



**Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Magister en Gestión Ambiental**

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA EMISIÓN DE GEI, DE UN
PROCESO DE RECICLAJE DE ENVASES TETRA PAK®®, A TRAVÉS
DEL CÁLCULO DE LA HdC”**

**TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER
EN GESTIÓN AMBIENTAL**

AUTOR: BEATRIZ AVEGNO RODRÍGUEZ

PROFESOR GUIA: Dr. OCIEL COFRÉ CARVAJAL

Valparaíso, 18 de Enero de 2022

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por enseñarme que los logros van acompañados de tesón, sacrificio y conocimiento.

A mi familia por su amor y apoyo incondicional

A todos mis profesores a lo largo de mi carrera profesional en especial aquellos que compartieron y me entregaron parte de su conocimiento y experiencia en este magister, gracias por aportar a mi crecimiento.



RESUMEN

El presente trabajo entrega la comparación a través de la huella de carbono (HdC), utilizada como indicador ambiental estandarizado, el impacto de un proceso de reciclaje de envases Tetra pak® y la alternativa que estos residuos lleguen como disposición final a un relleno sanitario asumiendo las consecuencias ambientales sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La planta de reciclaje a la cual se calculó la HdC estará ubicada en Viña del Mar y su producción consistirá en tableros tipo aglomerado aplicables a la construcción, fabricados a partir de envases Tetra pak® provenientes de las comunas del Gran Valparaíso. Dada la ubicación de la planta se determina la disposición final de estos envases en el relleno sanitario El Molle ubicado en Valparaíso.

La HdC, para estas alternativas, se calculó en base a la metodología de Greenhouse Gas (GHG) Protocol determinándose sólo los alcances 1 y 2 y los respectivos factores de emisión publicados para el año 2019.

En base al tipo de tableros reciclados en la planta, se efectuó además, una segunda comparación con la huella de carbono de la producción de tableros de madera del tipo OSB (Oriented Strand Board), la cual se realizó a través de la comparación de la huella publicada por los autores, Kutnar y Hill en 2014 sobre la producción de estos tipos de tablero.

Como resultado, se obtuvieron las respectivas emisiones de CO_{2eq} asociadas a las alternativas de reciclaje y disposición, encontrándose que la mayor contribución de la HdC es la disposición final siendo 2,15 veces más alta que la del reciclaje.

Por otro lado, la producción de tableros OSB presenta una HdC 2 veces mayor que la asociada a la producción de tableros reciclados.

Se determinó además, las mejoras aplicables a la planta de reciclaje para disminuir aún más su HdC, siendo la producción de energía fotovoltaica la que presenta la mayor disminución (88,6%).

El análisis de las HdC muestra que un proceso industrial de reciclaje aporta una disminución en los impactos ambientales considerando las emisiones de gases de efecto invernadero