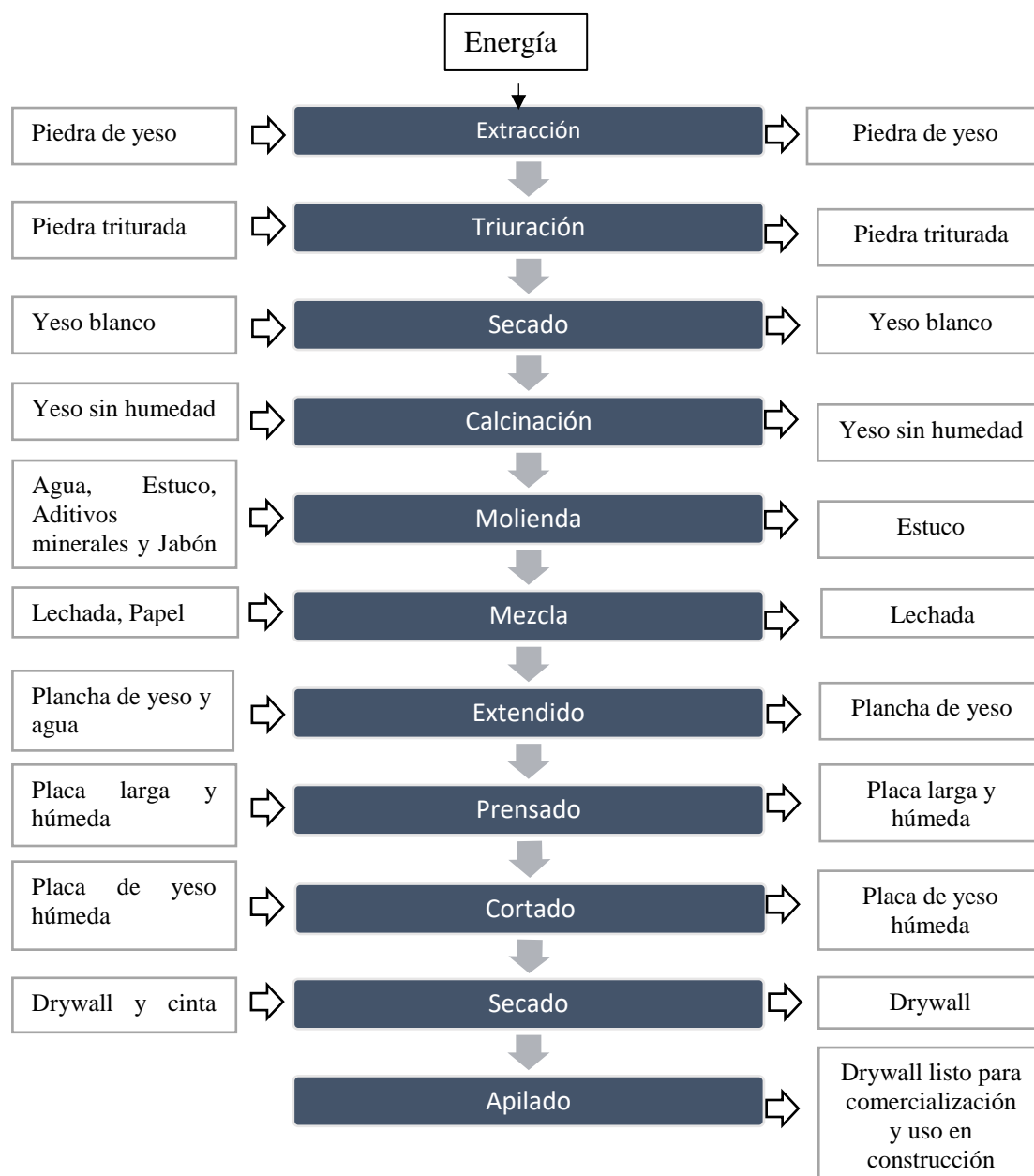


Figura 7 Proceso de producción del Drywall.

**Extracción:** durante esta actividad se extrae el material de canteras de yeso, como subproductos o impactos hay contaminación del suelo por erosión, agotamiento de los recursos naturales, afectación a la flora y fauna y contaminación del recurso aire por aspectos como generación de emisiones atmosféricas por material particulado y emisión de ruido debido a los procesos de dragado del suelo.



**Trituración primaria:** Este proceso busca reducir el tamaño de la piedra original a una de 25 cm de diámetro en promedio, requiere de energía por ende hay un agotamiento de los recursos naturales, además hay emisiones atmosféricas por material particulado y ruido generado.

**Trituración secundaria:** Después del proceso de trituración primaria es necesario reducir más el tamaño del yeso antes de que entre al proceso de molienda por lo que se hace una segunda trituración en la que la piedra pasa de estar de 25 cm a 5 cm de diámetro. para esta actividad están presentes los mismos impactos generados que en la trituración primaria, la única diferencia es que este proceso busca que el tamaño de partícula de yeso sea más pequeño.

**Secado y calcinación:** durante la actividad de secado se espera quitar la humedad con la que viene el material para así poder obtener el yeso dihidratado, de esta actividad no se gasta tanta energía como si se hace para el proceso de calcinación ya que solo requiere alrededor de 8 minutos para perder la humedad requerida entre 5 y 10% de humedad, pero para la calcinación es necesario que la temperatura suba a 150°C, para después enfriarse a 90°C.

**Molienda:** Como el material aún se encuentra de 5 cm de diámetro, es necesario llevarlo a un tamaño de partícula mucho más pequeño que tiene una consistencia similar a la harina y es la que se le conoce como estuco. los impactos que se pueden estar generando en esta actividad pueden estar más que todo relacionadas con la emisión de material particulado menor a 2.5  $\mu\text{m}$ , el cual es dañino para la salud humana ya que las partículas al ser tan pequeñas pueden ingresar fácilmente en el sistema respiratorio causando enfermedades respiratorias tanto agudas como crónicas, dependiendo de los tiempos de exposición y del uso o no de implementos de salud y seguridad del trabajo.

**Mezcla de aditivos:** Este proceso va a depender de cada empresa ya que se utilizan diferentes aditivos para poder producir la lechada que es la sustancia que se utiliza como relleno para las placas, esta contiene sustancias que hacen que el material tenga aire para hacerlo más liviano, además de otras sustancias que mejoran las propiedades físicas del material y que van a variar dependiendo de la empresa.

El resto de las actividades que se realizan durante la producción sirven para la adecuación de las placas como lo son el prensado y cortado de las placas ya que esto va a depender de cada una de las empresas, la fase final se lleva a cabo el proceso de secado de las placas, el cual se va a realizar en un horno gigante para que se puedan secar al mismo tiempo alrededor de 100 placas, haciendo que la producción sea más eficiente y que queden completamente secas y listas para la distribución y uso en la construcción.

Durante todo el proceso productivo independientemente de la actividad se requiere energía y mano de obra, lo que hace que para todas las actividades haya gasto energético. Después de realizar un ACV para el Drywall se van a evaluar los impactos identificados durante este análisis de proceso, como para el resto de los procesos desde la extracción del material hasta la disposición final o aprovechamiento del Drywall. La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se encuentra estandarizada en la NTC-ISO 14040 de 2007, y funciona como identificación de oportunidades de mejora del material, dentro de un marco de sistema de gestión ambiental en el cual se pueden dar soluciones para recircular el material, con el fin de aprovecharlo (Icontec, 2007).

## **4.2. Análisis de Ciclo de Vida-ACV del Drywall**

### **4.2.1. Definición del objetivo y alcance de ACV**

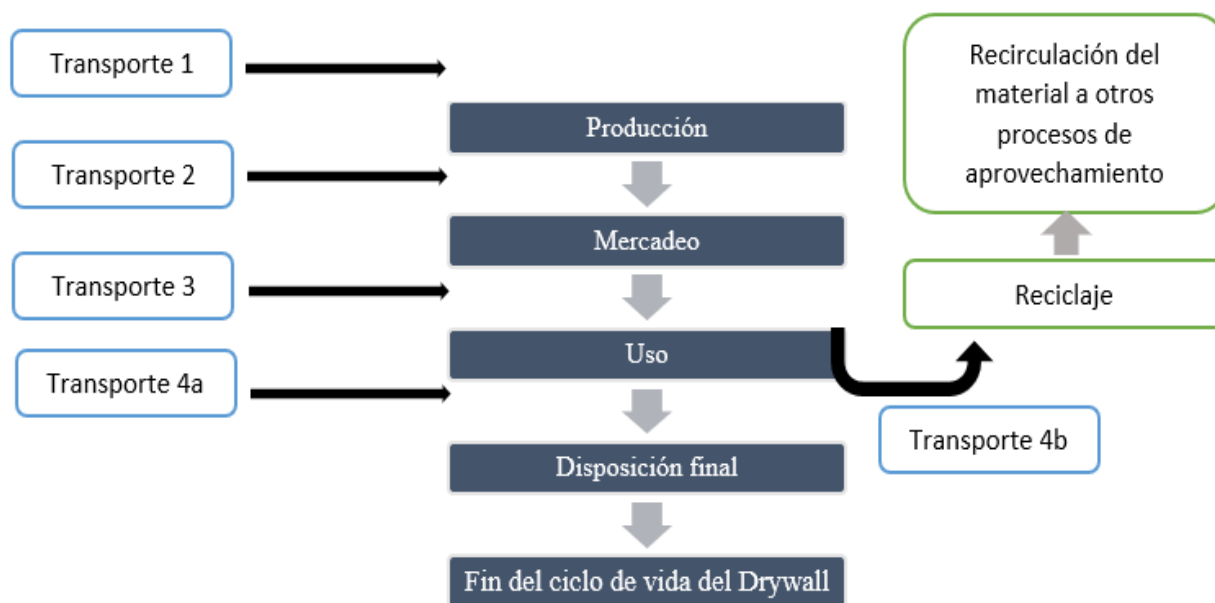
Esta metodología se realizó para verificar si el proceso de aprovechamiento del Drywall en Colombia reduciría los impactos negativos que se están generando desde el momento de la producción hasta la disposición final del material como un RCD. Por otro lado, se podrán seleccionar las categorías de impacto más significativas durante el ciclo de vida del material.

### **4.2.2. Análisis de inventario**

El inventario se refiere a las entradas y salidas de cada uno de los procesos que se van a evaluar para el Drywall, los cuales fueron: producción, mercadeo, uso, disposición final y reciclaje (Figura 8). Para el proceso productivo se tuvieron que incluir los procesos de obtención de las materias primas del Drywall como lo son el yeso y el papel, además también se consideró el consumo energético para la transformación y el transporte en cada una de las etapas.

Para el desarrollo del ACV se utilizó la base de datos de Ecoinvent, esta base fue fundada sin fines de lucro por instituciones y oficinas federales suizas (Quintana, Alba, del Rey, & Guillén-Guillamón, 2018). Los datos que se encuentran allí son confiables ya que son verificados por un experto en Life Cycle Assesment-LCA o ACV, antes de que se suba esta información a Ecoinvent (Pascual-González et al., 2016). Para la obtención de los resultados que se presentaran en el inventario se tuvo en cuenta como medida base 1 kg Drywall.

Figura 8 Proceso del ACV del Drywall



**Producción:** Respecto al proceso de producción se tuvo en cuenta un transporte previo de las materias primas, tanto del papel como del yeso. Para el caso de papel se tuvo en cuenta que se estaba suministrando por una empresa en el Valle del Cauca y para el yeso crudo se tuvo en cuenta que se estaba importando desde España, ya que este país importa alrededor de 9,6% de estuco a Colombia (IGME. Panorama Minero, 2017), además de que el tipo de yeso importado cumple con las normas ASTM de calidad del yeso.

La única empresa en Colombia que se encarga de la producción de Drywall es Knauf Colombia. Esta empresa cuenta con una concesión de extracción minera en España, por lo que para el ACV se tuvieron en cuenta los kilómetros recorridos por kilogramo del Drywall: es decir para 0,85Kg de yeso fueron 89,25 KgKm en vehículo de combustible EURO 5 desde la cantera en España hasta el puerto, después se recorrieron 6687,8 KgKm desde el puerto de España hasta el puerto en Cartagena en buque y finalmente 11,305 KgKm del puerto en Cartagena hasta la planta de producción en la zona industrial de Cartagena. Finalmente, desde la fase de producción

se llamó la base de datos tanto del estuco, como la del papel o celulosa, los transportes y la energía gastada antes y durante el proceso productivo.

**Mercadeo:** para este proceso se llamó la base de datos del mercadeo del Drywall y también se tuvieron en cuenta los kilómetros recorridos, que fueron de 1062 KgKm desde la planta de producción hasta un punto de mercadeo de las placas en Bogotá en vehículo con combustible tipo EURO 3. Además, para vincular a la base de datos realizada anteriormente sobre la producción del material se llama dentro de la base de mercadeo.

**Uso en la construcción:** Existe una base de datos específicamente para la fase de construcción por lo que se llamó desde Ecoinvent. Es necesario tener en cuenta que esta base de datos no solo considera los residuos, sino que también sustancias que son tomadas desde el medio ambiente y las que son emitidas al medio ambiente, lo cual servirá para conocer los impactos producidos directamente en este proceso. Además, al igual que en los otros procesos se tuvo en cuenta el transporte donde se pueden recorrer en promedio 14,2 KgKm dentro de la ciudad de Bogotá. Al igual que en la base de datos anterior se llama de igual manera la base de datos, pero ahora la de mercadeo.

**Disposición final y reciclaje:** Al igual que en proceso del uso en la construcción se llamaron las bases de datos de cada uno de los procesos y se tuvieron en cuenta los transportes. Para la disposición final se recorre alrededor de 24,4 KgKm y para la recuperación 14 KgKm. Al igual que las otras fases estas también se relacionaron con la base de datos del uso en la construcción, por lo que estas fases van a quedar a la misma altura, pero el reciclaje va a estar relacionado como un proceso alterno al de la disposición final del Drywall.

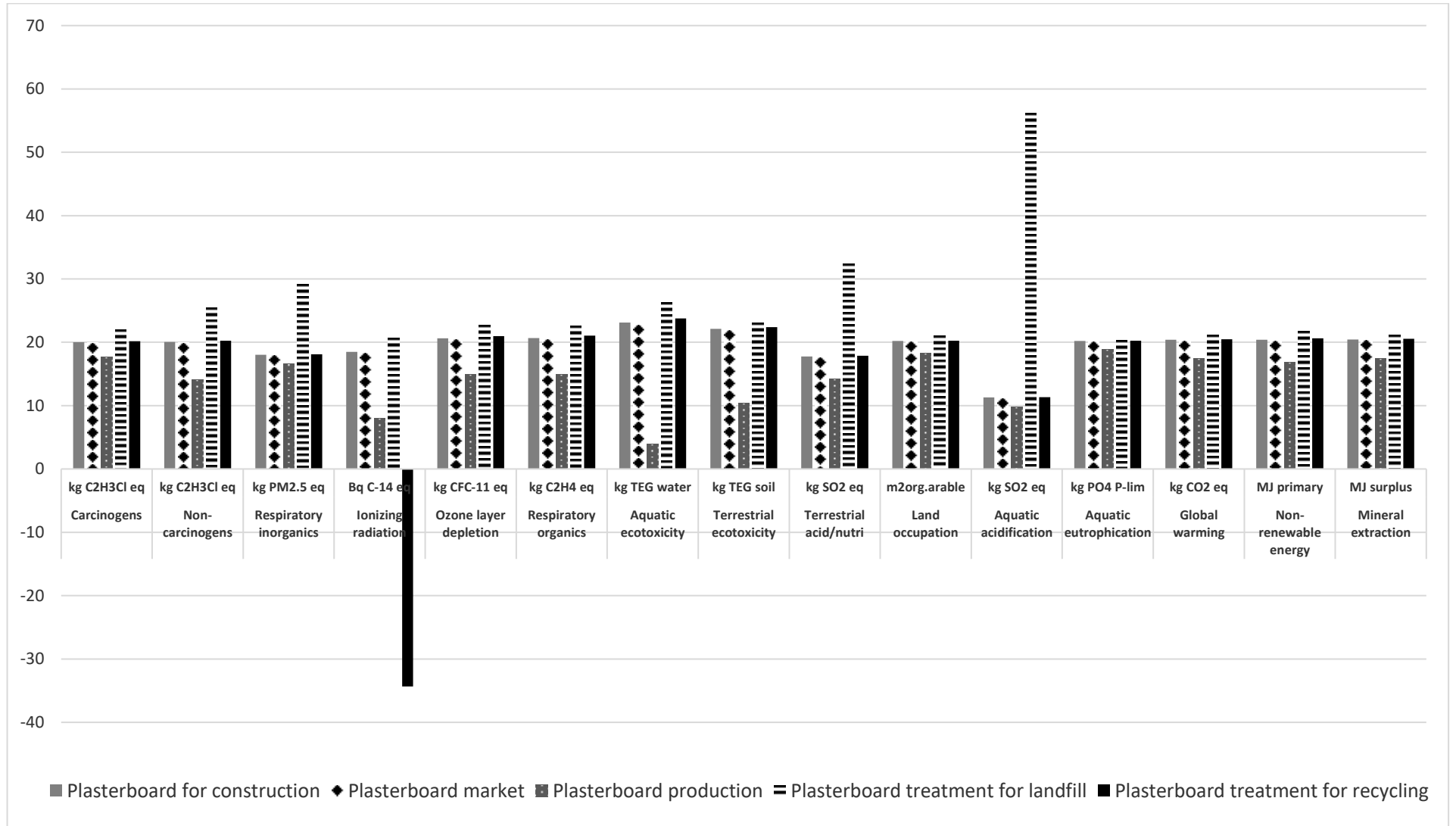
### **4.2.3. Evaluación del impacto**

Se utilizó la metodología de evaluación de impacto de IMPACT 2002+, debido a que existen otros estudios, realizados en España e Italia con los cuales se pueden comparar los resultados e información relevante para esta investigación, Además esta metodología incluye otras cuatro anteriormente expuestas.

Las investigaciones en las que utilizaron ACV fueron un caso de estudio en la región de Lombardía Italia, en la cual utilizaron la metodología de ILCD 2011 method (Pantini et al., 2019), para el caso de España en donde se incluyó un análisis de alternativas para el uso de otras materias primas para la realización de Drywall, se utilizaron las metodologías de impacto de IPCC, GWP 100, Eco-indicator99 y CML 2002 (Quintana et al., 2018) y finalmente hay dos investigaciones realizada en España y otro específicamente en Cataluña-España donde usaron la metodología de IMPACT 2002+ (Suárez et al., 2018; Suárez, Roca, & Gasso, 2016). Es claro que los valores pueden cambiar drásticamente dependiendo de la ubicación geográfica de donde se esté realizando el estudio y de las condiciones que haya; sin embargo, sirven como referencia.

*Perfil medio ambiental*

Figura 9 Grafica del Perfil ambiental.



Se evaluaron 15 categorías de impacto como se puede ver en la Figura 9. Donde las categorías más relevantes fueron: no carcinogénicos, respiratorios inorgánicos, la radiación ionizante, sustancias acidas y nutrientes para el suelo y acidificación acuática. Para todas las categorías hubo impactos negativos, excepto en la de radiación ionizante donde hay un valor negativo representativo, el cual significa que el impacto generado por el proceso de reciclaje del Drywall es positivo, estas se escogieron teniendo en cuenta como valor promedio en porcentaje el 25% para que fueran representativos dentro de la investigación.

Tal y como se esperaba el proceso que aporó más impactos negativos sobre el medio ambiente fue la disposición final. Para los no carcinogénicos la sustancia con mayor aporte fue el arsénico el cual según la Organización Mundial de la Salud (OMS), es peligroso cuando se encuentra en el agua y también cuando hay una exposición prolongada a esta sustancia, ya que puede generar enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad, cáncer, entre otras (OMS, 2018).

Por otro lado, están los respiratorios inorgánicos en donde, según los resultados con base a la base de datos de Ecoinvent se está aportando una cantidad significativa de PM 2.5  $\mu\text{m}$ , las partículas de este tamaño alcanzan a entrar dentro de los pulmones (Humbert et al., 2012) y pueden generar enfermedades respiratorias tanto crónicas como agudas.

En cuanto a las sustancias acidas y nutrientes para el suelo y acidificación acuática aportaron dióxido de azufre, sustancia de importancia debido a que cuando este gas entra en contacto con la lluvia se forma la lluvia acida. El tiempo de permanencia promedio de esta sustancia es de 3 a 5 días dependiendo de las condiciones meteorológicas, por lo que es posible que se transporte largas distancias (Linde Group, 2012).



Respecto a los impactos positivos, solo hubo uno por parte de la fase de reciclaje del material y correspondió a la categoría de radiación ionizante, según esto se dejó de emitir 34% de Radón, el cual no se considera una sustancia nociva si se emiten en pequeñas cantidades y durante tiempos cortos de exposición.

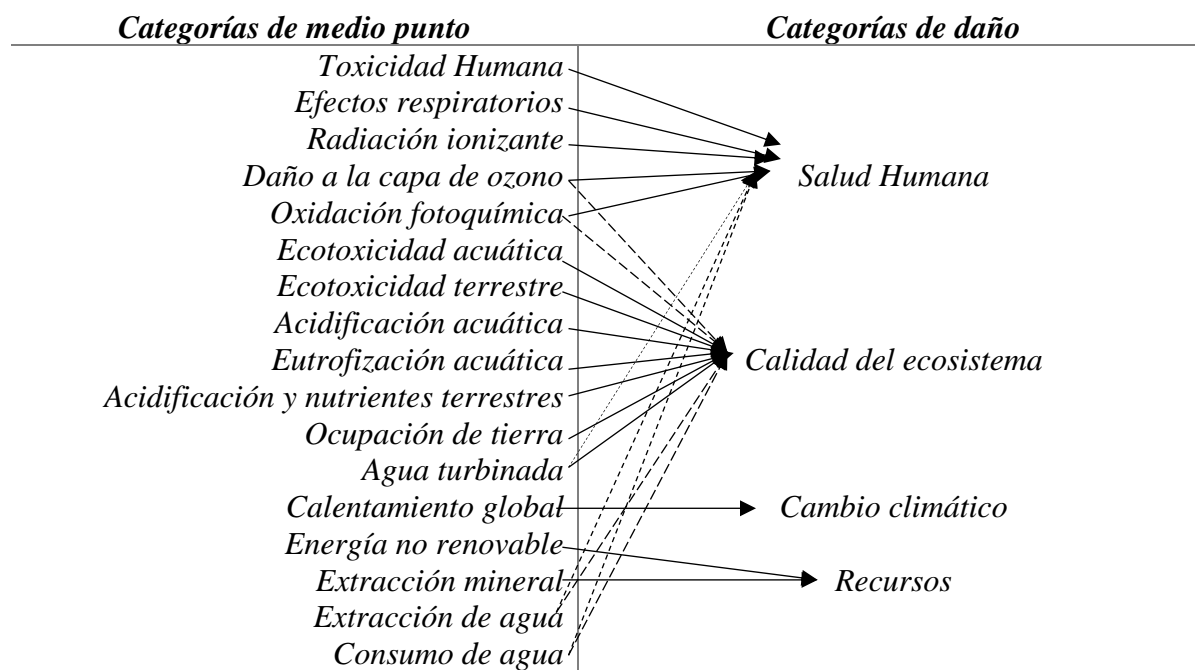
### ***Categorías de daño***

*De acuerdo con el perfil ambiental, se va a analizar la información por categorías de daño, de acuerdo con la*

*Tabla 3 Fuente: (Humbert et al., 2012).*

. Esto corresponde a la metodología utilizada para la evaluación de los impactos generados durante el ciclo de vida del Drywall.

*Tabla 3 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida.*



*Fuente: (Humbert et al., 2012).*

De acuerdo con las categorías de medio punto que fueron representativas para la evaluación de impactos, se determinó que las categorías de daño fueron las más relevantes,

dentro de las que se encuentran salud humana y calidad del ecosistema. Respecto a la primera, la categoría de efectos respiratorios causados por las sustancias inorgánicas emitidas (Humbert et al., 2012) fueron la principal causa ya que son difíciles de controlar y más cuando se realizan procesos de disposición final, en cuanto a la segunda categoría la disposición final aporta más debido a los valores obtenidos en las categorías de medio punto como la de acidificación acuática y acidificación y nutrificación terrestre y por sus aportes de dióxido de azufre tanto a la atmosfera como al recurso hídrico.

### ***Contribución por proceso***

Teniendo en cuenta que la categoría de daño en la cual hubo mayor aporte por parte de la disposición final fue salud humana, por lo cual se analizó la contribución del proceso respecto del gasto energético y los impactos producidos por la energía consumida en la producción del papel o cartón plegado utilizado, el estuco y los transportes (Tabla 4).

*Tabla 4 Contribución al calentamiento global por proceso.*

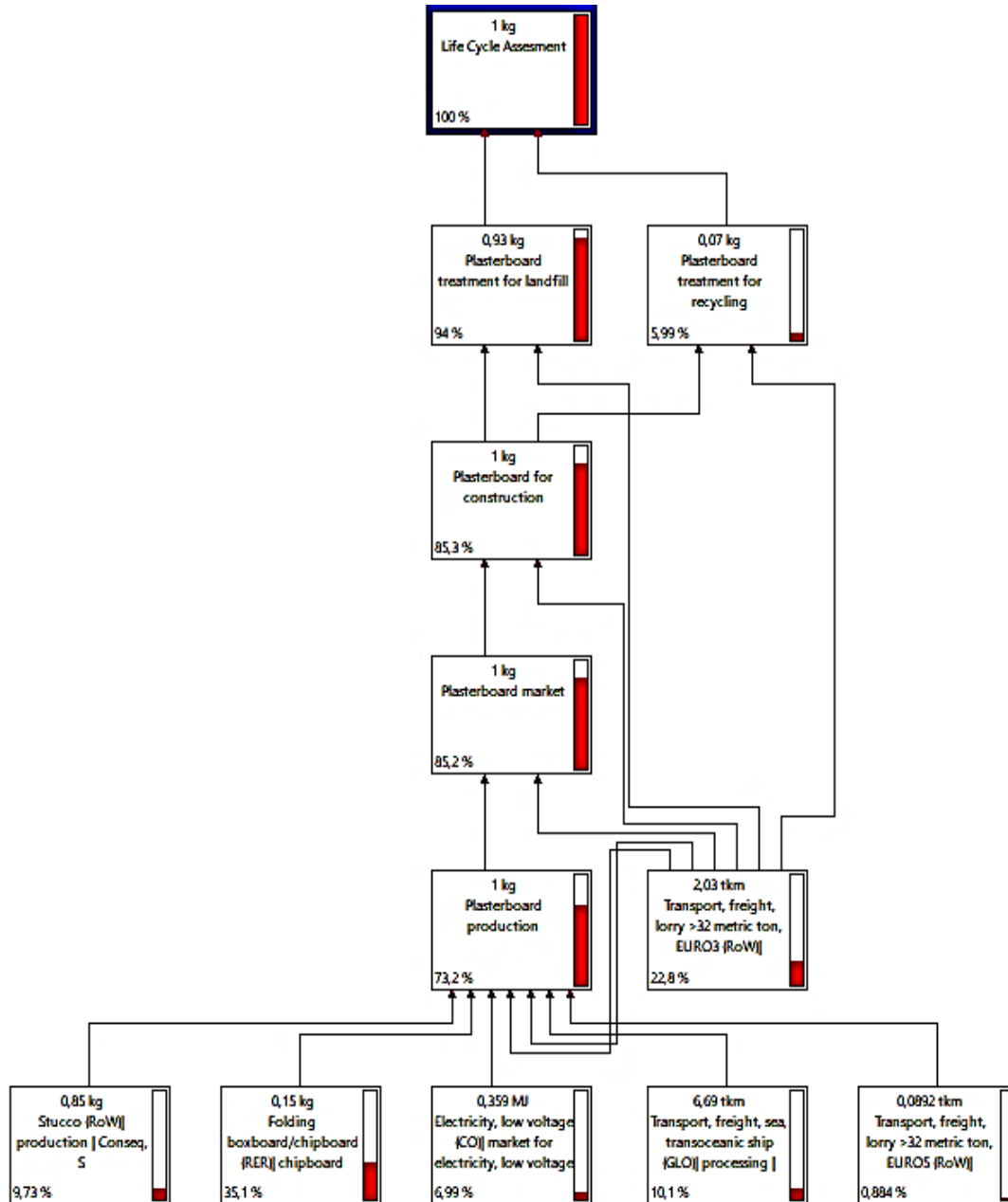
<b>Process</b>	<b>Unit</b>	<b>total</b>	<b>%</b>
<b>Electricity, low voltage</b>	DALY	6.4989E-07	9.20
<b>Folding boxboard/chipboard</b>	DALY	3.587E-06	50.77
<b>Stucco</b>	DALY	6.9347E-07	9.81
<b>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO3</b>	DALY	6.4753E-07	9.16
<b>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO3</b>	DALY	4.9923E-07	7.07
<b>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO5</b>	DALY	4.5495E-08	0.64
<b>Transport, freight, sea, transoceanic ship</b>	DALY	9.4322E-07	13.35

Para la contribución de procesos se tuvo en cuenta información como el gasto energético para 1 Kg de Drywall en Colombia, el cual es de 0,0996 Kwh/d (Mendoza Quevedo, 2012), además se tuvo en cuenta que se manejó 0,85 Kg de estuco y 0,15 Kg de papel para las placas y finalmente los tipos de combustibles usados en España (EURO 5) y los manejados en Colombia (EURO 3). De acuerdo con la Tabla 4, el mayor porcentaje de contribución al calentamiento global lo da la producción de papel con 50.7% seguido del transporte en transoceánico con 13.35% y finalmente esta la producción de estuco con 9,81%.

## Interpretación

El modelo de fin de ciclo de vida (Figura 10), es una red que muestra información específica sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por cada proceso descrito dentro del ACV del Drywall.

Figura 10 Modelo de fin de ciclo de vida del Drywall.



De acuerdo con el modelo de fin de ciclo de vida (Figura 10), el cual muestra los pasos tomados para el desarrollo del ACV con ayuda del software de SimaPro, muestra los impactos al medio ambiente por los aportes del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) incluyendo los transportes requeridos y el gasto energético.

Durante el proceso de producción del Drywall, el uso del papel tuvo mayor aporte de emisiones al calentamiento global con 35,1%, respecto del transporte en transoceánico con un aporte del 10,1%, del estuco con 9,73% y finalmente con un 6,99% de aporte de gasto energético por voltaje bajo. Por otro lado, el proceso que menos aporta a los gases de efecto invernadero es el transporte vehicular en España, el cual tuvo un aporte del 0,884%. En total el aporte por parte del proceso productivo fue del 73,2%, incluyendo el transporte del material en Colombia, con un aporte del 22,8%.

En cuanto al aporte por categorías la que obtuvo mayor puntaje fue la disposición final con un aporte del 94%, seguido por el uso en construcción y en mercadeo con un aporte del 85% y finalmente el de producción del Drywall. En cambio, el proceso que obtuvo el menor aporte de CO<sub>2</sub> a la atmosfera fue el reciclaje del Drywall con 5,99%.

#### **4.3. Estudios realizados**

Es importante conocer cuáles son los tipos de aprovechamiento y los procedimientos que se han llevado a cabo en el mundo y cuales han sido efectivos respecto a aspectos relevantes el económico, el consumo energético, la logística requerida y las implicaciones a nivel ambiental. Todo lo anterior con el fin de poder formular nuevas alternativas para poder realizar una guía de aprovechamiento del Drywall como RCD en la ciudad de Bogotá.

En Colombia se han llevado a cabo procesos de aprovechamiento, pero aún siguen siendo insuficientes, por falta de logística, recursos y entidades que se encarguen de la vigilancia y cumplimiento de la normatividad. Por otro lado, ninguno de los procesos de recuperación que se le realiza al Drywall en Colombia se encuentra documentado en algún estudio o investigación.

#### **4.3.1. Alternativas de aprovechamiento en el mundo**

El yeso ha sido muy importante para el desarrollo de las civilizaciones. Este material ha servido tanto para las obras civiles, como también ha sido importante para la arquitectura. Por ejemplo, en Portugal en el siglo XVIII, el yeso fue muy importante para la arquitectura tanto para decoración en edificios de nobles, hasta elementos más sencillos como en construcciones comunes. (Teresa, Veiga, Santos, & Brito, 2019). En la actualidad el material se ha utilizado más que todo como material de construcción; sin embargo, el contexto socioambiental ha cambiado y se han evidenciado problemas en cuanto a la gestión de los residuos.

De acuerdo con lo anterior, un estudio realizado en universidades de Holanda, Francia, Italia y Tailandia se reportó que, en promedio, se están generando 0.9 toneladas de residuos de yeso de una construcción de una vivienda unifamiliar y 49 kg de yeso por metro cuadrado de la estructura del edificio. (Kijjanapanich, Annachhatre, Esposito, Hullebusch, & Lens, 2013). Por otro lado, según la EPA (Environmental Protection Agency), los residuos de yeso representan del 21 al 27% del total de RCD generados en los EE. UU. y casi el 40% es una fracción fina entre arenas, yeso. (Kijjanapanich et al., 2013).

La importancia del yeso como material se ha representado en las investigaciones que se han realizado en varias partes del mundo, ya que se han formulado diferentes propuestas de aprovechamiento para la recuperación del material como materia prima, siendo una ventaja no solo económica, sino que también a nivel ambiental, ya que lo que tienen en común la mayoría de estos estudios es disminuir el impacto negativo sobre el medio ambiente.

Los artículos que se enuncian a continuación muestran estudios que se han realizado en Colombia, países Americanos, Europeos y Asiáticos, pero también hay artículos comparativos entre dos o más países. Hay investigaciones sobre la reutilización de yeso a partir de residuos de Drywall y a partir de agregados mezclados como RCD tales como arcillas, residuos pétreos con yeso en polvo. Por otro lado, también hay investigaciones sobre el uso del yeso como subproducto en el proceso de desulfuración de gases en las termoeléctricas.

Se tendrán en cuenta todos estos artículos con el fin de evaluar todas las posibles opciones que se pueden tener en cuenta para el aprovechamiento del Drywall y las posibles soluciones que se pueden formular para mejorar la gestión y el aprovechamiento de este material en Colombia y más específicamente para el caso de Bogotá.

Tabla 5 Cuadro comparativo de los escenarios de referencia.

PAÍS	ARTÍCULO	YR	YN	W	C	A	S	E	L	P	BF	BPM	Ci	V	NV	T	MP
CH/A	(Begliardo, Sánchez, Panigatti, & Garrappa, 2013).	x	x								x	x			x		
BRA	(Geraldo et al., 2017b).	x	x	x								x	x				
	(Geraldo, Souza, Campos, Fernandes, & Camarini, 2018).	x	x	x		x						x		x			
	(Cristina, Cordon, Carvalho, & Furlan, 2019).	x	x	x							x	x		x			
	(Erbs et al., 2018).	x	x	x								x		x			
	(Araújo et al., 2008).	x	x	x		x				x		x		x			
UE	(Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017b).	x											x	x		x	x
ESP	(Suárez et al., 2018).	x				x									x		
	(Pedreño-Rojas et al., 2019).*	x	x	x								x			x		
	(Suárez et al., 2016).	x			x						x	x			x		
	(Piñeiro, Merino, & García, 2015).	x	x			x						x			x		
NED	(Leising et al., 2018).												x			x	x
PORT	(Suárez et al., 2018).	x				x									x		
ITAL	(Teresa et al., 2019).	x									x	x		x		x	x
POL	(Pantini et al., 2019).	x	x			x			x					x			
EGY	(Stankowski, Sobolewska, Jaroszevska, & Gibczyńska, 2018).	x		x	x	x									x		
EGY/JAP	(Ahmed & Issa, 2014).	x		x	x	x						x			x		
EGY/JAP/ CAN	(Ahmed, Ugai, & Kamei, 2011).	x		x	x		x								x		
JAP	(Ahmed, Soliman, El, & Kamei, 2015).	x		x	x		x					x			x		
CHI	(Zhu et al., 2018). (Ahmed & Ugai, 2011).	x		x		x									x		
BOG	(Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017).	x		x				x			x	x					
MED	(Sierra, 2017).	x		x							x	x			x	x	

YR Yeso Reciclado

YN Yeso Natural

W Agua

C Cemento, cemento reciclado y/o cal

A Agregados (Cerámica, porcelana, fibras, plástico)

S Uso en el Suelo

E Estuco

L Lodos de aguas residuales

P Reutilización del papel o celulosa

V Viable

NV No Viable aún

T Teórico

BF Buen tiempo de Fraguado

BPM Buenas Propiedades Mecánicas

Ci Reciclable por más de 3 ciclos.

MP Material de Post consumo

De acuerdo con la Tabla 5, se han realizado investigaciones en 15 países incluyendo Colombia, en las cuales se han desarrollado procesos de aprovechamiento del Drywall o se han propuesto metodologías de aprovechamiento del material. Algunas solo han sido propuestas que son potencialmente sostenibles.

Por otro lado, para la información que se encuentra registrada en la tabla se tuvieron en cuenta los aspectos más importantes de cada una de las investigaciones. Se consideraron: materiales utilizados, insumos y las alternativas que se están considerando en cada una de las investigaciones como el uso del Drywall reciclado como agregado del cemento, como agregado, como estuco, también como estabilizador de suelos y como enmienda para los suelos. Además, existen estudios en los que dicen que se puede utilizar como tratamiento de los lodos como subproducto de aguas residuales y también el uso de otros materiales como el papel o el plástico para mejorar las propiedades del material.

Por último, las investigaciones que se tuvieron en cuenta y que se analizaron fueron aquellas que tenían metodologías prácticas desarrolladas con posibles resultados para poder ser replicadas y poder demostrar que las propiedades mecánicas de los materiales mejoran o son iguales que cuando se utiliza el yeso natural.

#### ***Uso del Drywall reciclado en cemento.***

Para el desarrollo de esta alternativa de aprovechamiento se tuvo en cuenta un estudio realizado en Brasil, donde se utilizó el yeso reciclado entre otros materiales para la obtención de un agregado con la calidad esperada para mejorar el tiempo de fraguado del yeso (Araújo et al., 2008).



**Materiales:**

- ✓ Yeso natural (NG)
- ✓ Yeso reciclado (RG)
- ✓ Piedra caliza
- ✓ Pulpa de celulosa obtenida de las bolsas de cemento Kraft desechada (cel-cb).
- ✓ Agua



*Figura 11 Cemento reciclado.  
Fuente: (Chile Desarrollo Sustentable, 2017)*

**Procedimiento:**

- ✓ Deshidratar el RG en un horno con ventilador a 85°C y moler en un molino de bolas por 20 min.
- ✓ Se debe realizar una prueba de pureza del material de NG y RG con ácido clórico diluido, normalmente se disocia en anhídrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) y óxido de calcio (CaO) y cuando hay presencia de impurezas se expresan como residuos insolubles RI.
- ✓ Tamizar la piedra caliza con la malla de 100, 200, 325 y >3257.
- ✓ poner 6g de papel Kraft por litro de agua potable en el hidropulper por 30 min, al final la pulpa queda con 75% de humedad, mezclar 5 min más
- ✓ Preparar una suspensión de 0,001% de fibras de la pulpa en 700 ml de agua para hidratar durante 4 horas y poner en bolsas para ponerlo en un frigorífico.
- ✓ Se utilizaron los métodos de mezcla para secado al vacío, moldeo por succión-compresión, comportamiento mecánico, microestructura y calorimetría.

**Resultados esperados:**

- El proceso de moldeo por succión- compresión, hace que el material tenga un rendimiento mecánico alto. Al haber agregado pulpa al yeso, cambia la cinética de hidratación del yeso, además de incrementar la inducción. Las fibras naturales al retener más agua, posibilita la formación de cristales más largos.
- Las muestras con un 12,5% de pulpa aumenta la resistencia del material en un 160%, lo que lo caracteriza como un material resistente al impacto y al módulo de ruptura.

**Beneficios del uso del Drywall reciclado en el cemento:**

De acuerdo con el ACV realizado en España (Suárez et al., 2016) para el aprovechamiento del yeso reciclado a partir del Drywall se encontró que:

- El yeso reciclado RG recorre una distancia igual o inferior a 30 km, consume menos del 65% de la energía requerida para producir NG y emite menos del 65% de los GEI. En cuanto a efectos carcinogénicos, agotamiento de la capa de ozono y categorías de ocupación de la tierra, está por debajo de 65%. El impacto negativo es que hay emisión de partículas al aire durante el proceso de trituración.
- El transporte de GW a plantas de reciclaje ubicadas a distancias cortas (7 km) tiene un ahorro del 70% en la categoría de ocupación de la tierra y un ahorro de más del 45% en las categorías de extracción de minerales y efectos no cancerígenos.
- El RG como NG como retardantes de fraguado en la producción de OPC, sirven de igual manera y no se encontraron diferencias. Es necesario realizar pruebas cualitativas y cuantitativas para dar mejores resultados

### *Uso del Drywall reciclado en estabilización de suelos.*

A continuación, se presentan diferentes metodologías que se han desarrollado ya sea para mejorar las propiedades físicas o químicas del suelo. En la siguiente metodología se describen los materiales y procedimientos que se llevaron a cabo para el mejoramiento de las propiedades del suelo propuesto por (Ahmed & Issa, 2014).

#### **Materiales:**

- ✓ Suelo de arcilla blanda
- ✓ yeso reciclado a partir de Drywall
- ✓ Cemento o cal (previenen la solubilidad del yeso y mejoran la durabilidad del yeso contra el remojo).



Figura 12 estabilización de suelos  
Fuente: (Nacional Lime Association, 2004)

#### **Procedimiento:**

- ✓ Recolectar suelo arcilloso de 5 a 10 cm de profundidad, empacarlo en bolsas para después caracterizarlo, en porcentaje de arena fina, limo y arcilla. Es necesario que el suelo sea suelo arcilloso
- ✓ Se tuvieron en cuenta características de gravedad específica, %límite líquido, %límite plástico e índice de plasticidad, pruebas de resistencia y durabilidad, cambio de deformación (hinchazón- asentamiento), porcentaje de deterioro del suelo y absorción de agua.
- ✓ El yeso reciclado se debe triturar, tamizar y calentar para eliminar la humedad. Los residuos de yeso son hidrato de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y el

reciclado es hemihidrato de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), que se llama yeso reciclado.

- ✓ El cemento o la cal se puede mezclar con el yeso en proporciones de 1:1 y 2:1 con un 22,5% de suelo arcilloso.
- ✓ Realizar pruebas de compresión no confinada, cambios de volumen y deterioro.
- ✓ El uso de yeso reciclado, solidificado con cemento o cal en proyectos de mejoramiento de suelos dentro de los límites investigados, es resistente al efecto de las acciones de remojo en términos de cambios de deformación.

También existe otro estudio realizado en Japón donde se propone otra metodología para el uso del yeso reciclado en la estabilización de los suelos.

#### **Materiales:**

- ✓ Suelo arenoso
- ✓ Cemento
- ✓ Yeso reciclado del Drywall.

#### **Procedimiento:**

- ✓ El Drywall se debe pulverizar y tamizar, para después calentar la fracción fina a  $160^\circ\text{C}$ .
- ✓ Se pueden usar porcentajes de 0, 5, 10 y 20% de yeso en el suelo y para el contenido de cemento también se utilizaron porcentajes de 2,5% y 5% por peso de suelo.

- ✓ Se debe realizar un proceso de curado por 7 días a temperatura ( $21 \pm 1$  ° C) y más de 98% de humedad relativa.
- ✓ Las mezclas deben ser óptimas para los procesos de estabilización de los suelos en húmedo-seco.

Por otro lado, un estudio realizado entre Egipto y Japón determinaron el uso del yeso reciclado en conjunto con otros materiales para el mejoramiento de la calidad de los suelos haciendo uso tanto del yeso reciclado a partir del Drywall como de residuos de plástico (Ahmed et al., 2011).

#### **Materiales:**

- ✓ Suelo de grano fino.
- ✓ Yeso reciclado "basanita" proveniente del Drywall.
- ✓ Bandejas de residuos de plástico
- ✓ Cemento Portland.

#### **Procedimiento:**

- ✓ Medir las características físicas, mecánicas y químicas del suelo.
- ✓ El yeso reciclado se debe triturar y calentar entre 130-160°C para pasarlo de hidrato de sulfato de calcio a hemihidrato de sulfato de calcio.
- ✓ Pulverizar y tamizar para quitar las impurezas.
- ✓ Las bandejas de plástico se deben cortar en tiras de ancho de 2,5 mm.
- ✓ El suelo analizado, el yeso reciclado y el cemento se deben mezclar seco y luego se pueden agregar las tiras de plástico de desecho a la mezcla con un porcentaje

de 0.45 y 1,4%, después se pueden poner en moldes, para compactarlos haciendo uso de un gato hidráulico hasta alcanzar la densidad deseada

- ✓ Extraer de los moldes después de 24 h.
- ✓ Someter a curado durante siete días a temperatura ( $21 \pm 1$  ° C) y humedad relativa por encima del 98% antes de la prueba.
- ✓ Realizar pruebas de fraccionamiento, compactación, aumento capilar a las mezclas.

**Nota:** Al aumentar la cantidad de yeso y plástico el tiempo de la muestra se reduce la capilaridad, haciendo más demorado la humectación de la muestra de suelo (Ahmed et al., 2011).

#### ***Uso del Drywall reciclado en la fertilización de los suelos.***

A continuación se presenta una propuesta realizada en Polonia para la fertilización de los suelos haciendo uso de cenizas de árboles coníferos y cenizas de paja de cultivos de cereales propuesto por (Stankowski et al., 2018).

#### **Materiales:**

- ✓ Cenizas de árboles coníferos
- ✓ Ceniza de paja de cultivos de cereales
- ✓ Lima marca PROFITKALK
- ✓ Yeso sulfoPROFIT

**Procedimiento:**

- ✓ Se pueden agregar mezclas con las siguientes características: 60% ceniza y 40% lima o yeso.
- ✓ Realizar caracterizaciones de la ceniza de pH, fosforo, potasio, magnesio, calcio, hierro, manganeso, cinc, plomo, cromo, níquel y oro.
- ✓ Agregar 3 tipos de dosis, al suelo de 2,4 y 6 Ton ha<sup>-1</sup>.
- ✓ Como muestras de control se pueden usar fertilizantes comerciales.

**Resultados esperados:**

- La fertilización tanto con los productos comerciales como con la ceniza, no tienen efectos en el cambio de reacción ni en el contenido de materia orgánica, al igual que el contenido de nitrógeno en el suelo.
- La ceniza de madera aumento el fosforo del suelo, en cambio la ceniza de paja aumento en gran cantidad de potasio y ambos aumentaron la cantidad de calcio intercambiable del suelo.

***Uso del Drywall reciclado para la realización de estuco.***

De acuerdo a una investigación realizada en la universidad de La Salle se analizó la viabilidad del reciclaje del Drywall como Residuo de Construcción y Demolición en las obras para realizar estuco (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017). A continuación, se presenta el procedimiento que se llevó a cabo en la investigación para la obtención del estuco que cumpla con las normas de calidad.

**Materiales:**

- ✓ Yeso reciclado a partir del Drywall.
- ✓ Agua.

**Procedimiento:**

- ✓ 500 ml de agua y 1 Kg de yeso previamente molido y tamizado
- ✓ Agregar a un recipiente de amasado durante 30 segundos al agua y se deja reposar 60s.
- ✓ Nuevamente se mezcla durante 30s. en forma de ocho, se deja reposar la mezcla durante 30s.
- ✓ Se mezcla de nuevo durante 30s.
- ✓ Se coloca el molde sobre la placa de vidrio y se rellena con la pasta, enraza.
- ✓ A los 3,15 min se levanta el molde en posición vertical. Se mide el diámetro de la expansión de la mezcla en dos posiciones perpendiculares determinando el valor medio.
- ✓ si el valor es  $< 150$  mm se debe repetir el ensayo con más agua, si el valor obtenido es  $> 210$  mm se repite el ensayo con mayor cantidad de yeso, si el valor obtenido está entre (150mm-210mm) se anota la masa de yeso empleada. A partir de este valor sale la relación masa agua/masa yeso reciclado.
- ✓ Medir el peso específico del yeso.
- ✓ Usar azul de metileno para saber si hay presencia de agregados finos y minerales.
- ✓ Medir contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición



- ✓ Medir tiempo de fraguado con el aparato de Vicat, aguja de Gilmore
- ✓ Realizar falla de cubos por compresión.

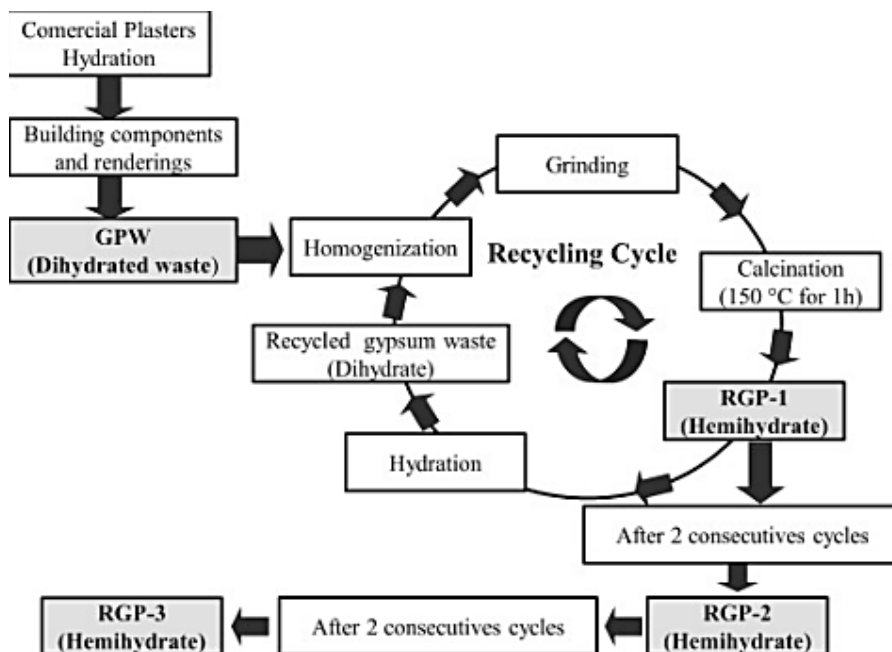
### *Uso del Drywall reciclado en la producción de Drywall.*

Todos los procedimientos que se van a describir a continuación fueron realizados en Brasil y fueron realizados con la finalidad de poder reutilizar los materiales para la producción del Drywall nuevamente. Respecto a la siguiente investigación fue realizada por (Geraldo et al., 2017b).

### **Materiales:**

- ✓ Placa de Drywall comercial (CGP)
- ✓ Residuos de placa de Drywall como (GPW)
- ✓ Agua.

Figura 13 Ciclo de reciclaje del Drywall en Brasil.



Fuente:(Geraldo et al., 2017b).

**Procedimiento:**

- ✓ Recolección del yeso GPW
- ✓ Fue secado al sol, molido hasta que el tamaño de las partículas fuera un 80% de 0,297mm.
- ✓ Calcinar por 1 hora a  $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Este yeso fue llamado RGP-1.
- ✓ Cuando se recirculo el material dos veces, es decir se realizaron los mismos procedimientos anteriores, el material se llamó RGP-2.
- ✓ Al verificar que las propiedades no cambiaban mucho volvieron a realizar otros dos ciclos y llamaron este yeso RGP-3.
- ✓ Este proceso se puede realizar con el fin de verificar la calidad del yeso reciclado varias veces.
- ✓ Se pueden analizar las muestras haciendo uso de métodos de difracción de rayos -X (XRD), Termogravimetría (TG), Derivada de termogravimetría (DTG), análisis térmico diferencial (DTA)

En la siguiente investigación realizada por (Cristina et al., 2019) se realizó un procedimiento en el que se utilizó tanto yeso natural como yeso reciclado, además de otros insumos para mejorar las propiedades del material:

**Materiales:**

- ✓ Yeso comercial (CP)
- ✓ Yeso reciclado calcinado (RP)
- ✓ Mezcla entre reciclado y comercial (CP\_50%-RP\_50%)

- ✓ Agua
- ✓ Citrato de sodio como aditivo retardador de fraguado.

**Procedimiento:**

- ✓ Las pruebas pueden realizar tanto en muestras secas como hidratadas.
- ✓ El material se trituro hasta obtener un tamaño de partícula de 1,2 mm, se calentaron 50g de este yeso a 3 temperaturas (140, 150 y 160°C)
- ✓ Se midieron las pérdidas de masa en diferentes periodos, cuando la temperatura varía entre (30, 60 y 60°C) y en intervalos de tiempo (90, 120, 150 y 210 min).
- ✓ La pérdida en masa máxima fue de un 20%, así dedujeron la cantidad de tiempo requerida y la temperatura necesaria para secar el resto del material a 160°C por 150 min.
- ✓ Dentro de los métodos experimentales utilizaron: Difracción de rayos X en polvo (XRPD), Análisis termogravimétricos (TGA), Densidad aparente y módulo de finura, distribución de tamaño de partícula y área de superficie específica (BET), Proporción agua / yeso para pasta de consistencia estándar y tiempo de fraguado.

**Resultados esperados:**

- El yeso reciclado tiene mejor tiempo de fraguado que el comercial, es 2.5 veces mayor.
- La resistencia a la compresión el yeso reciclado es 70% mayor que el material muestra comercial, puede deberse a su mayor nivel de impurezas, como la dolomita.
- Las partículas de material reciclado son más pequeñas que la muestra comercial.

La investigación realizada por (Erbs et al., 2018), fue para verificar la posibilidad de la recirculación del material a través de varios ciclos para su reutilización en la producción de placas de yeso para lo cual necesito lo siguiente:

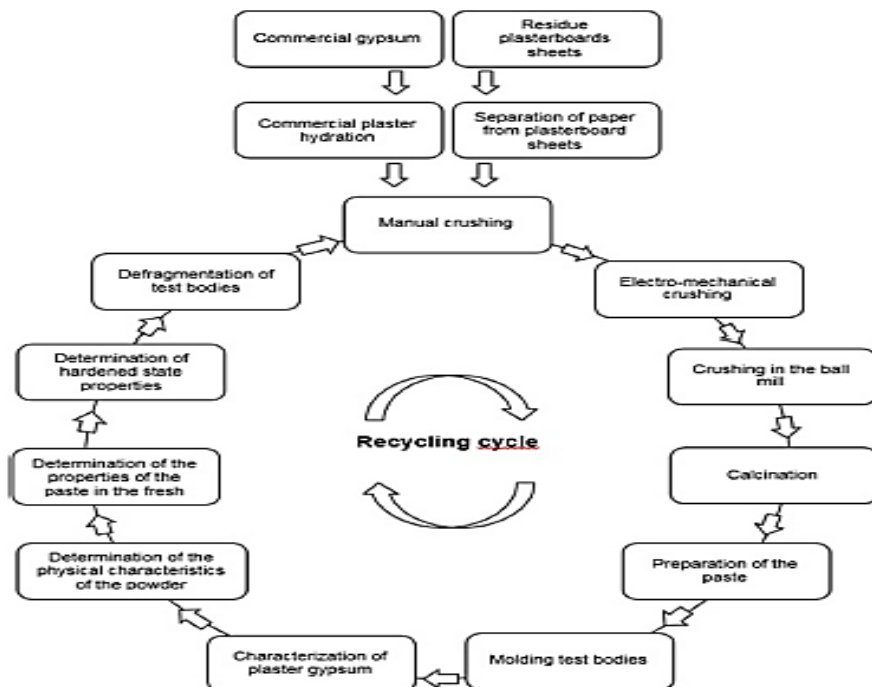
**Materiales:**

Yeso residual a partir de placas de 12,5 mm de espesor, donde se encuentra el yeso con revestimiento fino, revestimiento grueso, yeso fundido delgado y yeso fundido grueso.

**Procedimiento:**

- ✓ Se trituro el material manualmente haciendo uso de un cilindro de prensado. De 150 Kg de residuos salieron 83 Kg de yeso. Después de molerlo dentro del mismo cilindro se esterilizo y seco en el horno eléctrico.
- ✓ Se mantuvo la muestra a 180°C durante 24 horas y posteriormente se puso en bolsas con el fin de que la muestra se humectara con el aire.
- ✓ Para determinar las propiedades físicas, se realizaron pruebas de módulos de granulometría, densidad aparente y finura, de acuerdo con la norma brasileña ABNT NBR 12127: 1991.
- ✓ En la realización de esta investigación todas las muestras pasaron por 5 ciclos de

Figura 14 Ciclo del yeso comercial y reciclado.



Fuente: (Erbs et al., 2018)

### Resultados esperados:

- El yeso reciclado debe ser viable al menos hasta el tercer ciclo. Además, se puede mejorar usando mezclas con yeso comercial.
- El uso de mezclas con yeso comercial aumento la resistencia en los 5 ciclos, este aumento se debe a un mejor acoplamiento de los cristales, por lo que han menor espacio entre cada cristal. Hay que tener en cuenta que microscópicamente el yeso comercial es más alargado que el yeso reciclado.

Después de haber revisado todas las investigaciones que se han realizado sobre el aprovechamiento del Drywall, se tuvieron en cuenta los pros y contras que aparecieron en

cada uno de estos estudios, por lo que en la Tabla 6 se presentan las ventajas y desventajas que existen al momento de realizar el aprovechamiento del Drywall como RCD.

*Tabla 6 Cuadro comparativo ventajas y desventajas del aprovechamiento del Drywall*

<b>APROVECHAMIENTO DEL DRYWALL</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
1. Se puede reciclar por más de tres ciclos.	1. Hay un mínimo de gasto energético
2. No requiere de mucha agua.	2. La calidad es inferior al agregado tradicional
3. Disminución de la huella de carbono en un 25,5%	3. De acuerdo con algunos estudios es posible que no se pueda recircular después de 5 ciclos de reciclado del material
4. Reducción de la cantidad de energía requerida en un 65%	4. Falta de normatividad respecto a la circularidad de los materiales (EC)
5. Menor cantidad de emisiones, por lo tanto, menos gases de efecto invernadero	5. Falta de entes regulatorios que vigilen el cumplimiento de las normas existentes.
6. Es un material moldeable, liviano, estético, buen aislante térmico, acústico, resistente al fuego.	
7. Es un material económico.	
8. Reducción de puntos de vertimientos ilegales.	
9. Reducción de la ocupación de rellenos sanitarios para residuos especiales.	
10. Disminución del uso de materias primas provenientes de puntos de explotación.	
11. Protección de los Recursos Naturales	

#### **4.4. Marco de referencia de la Economía Circular**

De los 28 países que hay dentro de la Unión Europea solo 8 países gestionan correctamente los RCD. Por otro lado, algunos han logrado disminuir la cantidad de residuos en rellenos sanitarios como Dinamarca, Países Bajos y Reino Unido (Castaño, Mislé Rodríguez, Lasso, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013).

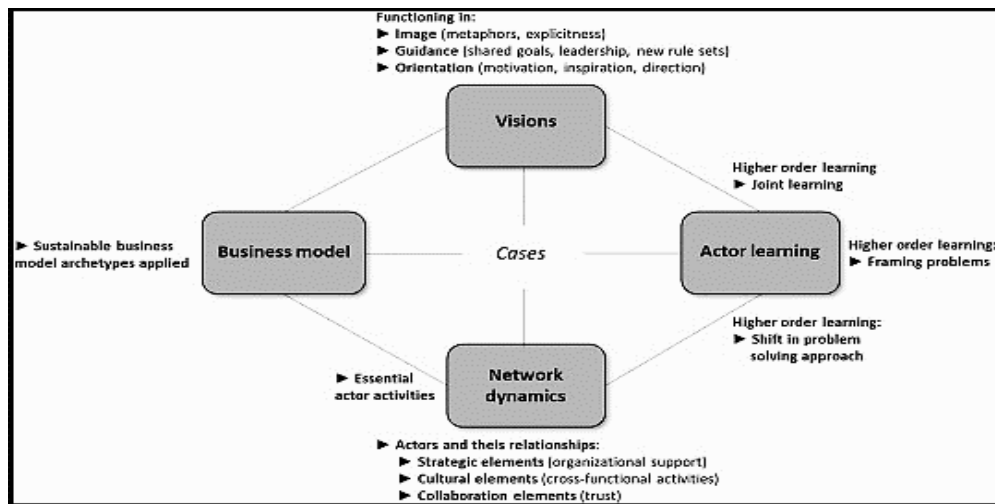
Debido a la necesidad que hay de mejorar el aprovechamiento de los RCD más efectivamente la Unión Europea decidió crear un proyecto de aprovechamiento del yeso que se llama life + Gypsum to Gypsum (GtoG) que significa “de la producción al reciclaje”. (Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017b). Está relacionado directamente con el término

de la EC ya que buscan la unión de varias industrias como la de Construcción, Demolición (C&D) y reciclaje la del Drywall.

Por otro lado, para el caso de un estudio en particular realizado en Países Bajos en que se maneja una metodología de la EC para el sector de la construcción, lo primero consideraron fue a las organizaciones, empresas y actores individuales en las cadenas de suministro (Leising et al., 2018). Es a lo que comúnmente se le conoce como dinámica de redes o teoría de redes. La EC se define en tres elementos importantes como: los actores, dinámica de trabajo, visión y modelo de negocio (Figura 15) (Leising et al., 2018).

Por otro lado, dentro de la misma propuesta de aprovechamiento se consideró importancia de la EC para llevar a cabo un proceso de desarrollo sostenible dentro de un modelo de negocio innovador como lo es la optimización de materiales, eficiencia energética, crear valor a partir de los residuos, sustitutos por materiales renovables, funcionalidad, suficiencia, social, valor inclusivo (Leising et al., 2018).

Figura 15 Modelo de negocio para incorporar la Economía Circular.



Fuente: (Leising et al., 2018).

De acuerdo con las investigaciones realizadas lo más importante para tener en cuenta al iniciar un modelo de negocio basado en la EC son 3 cosas que son: seleccionar todos los factores que pudieran influir en el desarrollo del proyecto, consultar a las partes interesadas y análisis de los datos con el fin de verificar la viabilidad (Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017b). De acuerdo con lo anterior los factores que se deben tener como referencia son:

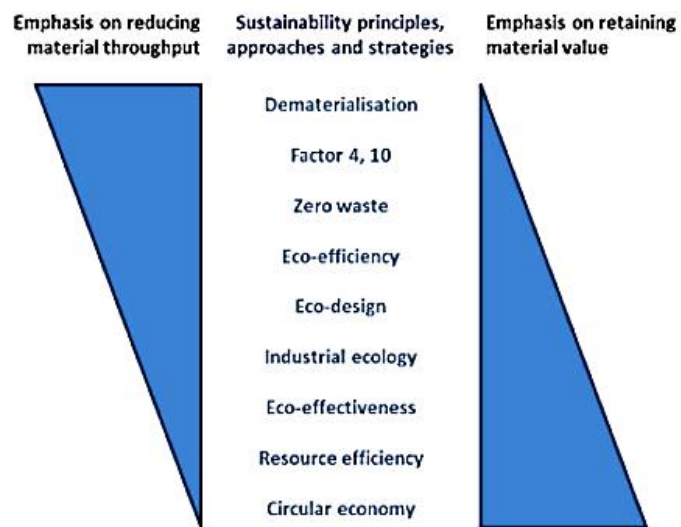
- ✓ Disponibilidad del yeso natural.
- ✓ Impactos de la disposición del Drywall en vertederos o rellenos sanitarios y del reciclaje de este.
- ✓ Herramientas de calificación de construcción.
- ✓ Grupos de interés.
- ✓ Costos ambientales (disposición final).
- ✓ Criterios de contratación.
- ✓ Prohibición de vertederos.
- ✓ Costo de operación de los vertederos.
- ✓ Destinos legales alternativos.
- ✓ Estado legal de los RCD específicamente del Drywall.
- ✓ Objetivos y metas específicos para la gestión del Drywall.
- ✓ Gravámenes y multas.
- ✓ Precio del material post consumo.
- ✓ Tarifa del reciclador.
- ✓ Marco normativo relacionado con la construcción y la deconstrucción.
- ✓ Marco regulatorio que favorece materiales reciclados.



- ✓ Estrategia para tener en cuenta para los recicladores de Drywall.
- ✓ Soluciones software para la gestión de los residuos.

Por otro lado es importante tener en cuenta la diferencia entre los conceptos que se han asemejado a la EC por lo que sus principales diferencias radican en el porcentaje de reducción de material de disposición final y el valor que se le daría al material de post consumo tal y como se ve en la Figura 16 (Iacovidou et al., 2017).

*Figura 16 Diferencia de la EC y otros conceptos similares.*



*Fuente: (Iacovidou et al., 2017)*

## **4.5. Empresas relacionadas con el Drywall en Colombia**

### **4.5.1. Empresas productoras e importadoras de Drywall en Colombia**

#### ***KNAUF de Colombia S.A.S***

Knauf es la única empresa productora de Drywall en Colombia, se ha caracterizado por una empresa responsable con el medio ambiente, de hecho, en diversas partes del mundo

Knauf ha implementado su planta, la cual puede ser una empresa para considerar dentro de la cadena de aprovechamiento de las placas de Drywall.

De acuerdo con la información proporcionada anteriormente, las plantas productoras de placas de yeso o Drywall existentes en la actualidad se encuentran en la zona industrial de Cartagena (Mamonal) y de ahí distribuyen y comercializan sus productos al interior del país (Sierra, 2017)

### ***Panel rock Colombia S.A.***

Su casa matriz se encuentra en México (Panel Rey). (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017, p. 41) es una empresa reconocida a nivel nacional por su capacidad de instalación, suministro, diseños constructivos y arquitectónicos en los sistemas livianos de construcción en seco (Drywall). El panel de yeso Regular que se exporta de Panel Rey y es manejado por la empresa Panel Rock Colombia S. tiene un núcleo incombustible hecho esencialmente de yeso cubierto por ambos lados con papel 100% reciclado.(Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017, p. 41).

Panel Rock S.A. introdujo por primera vez en Colombia los sistemas livianos de construcción en seco (Sierra, 2017, p. 111), en el 2014 estaban exportando 3,5% del Drywall producido en México (Dirección General de Desarrollo Minero, 2016). De acuerdo con (Gómez Ángel & Arciniegas Bermúdez, 2017, p. 201) Panel Rock Colombia tiene un desperdicio de Drywall de 3 a 5% de un 100%, además de acuerdo con el arquitecto Néstor Cárdenas contratista de la empresa tiene conocimiento de que el Drywall residual de procesos constructivos está siendo utilizado para procesos de masilla, fertilización de cultivos y finalmente dispuestos en rellenos sanitarios.

#### 4.5.2. Empresas gestoras de Drywall en Bogotá

##### *Centros de Tratamiento y Aprovechamiento- CTA y recuperadores específicos.*

De acuerdo con el directorio de la secretaria de ambiente estas son las empresas que se encuentran en la ciudad de Bogotá y que están encargadas del tratamiento y aprovechamiento específicamente para los residuos del Drywall en Bogotá y las empresas que se encargan de reciclar el material en vez de enviarlo a disposición final.

*Tabla 7 Empresas gestoras del Drywall en Bogotá.*

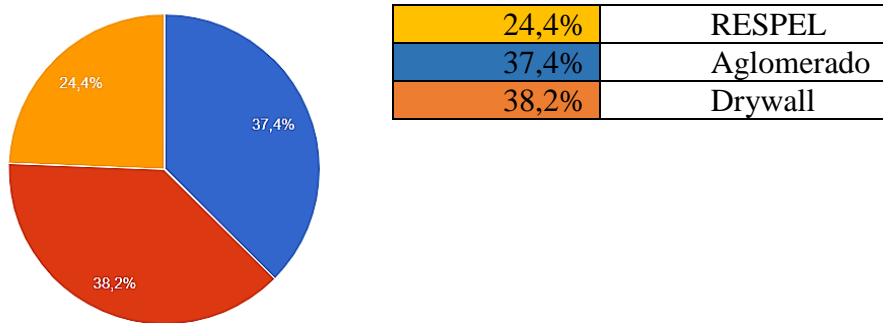
<b>Centros de Tratamiento y Aprovechamiento-CTA de Drywall en Bogotá.</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Dirección</b>	<b>Materiales que se reciclan</b>
<b>C&amp;D Green Investments</b>	Calle 71B 75-70 Bogotá	Recepción de residuos de Drywall. para aprovechamiento y valoración en insumos de construcción y agrícolas
<b>Recuperadores específicos de Drywall en Bogotá.</b>		
<b>Recolectora el triunfo</b>	Cra. 68 C 74B-43 Engativá	Recolección, acopio y comercialización de RCD aprovechables entre los que se encuentra el Drywall
<b>Reciclajes Martha</b>	Cra. 69 K 73 A-87 Bogotá.	Recolección acopio y comercialización de residuos entre los que se encuentra el Drywall
<b>Chatarrería ambiental FM S.A.S.</b>	Cra. 79 69B-35 Bogotá.	Recolección, transporte, almacenamiento, y comercialización de residuos entre los que está el Drywall.
<b>Metales &amp; Varillas A.M S.A.S.</b>	Calle 78 B 69 B- 60 Bogotá.	Realizan procesos de recolección, acopio y comercialización de residuos de Drywall y otros.
<b>Martha S.A.S.</b>	Cra. 69 K 73 A-87 Bogotá	Aprobado como recuperador específico de RCD aprovechables entre estos se encuentra el Drywall.
<b>Recuperadora ambiental las vegas</b>	Bogotá.	Recuperador específico de varios materiales como Papel-Cartón, Drywall, Icopor, entre otros.
<b>MAAT Soluciones Ambientales</b>	Bogotá	Esta gestión incluye la disposición final y aprovechamiento de los residuos como madera, pétreos, RESPEL, residuos de PVC, ICOPOR, botellas plásticas, Drywall (Recortes de Drywall y láminas de Drywall rotas), papel, cartón, metal y demás residuos plásticos.

Fuente: (Subdirección de Control Ambiental al Sector Público– SCASP y Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, 2019).

También hay empresas como la de MAAT Soluciones Ambientales que se encargan de la gestión de RCD, cumpliendo con la normatividad ambiental vigente. A continuación, se

encuentran estadísticas de la cantidad y tipos de residuos que han sido aprovechados por la empresa MAAT Soluciones Ambientales y la cantidad de Residuos que han sido dispuestos.

Figura 17 Residuos que se han gestionado por MAAT



Fuente:(MAAT soluciones Ambientales, 2019).

De acuerdo con la Figura 17, los porcentajes corresponden a un total de 2.550.448 Kg de residuos, donde el 38,2% correspondiente al Drywall, es decir 973.541,93 Kg. (MAAT soluciones Ambientales, 2019). Esta cantidad de material que puede ser potencialmente aprovechado, esto sin tener en cuenta la cantidad de residuos que están llegando a otras empresas que se encargan de la recolección de este tipo de residuos. Es importante tener en cuenta que, para la reutilización o reciclaje del material, es necesario realizar un debido tratamiento a cada uno de los materiales por separado, por lo que hay que manejar una fase de separación.(Erbs et al., 2018).

#### **4.6.Planteamiento e identificación de alternativas**

- A. Uso del yeso reciclado a partir del Drywall para la producción de placas de yeso nuevamente.
- B. Uso del yeso reciclado a partir del Drywall como agregado del cemento, para retardar el tiempo de fraguado.

- C. Uso del yeso reciclado a partir del Drywall para la generación de bloques, junto con agregados reciclados como: cerámica, la porcelana, la celulosa, fibras de vidrio y minerales.
- D. Uso del yeso reciclado a partir del Drywall para realizar estuco.

#### **4.7. Evaluación de alternativas para el manejo del Drywall.**

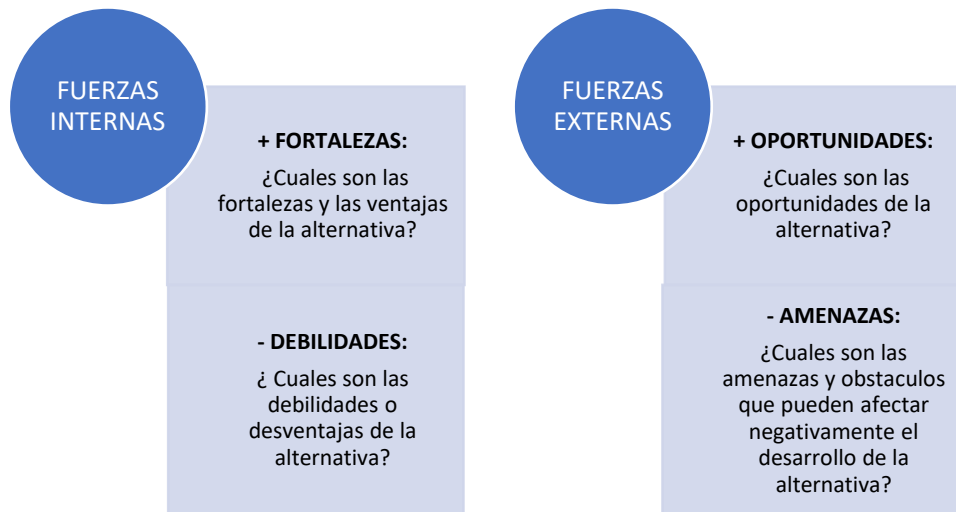
Para la actividad de evaluación de alternativas se tiene como objetivo principal poder tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada una de estas, haciendo uso de la herramienta matricial DOFA. El significado de DOFA es Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas. La matriz, sirve para diagnóstico, análisis, evaluación de estrategias y alternativas.

Esta evaluación tiene como fin proporcionar una o varias soluciones factibles no solo para mejorar el proceso de reciclaje del Drywall como RCD, sino que también poder reintroducirlo en el mercado, aumentando su vida útil y disminuyendo los impactos negativos al medio ambiente, previamente identificados en el ACV en la fase de disposición final. Para la evaluación de las alternativas solo se tuvieron en cuenta las que tenían en cuenta la reutilización del Drywall específicamente para el sector de la construcción que es donde se involucran las áreas de arquitectura y de ingeniería específicamente.

Siguiendo con lo anterior, para el desarrollo de la matriz es necesario entender el tipo de relaciones que hay entre cada uno de los aspectos a evaluar. Las fuerzas externas están relacionadas con las tendencias sociales, culturales, políticas, tecnológicas, entre otras. (Escobar Montoya, 2016). Mientras que las internas está relacionado con la investigación,

desarrollo, instituciones, producción, economía, etc. (Escobar Montoya, 2016). Estas fuerzas agrupan los aspectos a evaluar de la siguiente manera:

Figura 18 Organización matriz DOFA.



Fuente: (Universidad Nacional, 2015).

Relacionando los aspectos de la matriz DOFA y el desarrollo del presente proyecto, hay que tener en cuenta que las fortalezas son las que hay dentro del proyecto al igual que las debilidades. Por otro lado, para las fuerzas externas las oportunidades es todo aquello que está afectado positivamente por el desarrollo de la alternativa al igual que las amenazas que habría al implementarla.

De acuerdo con la guía de elaboración el análisis se hace durante dos etapas, la primera es un listado para cada uno de los componentes de la matriz, con el fin de priorizar cada aspecto y para el segundo se hace un análisis de estrategias FO, DO, DA, FA. (Universidad Nacional, 2015).

**FO:** Potenciar las fortalezas utilizando las oportunidades.

**FA:** Prevenir el impacto de las amenazas usando las fortalezas.

**DO:** mejorar las debilidades utilizando las oportunidades identificadas.

**DA:** minimizar las debilidades para evitar las amenazas.

Finalmente se tendrán en cuenta los resultados obtenidos del enfrentamiento por pares de las estrategias FO, FA, DO, DA, para cada una de las alternativas propuestas. Esto con el fin de identificar cualitativamente la efectividad de aplicar dichas soluciones al manejo del Drywall como RCD en Colombia.

A continuación, la matriz DOFA está resuelta con cada una de las preguntas de la Figura 18, por lo que se realizó una lista para cada uno de los elementos de la matriz, donde se tomó como referencia la guía metodológica de la Universidad Nacional de Colombia (Universidad Nacional, 2015).

## ALTERNATIVA A

Uso del yeso reciclado a partir del Drywall para la producción de placas de yeso nuevamente.

Tabla 8 Listado de aspectos alternativa A

ASPECTOS INTERNOS		ASPECTOS INTERNOS	
FORTALEZAS		OPORTUNIDADES	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disminución del uso de materias primas obtenidas por explotación de los recursos naturales.</li> <li>✓ Menos generación de residuos y por ende menor uso de espacio para rellenos sanitarios de RCD.</li> <li>✓ Disminución de los impactos negativos a la salud, a la calidad del aire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Actualmente se están desarrollando estrategias para la implementación de la EC en el país.</li> <li>✓ Sería una buena opción de negocio, ubicar una planta de tratamiento y producción de Drywall cerca de la ciudad de Bogotá.</li> <li>✓ Formulación de estrategias para incluir a la población recicladora en la recolección de los residuos de Drywall.</li> </ul>		
DEBILIDADES		AMENAZAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No hay empresas en Bogotá que se encarguen de producir nuevamente las placas de Drywall.</li> <li>✓ El transporte de yeso como RCD hasta la planta de producción en Cartagena o Barranquilla no compensa el proceso de aprovechamiento del Drywall.</li> <li>✓ Mientras no se recicle el papel o celulosa generado de las placas, no disminuirían los impactos negativos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No hay entes regulatorios que hagan monitoreo y seguimiento al cumplimiento de la normativa que hay sobre RCD.</li> <li>✓ Hace falta un marco regulatorio que se encargue de fortalecer el uso de materias primas recicladas.</li> <li>✓ Hay mayor oferta y demanda por el Drywall hecho con yeso natural tanto de empresas a nivel nacional a nivel internacional.</li> </ul>		

Tabla 9 Análisis de estrategias alternativa A.

ESTRATEGIA DA		ESTRATEGIA DO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No hay empresas en Bogotá que se encarguen de producir nuevamente las placas de Drywall.</li> <li>✓ Hay mayor oferta y demanda por el Drywall hecho con yeso natural tanto de empresas a nivel nacional como importación de otros países</li> <li>✓ Buscar interesados, para apoyo financiero, operativo y mercadeo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El transporte de yeso como RCD hasta la planta de producción en Cartagena o Barranquilla no compensa el proceso de aprovechamiento del yeso del Drywall.</li> <li>✓ Sería una buena opción de negocio, ubicar una planta de tratamiento y producción de Drywall cerca de la ciudad de Bogotá.</li> <li>✓ Crear una estrategia ecoeficiente para implementar la producción del material dentro de las empresas recicladoras de Drywall que hay actualmente.</li> </ul>		
ESTRATEGIA FA		ESTRATEGIA FO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disminución de los impactos negativos a la salud, a la calidad del aire.</li> <li>✓ No hay entes regulatorios que hagan monitoreo y seguimiento al cumplimiento de la normativa que hay sobre RCD.</li> <li>✓ Proponer políticas para incentivar el uso de material reciclado debido a los impactos positivos ambiental, social y económicamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disminución del uso de materias primas obtenidas por explotación de los recursos naturales.</li> <li>✓ Actualmente se están desarrollando estrategias para la implementación de la EC en el país.</li> <li>✓ Crear propuesta que beneficie a los interesados y que apoyen proyectos que estén relacionados con la EC.</li> </ul>		



## ALTERNATIVA B

Uso del yeso reciclado a partir del Drywall como agregado del cemento, para retardar el tiempo de fraguado.

Tabla 10 Listado de aspectos alternativa B

ASPECTOS INTERNOS		ASPECTOS INTERNOS	
FORTALEZAS		OPORTUNIDADES	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Las propiedades de fraguado del yeso reciclado son similares al yeso natural.</li> <li>✓ Un 40% de los RCD este compuesto por productos finos entre estos arena y yeso.</li> <li>✓ Se gasta un 65% menos de energía usando yeso reciclado, que la que es requerida para producir el yeso natural.</li> <li>✓ 65% menos emisiones generadas al GEI (Gases de efecto Invernadero).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Facilidad de introducir el yeso reciclado como agregado del cemento, debido a que es un material que cuenta con alta demanda y las propiedades del material son óptimas.</li> <li>✓ Aumentar la oferta de trabajo, creando una empresa de aprovechamiento del Drywall, para la venta del yeso reciclado con las especificaciones requeridas según la norma.</li> <li>✓ Se podrían desarrollar soluciones con ayuda de un software para mejorar la gestión de los RCD.</li> </ul>		
DEBILIDADES		AMENAZAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El polvo fino disminuye el tiempo de fraguado por lo que es necesario el uso de agentes retardantes.</li> <li>✓ En el ACV realizado en Italia se encontró que la producción de cemento reciclado en la categoría de calentamiento global tiene un impacto ambiental 7 veces mayor que el impacto que se genera produciendo fertilizante con yeso reciclado.</li> <li>✓ La calidad del material reciclado va a variar dependiendo de las veces que se haya recirculado o de la forma en cómo se haya hecho la disposición final del Drywall.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Como es necesario realizar un pretratamiento del Drywall para la obtención del sulfato del calcio dihidratado (yeso), puede ser contraproducente al momento de buscar interesados.</li> <li>✓ Hay mayor oferta y demanda con el yeso natural y con el cemento portland tradicional.</li> <li>✓ Falta de investigaciones y estudio del mercado.</li> <li>✓ Es importante encontrar financiamiento, un sitio con localización estratégica y abrir el mercado.</li> </ul>		

Tabla 11 Análisis de estrategia alternativa B.

ESTRATEGIA DA		ESTRATEGIA DO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La calidad del material reciclado va a variar dependiendo de las veces que se haya recirculado o de las propiedades físicas en las que se encuentre el Drywall al finalizar su ciclo de vida.</li> <li>✓ Es necesario realizar un pretratamiento del Drywall para la obtención del sulfato del calcio dihidratado (yeso), pero puede ser contraproducente al momento de buscar interesados.</li> <li>✓ Crear un sistema de recolección especial para el Drywall y capacitar a interesados para que realicen separación en la fuente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El polvo fino disminuye el tiempo de fraguado por lo que es necesario el uso de agentes retardantes.</li> <li>✓ Facilidad de introducir el yeso reciclado como agregado del cemento, debido a que es un material que cuenta con alta demanda y las propiedades del material son óptimas.</li> <li>✓ Promover el conocimiento sobre los beneficios del uso de materiales a base de productos reciclados.</li> </ul>		
ESTRATEGIA FA		ESTRATEGIA FO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Las propiedades de fraguado del yeso reciclado son similares al yeso natural.</li> <li>✓ Hay mayor oferta y demanda con el yeso natural y con el cemento portland tradicional.</li> <li>✓ Crear incentivos económicos para las empresas que utilicen productos con materiales reciclados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Un 40% de los RCD está compuesto por productos finos entre estos arena y yeso.</li> <li>✓ Facilidad de introducir el yeso reciclado como agregado del cemento, debido a que es un material que cuenta con alta demanda y las propiedades del material son óptimas.</li> <li>✓ Invertir en publicidad ya que los costos de producción serían bajos.</li> </ul>		

## ALTERNATIVA C

Uso del yeso reciclado a partir del Drywall para la generación de bloques, junto con agregados reciclados como: cerámica, la porcelana, la celulosa, fibras de vidrio y minerales.

Tabla 12 Listado de aspectos alternativa C

ASPECTOS INTERNOS		ASPECTOS INTERNOS	
FORTALEZAS		OPORTUNIDADES	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aprovechamiento de diferentes tipos de RCD incluyendo el Drywall.</li> <li>✓ Reducción de impactos negativos desde emisiones al aire, transporte del material y disposición en sitios ilegales.</li> <li>✓ Mejora las propiedades mecánicas y el tiempo de fraguado el uso de yeso reciclado y agregados.</li> <li>✓ En el caso de todos los materiales como agregados mejoran la capacidad de retener agua, además el material es más resistente.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Opción de crear una empresa tanto de reciclaje de diferentes materiales incluido el Drywall, como de producción de nuevos materiales usando como base los reciclados.</li> <li>✓ Disminución de costos en cuando la obtención de materias primas y al transporte debido a ya que los materiales son obtenidos a partir de los RCD.</li> </ul>	
DEBILIDADES		AMENAZAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Gasto energético y generación de vertimientos líquidos al pasar por el proceso del hidropulper donde se transforma el papel en fibras de celulosa.</li> <li>✓ Los materiales deben ser separados en la fuente para evitar que se contaminen y pierdan las propiedades requeridas.</li> <li>✓ Es posible que si el yeso reciclado entra en contacto con el agua puede reaccionar con sustancias del cemento y fracturarse</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Difícil forma de incentivar la comercialización y el uso de nuevos materiales a base de productos reciclados.</li> <li>✓ Se requieren maquinaria tanto para el aprovechamiento de los materiales reciclados, como para la producción del nuevo material o producto.</li> </ul>	

Tabla 13 Análisis de estrategia alternativa C.

ESTRATEGIA DA		ESTRATEGIA DO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Gasto energético y generación de vertimientos líquidos al pasar por el proceso del hidropulper donde se transforma el papel en fibras de celulosa.</li> <li>✓ Se requieren maquinaria tanto para el aprovechamiento de los materiales reciclados, como para la producción del nuevo material o producto.</li> <li>✓ Recirculación del agua dentro del mismo proceso productivo.</li> <li>✓ El material no puede entrar en contacto con la humedad ya que es muy posible que se fracture.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Los materiales deben ser separados en la fuente para evitar que se contaminen y pierdan las propiedades requeridas.</li> <li>✓ Disminución de costos en cuando la obtención de materias primas y al transporte debido a ya que los materiales son obtenidos a partir de los RCD.</li> <li>✓ Invertir en personal que se encargue de revisar que la separación del material este correctamente al momento de recogerlo.</li> </ul>	
ESTRATEGIA FA		ESTRATEGIA FO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mejora las propiedades mecánicas y el tiempo de fraguado el uso del yeso reciclado y agregados.</li> <li>✓ Difícil forma de incentivar la comercialización y el uso de nuevos materiales a base de productos reciclados.</li> <li>✓ Promocionar las ventajas del uso de este tipo de materiales y porque es mejor que los materiales comerciales.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aprovechamiento de diferentes tipos de RCD incluyendo el Drywall.</li> <li>✓ Opción de crear una empresa tanto de reciclaje de diferentes materiales incluido el Drywall, como de producción de nuevos materiales usando como base los reciclados.</li> <li>✓ Realizar alianzas con empresas de reciclaje que cuenten con maquinaria para el procesamiento del material.</li> </ul>	

## ALTERNATIVA D

Uso del yeso reciclado a partir del Drywall para realizar estuco.

Tabla 14 Listado de aspectos alternativa D

ASPECTOS INTERNOS		ASPECTOS INTERNOS	
FORTALEZAS		OPORTUNIDADES	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aprovechamiento potencial del Drywall en el proceso constructivo.</li> <li>✓ Evita transportar el material a otro punto para poder ser reutilizado.</li> <li>✓ Es un material resistente a la humedad y de fácil mantenimiento.</li> <li>✓ Disminuiría los impactos negativos en la producción del estuco.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reducir la cantidad de residuos de yeso o mezclados que están siendo destinados a rellenos sanitarios.</li> <li>✓ Se aprovecharía mejor el material, además de reducir sobrecostos para la obtención de estuco y se reduciría la cantidad de Drywall sobrante.</li> <li>✓ Disminuirían los impactos negativos que hay sobre la sobreexplotación de los recursos naturales.</li> </ul>	
DEBILIDADES		AMENAZAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Es necesario que para la producción del estuco lo realice un experto ya que debe cumplir con normas de calidad.</li> <li>✓ El estuco preparado tiende a tener propiedades muy diferentes a las del estuco tradicional.</li> <li>✓ Dentro de la alternativa no se contemplan opciones de aprovechamiento de la celulosa</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Si no se realizan las pruebas al material previamente puede que no tenga la calidad requerida y se agriete o dañe el material antes de lo esperado.</li> <li>✓ Por cuestión de tiempo las constructoras no accederían al uso del Drywall residual como alternativa para la producción de estuco.</li> <li>✓ Los residuos de papel pueden no llegar a ser aprovechados por lo que el impacto negativo que este genera durante la producción no se estaría reduciendo.</li> </ul>	

Tabla 15 Análisis de estrategia alternativa D.

ESTRATEGIA DA		ESTRATEGIA DO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tener claras las normas de calidad y estandarización del estuco.</li> <li>✓ Tener claro el procedimiento de verificación de las pruebas de calidad del material para evitar perder tiempo.</li> <li>✓ Involucrar empresas gestoras de RCD que se encarguen del aprovechamiento de la celulosa a partir del Drywall.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Contar con personal calificado que se encargue específicamente de las pruebas al material de aprovechamiento dentro de la obra.</li> <li>✓ Las propiedades físicas del yeso a partir del Drywall tienden ser similares o iguales a las del yeso natural.</li> <li>✓ Considerar el aprovechamiento del yeso y del papel para así reducir los impactos negativos para ambos materiales.</li> </ul>	
ESTRATEGIA FA		ESTRATEGIA FO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disponer de un espacio para poder realizar procesos de aprovechamiento del yeso como estuco.</li> <li>✓ Demostrar las ventajas económicas y ambientales frente al uso del yeso a partir del Drywall.</li> <li>✓ El aprovechamiento del papel también se podría considerar dentro de la obra, evitando sobre costos en procesos de aprovechamiento por parte de gestores y su transporte.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disminuirían los costos de transporte y disposición final del material, además de trámites administrativos.</li> <li>✓ El proceso de aprovechamiento no requiere de una gran infraestructura o maquinaria especializada.</li> <li>✓ Es viable realizar el aprovechamiento del material en cualquier parte del país, siempre y cuando se realice la reutilización con conocimiento de las normas para tener mayor durabilidad del material.</li> </ul>	

#### 4.8. Selección de alternativas para el manejo del Drywall

A continuación, se presentan las estrategias propuestas para cada una de las alternativas con el fin de poderlas comparar y ver beneficios y desventajas de estas.

Tabla 16 Resumen análisis de estrategias de las alternativas.

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS				
ALTERNATIVAS	DA	DO	FA	DO
<b>A</b>	Buscar interesados, para apoyo financiero, operativo y mercadeo.	Crear una estrategia ecoeficiente para implementar la producción del material dentro de las empresas recicladoras de Drywall que hay actualmente.	Proponer políticas para incentivar el uso de material reciclado debido a los impactos positivos ambiental, social y económicamente.	Crear propuesta que beneficie a los interesados y que apoyen proyectos que estén relacionados con la EC.
<b>B</b>	Crear un sistema de recolección especial para el Drywall y capacitar a interesados para que realicen separación en la fuente.	Promover el conocimiento sobre los beneficios del uso de materiales a base de productos reciclados.	Crear incentivos económicos para las empresas que utilicen productos con materiales reciclados.	Invertir en publicidad ya que los costos de producción serian bajos.
<b>C</b>	Evitar que el material entre en contacto con la humedad ya que es muy posible que se fracture por la reacción entre sustancias del yeso y del cemento.	Invertir en personal que se encargue de revisar que la separación del material este correctamente al momento de recogerlo.	Promocionar las ventajas del uso de este tipo de materiales y porque es mejor que los materiales comerciales.	Realizar alianzas con empresas de reciclaje que cuenten con maquinaria para el procesamiento del material.
<b>D</b>	Involucrar empresas gestoras de RCD que se encarguen del aprovechamiento de la celulosa a partir del Drywall.	Contar con personal calificado que se encargue específicamente de las pruebas al material de aprovechamiento dentro de la obra.	Demostrar las ventajas económicas y ambientales frente al uso del yeso a partir del Drywall.	Es viable realizar el aprovechamiento del material en cualquier parte del país, siempre y cuando se realice la reutilización con conocimiento de las normas para tener mayor durabilidad del material.

#### **4.8.1. Análisis de las alternativas evaluadas con la matriz DOFA.**

De acuerdo con la Tabla 16 se realizó el siguiente análisis:

##### ***Alternativa A:***

Las estrategias se enfocaron principalmente en la búsqueda de interesados que estén dispuestos a apoyar el proyecto de reutilización del yeso a partir del Drywall como materia prima para la producción de Drywall nuevamente. Es importante tener en cuenta que se requiere de una gran inversión financiera no solo para la producción del material, sino que también es necesario tener ubicado estratégicamente la planta de aprovechamiento para que se generen beneficios en cuanto a menos gasto en transporte del material, fácil accesibilidad, que sea eficiente.

Por otro lado, también se consideró conseguir apoyo por parte de las empresas recicladoras de Drywall existentes para el planteamiento de este modelo de negocio, junto con el planteamiento de políticas que incentiven el uso de materiales reciclados. Esta alternativa tiene mucha dependencia por parte de terceros y puede encontrarse en serias dificultades en caso de no encontrar interesados que apoyen la propuesta.

Para terminar, como se quiere es crear un sistema a escala industrial, es necesario crear un modelo económico en el que se presente una propuesta clara para el desarrollo de la empresa con el fin de demostrar no solo cualitativamente, sino que también de forma cuantitativa los costos e inversiones que se tendría que hacer y la rentabilidad del negocio para poderlo introducir en el mercado del Drywall.

***Alternativa B:***

De acuerdo con esta propuesta, que es la que está relacionada con la producción de cemento portland, es la que requiere menos infraestructura debido a que no requiere maquinaria para la generación de un producto elaborado, sino que requiere de maquinaria solo para la trituración, tamizado y deshidratación del material.

En cuanto al aspecto económico requiere de menor inversión, además lo que se propuso dentro de las estrategias fueron formas de recolección del material, crear incentivos económicos para que los interesados principales, que son las empresas productoras de cemento en Colombia, utilicen el material para la producción del cemento portland.

De acuerdo con lo anterior, esta alternativa tanto operativa como económicamente viable debido a que no depende tanto de actores secundarios y lo que busca es promover y dar a conocer los beneficios del uso de estos materiales dentro de la industria no solo porque brinda beneficios económicos sino porque también hay beneficios a nivel ambiental y social.

***Alternativa C:***

Para el desarrollo de esta alternativa es necesario tener apoyo por parte de terceros o stakeholders que estén de acuerdo con el proyecto e inviertan. Pero no tanto como si lo tiene que haber para la alternativa A (uso como realización de Drywall). Para la producción de este tipo de bloque se requieren las mismas condiciones que tiene la alternativa B (Uso como agente retardante en el cemento portland).

Quienes deberían estar relacionado con esta alternativa en primera instancia, es con los dueños de empresas de reciclaje de RCD en la ciudad de Bogotá, ya que estos cuentan

con rutas de recolección propias, sistemas de separación de residuos y maquinaria para el tratamiento de algunos materiales.

***Alternativa D:***

Respecto a la alternativa de aprovechamiento del Drywall para ser reciclado como estuco, ya ha sido evaluada dentro de un estudio hecho en la ciudad de Bogotá y se encontró que era viable tanto operativa como económicamente.

Además, las desventajas que hay dentro de esta alternativa es que no existe una normativa que tenga como requisito la obligación por parte de las constructoras de la reutilización de los RCD, por lo que muchos usuarios no están dispuestos a utilizar el material como estuco, ya que es más sencillo conseguir el estuco comercial, además de que existe la falsa creencia de que el material reciclado no es de buena calidad (Sierra, 2017).

tampoco se está considerando el aprovechamiento de la celulosa que se puede extraer de las placas, por lo que de acuerdo con algunas investigaciones no se estarían reduciendo los impactos negativos generados a través de todo el ciclo de vida del Drywall. Finalmente, es necesario que el estuco cumpla con las normas de calidad, para así evitar tener que realizar mantenimiento del material muy seguido.

## Capítulo 5: Análisis y discusión de resultados

### 5.1. Análisis del Ciclo de Vida del Drywall

De acuerdo con la fase de análisis de impactos durante el ciclo de vida del Drywall se encontró que las 15 categorías de evaluación de impacto de medio punto, que habían dentro de la metodología solo 5 fueron representativas para la investigación en la fase de disposición final. Por otro lado, se esperaba que los impactos por parte del reciclaje del material no fueran tan altos, sin embargo en la mayoría de las categorías todos los porcentajes estuvieron en un promedio de 20 a 21% de aporte al igual que los procesos de uso en la construcción y mercadeo. Solo en una categoría que fue la de radiación ionizante hubo un impacto positivo, ya que estaba evitando la emisión de radón a pesar de que esta sustancia en bajas concentraciones no es nociva de acuerdo con la OMS.

Respecto a lo obtenido en cada uno de los procesos de la producción del Drywall que fueron analizados por medio del Análisis de Ciclo de Vida- ACV, el proceso que obtuvo un menor impacto fue la producción del material y la que mayor impacto obtuvo fue la disposición final, siendo este último nocivo para la salud humana y para la calidad del ecosistema por tres principales componentes como lo fueron el arsénico en el recurso hídrico, el material particulado menor a  $2,5\mu\text{m}$  y las emisiones de dióxido de azufre. Los valores respecto al reciclaje en las dos categorías de daño anteriormente nombradas se redujeron en un 11,05% y 1,97% respectivamente.

De acuerdo con los aportes de sustancias contaminantes para cada uno de los transportes desde la extracción del material hasta la disposición final y/o reciclaje y los procesos de obtención y transformación de las materias primas e insumos durante el proceso



productivo del Drywall, el que tuvo un mayor impacto negativo respecto a la categoría de daño de salud humana fue la producción del papel usado para formar la parte externa del Drywall con un aporte de 50,77%, seguido del aporte por el transporte en transoceánico con un 13,35%, para traer el yeso crudo o estuco como materia prima principal del Drywall. Por otro lado, el proceso que tuvo un menor aporte fue el transporte en España en un vehículo de 35 toneladas EURO 5, ya que este tipo de combustible genera menos aportes a los GEI.

De acuerdo con el modelo de fin de ciclo de vida, que es la red analizada dentro de la metodología de ACV (Figura 10), muestra los impactos al medio ambiente por los aportes del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) incluyendo los transportes requeridos y el uso de energía.

El proceso con mayor impacto fue la producción del papel con un aporte del 35,1%, respecto del transporte en transoceánico con un aporte del 10,1%, del estuco con 9,73%, 6,99% de aporte por parte de la energía eléctrica de bajo voltaje y finalmente el proceso que menos aporta a los gases de efecto invernadero es el transporte vehicular en España, el cual tuvo un aporte del 0,884%. En total el aporte por parte del proceso productivo fue del 73,2%, incluyendo el transporte del material en Colombia, el cual tuvo total del aporte de solo 22,8%.

En cuanto al aporte por categorías la que obtuvo mayor puntaje fue la disposición final con un aporte del 94%, seguido por el uso en construcción y en mercadeo con un 85% y finalmente el de producción del Drywall con 73,2%. Por otro lado, el proceso que obtuvo el menor aporte de CO<sub>2</sub> a la atmosfera fue el reciclaje con un 5,99%.

Por otro lado, respecto a las alternativas de aprovechamiento que han sido desarrolladas en otros países, no todas han sido aplicadas a casos donde hayan sido exitosos,

o aún no existe algún registro de ello; sin embargo, aún son opciones válidas para aplicaciones dentro del aprovechamiento de los materiales ya que en un muy pocos lugares se han aplicado estrategias para el manejo de este tipo de residuos.

## **5.2. Análisis de las alternativas de referencia que utilizaron ACV**

Tal y como se dijo anteriormente existen cuatro estudios en los cuales también se hizo uso de la metodología de Análisis de ciclo de vida. Uno de estos fue realizado en Italia y se basaron en la evaluación de estrategias para manejar los residuos de Drywall como material de post consumo, los otros tres fueron realizados en España donde en uno de ellos se evaluó la posibilidad de usar fibras para reemplazar el yeso y los otros dos evaluaron el uso del yeso reciclado como agregado para reemplazar el yeso natural en el cemento portland.

### **Caso Italia**

Para la investigación realizada en Italia en la región de Lombardía utilizaron la metodología de ILCD 2011 method (Pantini et al., 2019) donde existen 17 categorías de medio punto. Esta metodología no esta dentro de las cuatro que se analizan dentro de la metodología de IMPACT 2002+, pero algunas categorías son similares por lo que sirve para entender cuales de las alternativas propuestas dentro de esta investigación tiene impactos positivos y cuales tienen impactos negativos.

A diferencia de Colombia, en Italia cuentan con los flujos de entradas y salidas de los residuos de yeso por lo cual facilita bastante el desarrollo de la investigación. Dentro de las alternativas propuestas se encuentran: fabricación de placas de yeso, industria del cemento, desinfección de lodos de aguas residuales y agricultura. De acuerdo con los resultados

obtenidos, encontraron que para la primera alternativa solo hay un impacto positivo en evitar el gasto de los recursos naturales, pero el resto de los impactos son negativos, para el caso de las otras tres alternativas la mayoría de los impactos son positivos excepto para las categorías de toxicidad humana por cáncer y gasto del recurso hídrico, para este último la alternativa del uso del yeso en la agricultura es un impacto positivo.

Al final de la investigación se analizaron los resultados de las categorías de medio punto dentro de las cuatro categorías de daño como lo son calentamiento global, daño a la capa de ozono, indicador energético y consumo de los recursos naturales, obteniendo como resultado que la alternativa con mayor impacto positivo para la categoría de impacto global fue la del uso del yeso en la agricultura, para la segunda categoría de daño todas las alternativas tuvieron impacto positivo excepto la del uso del material para realizar Drywall nuevamente, para la tercera categoría sucedió lo mismo de la categoría anterior solo que el uso del yeso en la agricultura tuvo mayor impacto positivo y finalmente para la última categoría las tres primeras alternativas tuvieron como respuesta impactos positivos muy buenos.

### **Casos en España**

#### ***Uso de fibras alternativas.***

Para esta investigación se utilizó la metodología de evaluación IPC. GWP 100a, la cual tiene once categorías de medio punto. Esta tampoco se encuentra incluida dentro de la metodología utilizada en esta investigación; sin embargo, consideraron el uso de fibras como reemplazo del uso de yeso natural como: fibra de lino, yute, cáñamo, coco, algodón triturado y resina epoxica.

Por otro lado, esta investigación solo se centra en la fase de producción del material, el cual según la investigación desarrollada dentro de este proyecto tiene un aporte de 73,2% respecto de las otras fases dentro del ciclo de vida del Drywall. Dentro de los resultados de esta investigación se encontró que el uso de estas fibras puede ser más amigable con el medio ambiente no solo en cuanto a su uso sino también al momento de la disposición final ya que se pueden llevar a cabo procesos de incineración y posteriormente utilizar los residuos o subproductos como combustibles.

Dentro del análisis realizado en esta investigación se encontró que el uso de las fibras que tienen menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera respecto del uso del Drywall (28.96%) de menor a mayor cantidad son: la fibra de lino (11.83%), la fibra de cañamo (12.75%), la fibra de jute (13.14%), la fibra de algodón triturado (15.27%) y por último la fibra de coco con un aporte de 24.85%. Finalmente, la fibra que representa el único impacto positivo sobre el ecosistema es la fibra de yute y la que tiene un mínimo de impactos negativos sobre las categorías de ecosistema, salud humana y recursos es la fibra de coco.

#### ***Uso de agregados mezclados reciclados y yeso reciclado en concreto.***

Para esta alternativa existen dos investigaciones en donde se utilizaron las metodologías de IMPACT 2002+. Para la investigación en la que evaluaron el reemplazo del yeso natural por yeso reciclado en el cemento portland para la realización de hormigón. Dentro de los resultados se obtuvo que al usar yeso reciclado se redujeron los impactos generados en las categorías de efectos orgánicos e inorgánicos respiratorios, eutrofización, ocupación del suelo, acidificación, calentamiento global, energía no renovable y extracción mineral (Suárez et al., 2018).

Respecto a los resultados obtenidos, se utilizaron diferentes porcentajes de yeso reciclado y de agregados de cemento reciclados. Para el caso del manejo de un porcentaje de 20% de concreto estructural con agregados de concreto reciclado y 100% de yeso reciclado tuvo el costo de producción mas bajo para hormigón estructural junto con el de concreto no estructural con 100% de concreto no estructural con agregados de concreto reciclado con 100% de yeso reciclado, comprobando que el uso de materiales reciclados disminuye los costos (Suárez et al., 2018).

Además, se utilizaron diferentes porcentajes de concreto no estructural; sin embargo, el que mejor resultado obtuvo en cuanto a los aspectos ambientales y económicos fue el de 75% con agregados mezclados reciclados y 100% de yeso reciclado (Suárez et al., 2018), adicionalmente este estudio requiere de mayor investigación en cuanto a los porcentajes.

#### ***Uso del yeso reciclado como agregado del cemento.***

De acuerdo con la investigación realizada en el caso de Cataluña, se encontró que el yeso reciclado consume 65% menos de energía requerida por el yeso natural y el mismo porcentaje se reduce en las emisiones de GEI, aun cuando la planta de aprovechamiento se encuentre a 50 Km de distancia; sin embargo, los impactos negativos se reducen muchos más cuando las plantas se encuentran a una menor distancia (Suárez et al., 2016).

Por otro lado, de acuerdo con esta investigación la evaluación de impactos se encontró que el uso del yeso reciclado tuvo beneficios ambientales como el ahorro del 35% en la categoría de los efectos cancerígenos, agotamiento de la capa de ozono y ocupación de la tierra (Suárez et al., 2016), pero los valores no fueron muy significativos en cuanto a la

disminución de los impactos generados al momento de utilizar el yeso reciclado respecto del yeso natural como retardante de fraguado, por lo que recomiendan hacer más evaluaciones del material.

### **5.3. Análisis de las alternativas propuestas**

#### **Alternativa A**

Para el caso de la alternativa A, es necesario contar con dependencia económica e igualmente tener interesados o stakeholders que puedan llevar el negocio a buen término. Es necesario desarrollar un modelo económico basado en la Economía Circular, con el fin de conocer que cantidad de material es necesario recolectar para llevarlo nuevamente a proceso productivo, cuál sería la eficiencia, beneficios económicos, entre otros.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que el desarrollo de políticas que fomenten el uso de materiales reciclados ayudaría en el desarrollo de los proyectos que buscan el aprovechamiento de residuos no solo RCD, sino que también residuos domésticos o de otro tipo de industrias.

#### **Alternativa B**

Respecto a la propuesta evaluada de la alternativa B existe una alta probabilidad de poder ejecutarla debido a no requiere de infraestructura nueva ni de nuevas rutas de recolección, solo depende de los gestores que existen actualmente y que cuenten con plantas de reciclaje.

El proceso de aprovechamiento no solo se estaría disminuyendo el impacto negativo que hay cuando se realiza la disposición final del Drywall, sino que también se estarían

generando trabajo, inclusión de la población recicladora y además traería beneficios económicos.

### **Alternativa C**

En cuanto a la alternativa C, de acuerdo con el análisis de estrategias también es viable y al igual que la alternativa B es necesario contar con los dueños de plantas recicladoras de RCD como principales interesados. Para el uso del material como estuco, es importante mezclarlo con los aditivos que mejoren sus propiedades; sin embargo, también hay estudios que demuestran que mezclarlo con yeso natural mejora las propiedades mecánicas del material.

Es importante tener en cuenta las metodologías propuestas en la Unión Europea y Países Bajos para el desarrollo de nuevas estrategias que sean eficientes al momento de diseñar los modelos de negocio, haciéndolos rentables y fortaleciendo la industria de la mano con el cuidado del medio ambiente y un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

### **Alternativa D**

A pesar de ser una alternativa viable ya que no requiere de un gran espacio, infraestructura o maquinaria costosa para su aprovechamiento, es necesario empezar a implementar soluciones para el aprovechamiento de los RCD en general que impulsen el uso de soluciones como por ejemplo esta alternativa, que no solo disminuyan el uso de materias primas obtenidas directamente de la explotación de los recursos naturales, sino que también disminuyan los costos directamente en obra y los impactos negativos generados al medio ambiente.

## Capítulo 6: Conclusiones

- ❖ De acuerdo con los impactos evaluados por medio de la metodología de ACV, se confirmó la necesidad de tener que realizar procesos de aprovechamiento del Drywall, ya que al final del ciclo de vida en el proceso de disposición final se encontró que de las quince categorías evaluadas cinco tienen porcentajes mayores al 25% que están generando impactos negativos tales como: los no carcinogénicos (26%), los respiratorios inorgánicos (29%), la ecotoxicidad acuática (26%), la acidificación y nutrientes terrestres (32%) y la acidificación acuática (56%).
- ❖ La producción del Drywall es la fase en la que se está generando aportes significativos a los GEI por emisiones de CO<sub>2</sub>, específicamente para la actividad de producción del papel con un aporte del 35,1%, es por esto por lo que se deben considerar alternativas de aprovechamiento del papel.
- ❖ El proceso que obtuvo un menor impacto fue la producción del material y la que obtuvo mayor impacto obtuvo fue la disposición final.
- ❖ La disposición final es nociva para la salud humana y para la calidad del ecosistema por tres principales componentes como: el arsénico contaminando el recurso hídrico, el material particulado menor a 2,5µm y las emisiones de dióxido de azufre.
- ❖ Para la fase del reciclaje hubo una reducción en las categorías de daño de salud humana en un 11,05% y calidad del ecosistema en un 1,97%.
- ❖ Respecto a lo obtenido en el modelo de ciclo de vida del Drywall, se obtuvo que el proceso de reciclaje reduce las emisiones de carbono respecto de la disposición final del material en un 88%.



- ❖ El proceso que tuvo un mayor aporte en la categoría de daño de salud humana fue la producción del papel con 50,77%, seguido del aporte por parte del transporte del yeso natural en transoceánico con un 13,35%.
- ❖ El proceso que tuvo un menor aporte a impactos negativos fue el transporte en España en un vehículo de 35 toneladas EURO 5, ya que este tipo de combustible genera menos emisiones de contaminantes a la atmosfera.
- ❖ Soportando los resultados del ACV de acuerdo con la investigación realizada en Italia, al reciclar el papel del Drywall todos los impactos evaluados con la metodología eran positivos menos el del gasto del recurso hídrico, por otro lado si no se recicla el papel, de las quince categorías de impacto ocho son negativas, dentro de las cuales se encuentran: daño a la capa de ozono, sustancias cancerígenas, formación de ozono fotoquímico, eutrofización terrestre, eutrofización marina, ecotoxicidad en agua pura, daño al recurso hídrico y sobreexplotación de recursos minerales y fósiles (Pantini et al., 2019).
- ❖ El proceso de reciclaje de igual forma impacta de forma negativa sobre el medio ambiente; sin embargo, los valores son menores respecto del proceso de disposición final e incluso se evita la emisión de radón en la categoría de radiación ionizante por lo que es el único impacto positivo evaluado.
- ❖ Los procesos de aprovechamiento pueden estar generando más impactos positivos dependiendo de los procesos a los cuales se esté destinando el yeso reciclado. De acuerdo con la investigación realizada en Italia la alternativa que tiene mas impactos negativos es

la del aprovechamiento para volver a producir Drywall ya que solo cuenta con un impacto positivo en el uso de combustibles minerales y fósiles.

- ❖ De acuerdo con el análisis hecho con la matriz DOFA, para la alternativa A sobre el uso del Drywall reciclado para volver a realizar placas, se requiere no solo de infraestructura para la realización de este proceso, sino que también de stakeholders para recibir apoyo financiero y operativo. Además, se requiere el desarrollo de tecnologías y políticas que impulsen el crecimiento de este tipo de empresas utilizando el modelo económico de la EC para que sea viable.
- ❖ El desarrollo de la Alternativa A es poco viable en caso de que se quiera desarrollar en Bogotá ya que requiere de plantas de fabricación de Drywall en la zona y actualmente la única planta existente en Colombia se encuentra en Cartagena y Barranquilla.
- ❖ Respecto de la segunda alternativa de aprovechamiento del Drywall para su uso como agregado del cemento, requiere de infraestructura, pero no tan sofisticada como si es necesaria para la alternativa A. De igual manera es necesaria la promoción del uso de materiales reciclados para evitar y/ o mitigar los impactos negativos generados por el uso de yeso natural.
- ❖ Para la alternativa C es necesario contar con infraestructura. Además, es un material y una alternativa que no ha sido muy estudiada por lo que puede que requiera de mas investigación para ser desarrollada.
- ❖ De acuerdo con la ultima alternativa expuesta, ya ha sido evaluada para el caso de Bogotá por parte del estudio que se tomo como referencia. A corto plazo es la alternativa que tiene mayor viabilidad debido a que no requiere de infraestructura ni maquinaria especializada.

- ❖ Respecto a los estudios que se tuvieron en cuenta como base principal para esta investigación el aprovechamiento del Drywall traería grandes beneficios debido a que tiene gran potencial para ser reintroducido a un proceso productivo a nivel industrial, siempre y cuando haya la información necesaria e interesados que aporten no solo a la parte económica sino al desarrollo de este tipo de industria.
- ❖ Las soluciones para el aprovechamiento del Drywall no solo se limitan a la producción de Drywall, Cemento, ladrillos y estuco, sino que también puede servir para la producción material estabilizante de suelos, como enmienda para los suelos y como material para tratamiento de lodos producto de tratamiento de aguas residuales, pero dentro de las investigaciones no se encuentran metodologías muy definidas por lo que es complicado verificar estos procesos por medio de pruebas de laboratorio como si las hay para las cuatro alternativas propuestas.
- ❖ Finalmente, para el desarrollo de cualquiera de las cuatro alternativas es importante que contar con políticas que soporten y aprueben el uso de materiales reciclados a partir de los RCD, de igual manera se requiere de personal capacitado y un buen modelo de negocio para poder introducir los productos a un mercado viable y sobre todo sostenible, tal y como se ha venido haciendo en los países que se tomaron como referencia.

## Capítulo 7: Recomendaciones

- ❖ Respecto a la información requerida para el desarrollo de la investigación, fue difícil encontrar bases de datos actualizadas sobre la caracterización de los RCD tanto dentro de la ciudad de Bogotá como para el resto del país, por otro lado, no existen datos exactos sobre la cantidad de residuos de yeso que se están generando actualmente en Colombia.
- ❖ La falta de esta información hace difícil la formulación de las soluciones sobre aprovechamiento de los materiales cuando se desconocen datos exactos sobre qué cantidad de material se está generando y sobre cual podría estarse trabajando.
- ❖ Es necesario impulsar proyectos y estudios sobre la caracterización de los RCD no solo en Bogotá sino en el resto del país para que en futuros proyectos se pueda trabajar sobre datos reales disponibles en bases de datos actualizadas.
- ❖ Es importante apoyar proyectos de ley, políticas y normatividad que estén teniendo en cuenta como base principal la Economía Circular, ya que, al contar con este tipo de soporte legal, las empresas productoras, constructoras y gestoras van tomando poco a poco conciencia sobre las necesidades ambientales y su aporte valioso para el mejoramiento del medio ambiente.
- ❖ Finalmente, es importante que todas las personas tengan conocimiento sobre los procesos de aprovechamiento que se pueden estar llevando a cabo con materiales que se están disponiendo en rellenos sanitarios y que tienen un gran potencial como material de posconsumo.

## Referencias Bibliográficas

- Agencia presidencial de cooperación internacional de Colombia- APC. (2015). *MANUAL DE GESTIÓN DE LOS RESIDUOS O DESECHOS PELIGROSOS*. COLOMBIA. Retrieved from [https://www.apccolombia.gov.co/sites/default/files/archivos\\_usuario/2016/a-ot-013manualgestionresiduosdesechos peligrososv3.pdf](https://www.apccolombia.gov.co/sites/default/files/archivos_usuario/2016/a-ot-013manualgestionresiduosdesechos peligrososv3.pdf)
- Ahmed, A., & Issa, U. H. (2014). Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment. *Soils and Foundations*, 54(3), 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.009>
- Ahmed, A., Soliman, A. M., El, M. H., & Kamei, T. (2015). An assessment of geo-environmental properties for utilization of recycled gypsum in earthwork projects. *Soils and Foundations*, 55(5), 1139–1147. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.014>
- Ahmed, A., & Ugai, K. (2011). Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum. *Cold Regions Science and Technology*, 66(2–3), 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.12.004>
- Ahmed, A., Ugai, K., & Kamei, T. (2011). Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>
- Alcalde Mayor. (2015). Decreto 586 de 2015. Retrieved February 3, 2019, from <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=64233>
- Alcaldía mayor de Bogotá. (1997). Decreto 357. Retrieved July 20, 2019, from <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1838>
- Araújo, M., Calil, C., Savastano, H., Tubino, R., & Carvalho, M. (2008). Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum Composites Reinforced with Recycled Cellulose Pulp, 11(4), 391–397.
- Begliardo, H., Sánchez, M., Panigatti, M. C., & Garrappa, S. (2013). Reuse of recovered construction gypsum plaster: a study based on aptitude requirements of argentine and Chilean standards, 27(123), 27–35. Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rconst/v12n3/art03.pdf>
- Castaño, J. O., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2013). *Waste management from construction and demolition (RCD) in Bogota: prospects and limitations*. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v17n38/v17n38a10.pdf>
- Cerdà, E., & Khalilova, A. (2016). Economía Circular, Estrategia Y Competitividad Empresarial. *Economía Industrial*, 401, 11–20.
- Chile Desarrollo Sustentable. (2017). Crean un nuevo cemento sustentable gracias al reciclaje de residuos industriales. Retrieved from <http://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/noticia-pais/crean-un-nuevo-cemento-sustentable-gracias-al-reciclaje-de-residuos-industriales/>
- Comisión Europea. (2018). *Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*. EUROPA. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN>
- Congreso de Colombia, E. (2001). *Ley 685 de 2001 - Código de Minas*. Retrieved from [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2001/ley\\_0685\\_2001.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2001/ley_0685_2001.pdf)
- Construdata. (2014). Contexto Construcción Liviana en Seco . Retrieved October 17, 2019, from [http://www.construdata.com/Bc/Otros/Newsletter/contexto\\_construccion\\_liviana.asp](http://www.construdata.com/Bc/Otros/Newsletter/contexto_construccion_liviana.asp)
- Cristina, H., Cordon, F., Carvalho, F., & Furlan, F. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo , Brazil. *Journal of Building Engineering*, 22(May 2018), 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.010>
- DESARROLLO, M. D. A. V. Y. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Pub. L. No. 4741 (2005). Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/526371/Decreto+4741+2005+PREVENCION+Y+MANEJO+DE+REIDUOS+PELI+GROSOS+GENERADOS+EN+GESTION+INTEGRAL.pdf/491df435-061e-4d27-b40f-c8b3afe25705>
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2016). Perfil de mercado del yeso. Retrieved from [https://www.gob.mx/uploads/attachment/file/184804/Perfil\\_Yeso\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/uploads/attachment/file/184804/Perfil_Yeso_2016.pdf)
- DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (2008). *DIRECTIVA 2008/98/CE, SOBRE LOS RESIDUOS*. EUROPA. Retrieved from [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c2b5929d-999e-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0019.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c2b5929d-999e-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF)
- Discovery. (2017). Como se fabrican las Placas de Yeso. España: Mundo Seco S.A. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=Jbu8vNUH\\_jQ&t=1s](https://www.youtube.com/watch?v=Jbu8vNUH_jQ&t=1s)
- DNP, MADS, MVCT, MEN, MME, CRA, ... UPME. (2016). *CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES 3874*. Retrieved from [https://www.catorce6.com/images/legal/Conpes\\_3874\\_de\\_2016.pdf](https://www.catorce6.com/images/legal/Conpes_3874_de_2016.pdf)
- Ecoingeniería. (2005). *EL YESO*. Retrieved from [http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS\\_YESOS\\_2005.pdf](http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf)
- El congreso de Colombia. (1993). *Ley 99*. Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/Normativo/1993-12-22-ley-99-crea-el-sina-y-mma.pdf>
- El tiempo. (2016). Alemana Knauf en Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16523214>
- Erbs, A., Nagalli, A., Querne de Carvalho, K., Myrmin, V., Passig, F. H., & Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314–1322. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.189>
- Escobar Montoya, S. C. (2016). MATRIZ DOFA. DIAGNOSTICO ANALISIS. Descripción de alternativas.
- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas Carbon Footprint. Part 1: Concepts, Estimation Methods and Methodological Complexities, 23(1), 163–176. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- Forero, D. (2016). *Residuos de Construcción y Demolicion (RCD) en Bogotá (2013-2014): Lineamiento de gestión urbana sustentable*. Universidad Piloto de Colombia. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>

- Fundación Ellen Macarthur. (2014). Hacia una economía circular. Retrieved from [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/EMF\\_Spanish\\_exec\\_pages-Revise.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/EMF_Spanish_exec_pages-Revise.pdf)
- Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M., Silva, J. S., Andrade, H. M. C., Dweck, J., Gonçalves, J. P., & Camarini, G. (2017a). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>
- Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M., Silva, J. S., Andrade, H. M. C., Dweck, J., Gonçalves, J. P., & Camarini, G. (2017b). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 288–300. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.188>
- Geraldo, R. H., Souza, J. D., Campos, S. C., Fernandes, L. F. R., & Camarini, G. (2018). Pressured recycled gypsum plaster and wastes : Characteristics of eco-friendly building components. *Construction and Building Materials*, *191*, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.193>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 618–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- Gobierno de Colombia. (2018). CONPES 3919 de 2018. *Consejo Nacional de Política Económica y Social*, 39. <https://doi.org/10.1109/ISSPA.1999.815782>
- Gómez Ángel, J. D., & Arciniegas Bermúdez, M. F. (2017). Análisis de la viabilidad técnico, ambiental y económica del reciclaje de placas de yeso “Drywall” producto de una obra de construcción (análisis de caso). Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/21011#WuDWotvuWEa.mendeley>
- Gyptec Iberica. (2017). *Manual técnico de instalación de sistema en placas de yeso*. Figueira da Foz. Retrieved from [https://gyptec.eu/es/documentos/Gyptec\\_ManualTecnico\\_2edicion.pdf](https://gyptec.eu/es/documentos/Gyptec_ManualTecnico_2edicion.pdf)
- Hooper, D. G., Shane, J., Straus, D. C., Kilburn, K. H., Bolton, V., Sutton, J. S., & Guilford, F. T. (2010). Isolation of sulfur reducing and oxidizing bacteria found in contaminated drywall. *International Journal of Molecular Sciences*, *11*(2), 647–655. <https://doi.org/10.3390/ijms11020647>
- Humbert, S., De Schryver, A., Margni, M., & Jolliet, O. (2012). IMPACT 2002+: User Guide Draft for version Q2.2 (version adapted by Quantis). *Quantis Sustainability Counts*. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Iacovidou, E., Millward-Hopkins, J., Busch, J., Purnell, P., Velis, C. A., Hahladakis, J. N., ... Brown, A. (2017). A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *Journal of Cleaner Production*, *168*, 1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.002>
- Icontec. NORMA TÉCNICA NTC-ISO COLOMBIANA 14040 GESTIÓN AMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA, Pub. L. No. ISO 14040, 26 de Septiembre 33 (2007). Retrieved from [http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000127-a0991a28c5/NTC-ISO14040-2007 Analisis\\_CicloVida.pdf](http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000127-a0991a28c5/NTC-ISO14040-2007 Analisis_CicloVida.pdf)
- Icontec. NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 1335, Pub. L. No. NTC 1335, 18 de Marzo 15 (2015). Retrieved from [https://members.wto.org/crnattachments/2016/TBT/COL/16\\_0285\\_00\\_s.pdf](https://members.wto.org/crnattachments/2016/TBT/COL/16_0285_00_s.pdf)
- Icontec. (2017a). *Norma Técnica Colombiana- NTC 6224 MASILLA PARA JUNTA Y CINTA PARA JUNTA PARA ACABADO DE PLACAS DE YESO E: JOINT COMPOUND AND JOINT TAPE FOR FINISHING GYPSUM BOARD CORRESPONDENCIA*. Retrieved from <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC6224.pdf>
- Icontec. (2017b). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 6159*. Retrieved from <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC6159.pdf>
- Icontec. NTC 6155:2017 (2017).
- IGME. Panorama Minero. (2017). *YESO Y ALABASTRO*. España. Retrieved from <https://sedeaplicaciones.minetur.gob.es/minerva/>
- ISO. (2015). Sistemas de gestión ambiental - Requisitos con orientación para su uso (ISO 14001:2015). *International Organization for Standardization*, *2015*, 1–48.
- ISO - INCONTEC. (2007). Norma Técnica Colombiana TTC-ISO 14040. *Icontec*, (571), 1–24. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- Jiménez-Rivero, A., & García-Navarro, J. (2016). Indicators to Measure the Management Performance of End-of-Life Gypsum: From Deconstruction to Production of Recycled Gypsum. *Waste and Biomass Valorization*, *7*(4). <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9561-x>
- Jiménez-Rivero, A., & García-Navarro, J. (2017a). Exploring factors influencing post-consumer gypsum recycling and landfilling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, *116*, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.014>
- Jiménez-Rivero, A., & García-Navarro, J. (2017b). Exploring factors influencing post-consumer gypsum recycling and landfilling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, *116*, 116–123. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.09.014>
- Jiménez-Rivero, A., & García-Navarro, J. (2018). Best practices for the management of end-of-life gypsum in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 1335–1344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.068>
- Kang, Y., Chang, S. J., & Kim, S. (2018a). Energy & Buildings Hygrothermal behavior evaluation of walls improving heat and moisture performance on gypsum boards by adding porous materials. *Energy & Buildings*, *165*, 431–439. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.052>
- Kang, Y., Chang, S. J., & Kim, S. (2018b). Hygrothermal behavior evaluation of walls improving heat and moisture performance on gypsum boards by adding porous materials. *Energy and Buildings*, *165*, 431–439. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.12.052>
- Kijjanapanich, P., Annachhatre, A. P., Esposito, G., Hullebusch, E. D. Van, & Lens, P. N. L. (2013). Biological sulfate removal from gypsum contaminated construction and demolition debris. *Journal of Environmental Management*, *131*, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.025>
- Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). *Ecological Economics*, *150*(April), 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>

- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(April), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Knauf Colombia. (2019). Knauf Colombia. Retrieved February 28, 2019, from <http://www.knauf.com.co/>
- Leising, E., Quist, J., & Bocken, N. (2018). Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. *Journal of Cleaner Production*, 176, 976–989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.010>
- Linde Group. (2012). *Hoja de seguridad del dióxido de azufre*. Ecuador. Retrieved from [www.linde.com.ec](http://www.linde.com.ec)
- Los Bestauradores. (2018). Diferentes tipos de Paneles, usos y complementos || Drywall. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=Z\\_Fgm4djwJQ](https://www.youtube.com/watch?v=Z_Fgm4djwJQ)
- MAAT soluciones Ambientales. (2019). Home • Maat. Retrieved February 28, 2019, from <http://www.maat.com.co/>
- Mendoza Quevedo, E. (2012). *Caracterización eléctrica de una planta de fabricación de placas de yeso basada en la norma ISO 50001:2011*. Cartagena. Retrieved from <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0063135.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015*. Retrieved from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0472 de 2017, Pub. L. No. 0472, 28 de Febrero (2017). Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017b). *Resolución 2254 de 2017*. Bogotá. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Decreto 1713*. Retrieved from <http://corponarino.gov.co/expedientes/juridica/2002decreto1713.pdf>
- Moreno, A. (2018). ECONOMIA CIRCULAR: CRECIMIENTO INTELIGENTE, SOSTENIBLE E INTEGRADOR, 1–65. Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>
- Nacional Lime Association. (2004). Manual de estabilización de suelo tratado con cal (p. 42). Retrieved from [https://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf](https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf)
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2019). Datos e indicadores. Retrieved from <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?&id=1026&v=1>
- OMS. (2018). Arsénico. Retrieved August 28, 2019, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Pantini, S., Giurato, M., & Rigamonti, L. (2019). A LCA study to investigate resource-efficient strategies for managing post-consumer gypsum waste in Lombardy region ( Italy ). *Resources, Conservation & Recycling*, 147(April), 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.019>
- Pascual-González, J., Guillén-Gosálbez, G., Mateo-Sanz, J. M., & Jiménez-Esteller, L. (2016). Statistical analysis of the ecoinvent database to uncover relationships between life cycle impact assessment metrics. *Journal of Cleaner Production*, 112, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.129>
- Pedreño-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J., & Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444–457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>
- Piñeiro, S. R., Merino, R., & García, C. P. (2015). New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling, 2015.
- Plataforma de Edificación Passivhaus-PEP. (2019). El estándar passivhaus y como funciona. Retrieved August 1, 2019, from <http://www.plataforma-pep.org/estandar/como-funciona>
- Presidente de la republica. (1974). *Decreto 2811 del 18 de Diciembre de 1974*. Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_2811\\_de\\_1974.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf)
- Quintana, A., Alba, J., del Rey, R., & Guillén-Guillamón, I. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. *Journal of Cleaner Production*, 185, 408–420. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.042>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Sanchez Henao, J. C. (2003). MATERIALES FIBROSOS DE BASE CONGLOMERADA. *Facultad de Arquitectura Universidad Nacional de Colombia*. Retrieved from [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://bdigital.unal.edu.co/5751/1/70750530.2003\\_1.pdf](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://bdigital.unal.edu.co/5751/1/70750530.2003_1.pdf)
- SDA. (2013). *Plan Institucional de Gestión Ambiental- PIGA*. Bogotá D.C.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). Resolución 5926 de 2011. Retrieved January 23, 2019, from <http://www.estrategiaambiental.com/normatividad/normas-de-interes-general/resolucion-5926-de-2011-reconocimiento-ambiental-a-edificaciones-ecoeficientes-preco/>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2019). Tratamiento y Disposición. Retrieved July 20, 2019, from <http://www.ambientebogota.gov.co/es/web/escombros/disposicion>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2012). Resolución 1115 de 2012. Retrieved January 23, 2019, from <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=49822>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2013). Resolución 1138 de 2013. Retrieved February 3, 2019, from <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=54076>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2014). *Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra*. Bogotá D.C. Retrieved from [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición \(RCD\) en obra.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra.pdf)
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2016). Lineamientos ambientales para los centros de tratamiento y/o aprovechamiento – cta de residuos de construcción y demolición. *Bogotá D.C.*
- Sierra, D. (2017). *Estudio de prefactibilidad para el montaje de una planta de aprovechamiento de placas de yeso o drywall en el área metropolitana*. INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA ESUMER. Retrieved from <http://repositorio.esumer.edu.co/bitstream/ESUMER/884/1/ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE APROVECHAMIENTO DE YESO.pdf>

- Stankowski, S., Sobolewska, M., Jaroszevska, A., & Gibczyńska, M. (2018). Influence of biomass ash , lime and gypsum fertilization on macro- and microelement contents in the soil and grains of spring wheat, *69*(3), 177–183. <https://doi.org/10.2478/ssa-2018-0018>
- Suárez, S., Calderón, L., Gassó, S., & Roca, X. (2018). Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete : The case of Catalonia ( Spain ). *Resources, Conservation & Recycling*, *133*(June 2017), 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.023>
- Suárez, S., Roca, X., & Gasso, S. (2016). Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: Application to the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.044>
- Subdirección de Control Ambiental al Sector Público– SCASP y Secretaría Distrital de Ambiente – SDA. (2019). Directorio de empresas comercializadoras de residuos de Construcción y Demolición – RCD. BOGOTA. Retrieved from [www.maat.com.co](http://www.maat.com.co)
- Subdirección de prácticas comerciales. (2016). *Informe técnico preliminar versión pública*.
- Teresa, M., Veiga, R., Santos, A., & Brito, J. De. (2019). Studies in ancient gypsum based plasters towards their repair : Physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, *202*, 319–331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.214>
- Universidad Nacional, B. (2015). *GUIA DE ANALISIS DOFA*. Bogotá D.C.
- Zhu, C., Zhang, J., Yi, W., Cao, W., Peng, J., & Liu, J. (2018). Research on degradation mechanisms of recycled building gypsum. *Construction and Building Materials*, *173*, 540–549. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.060>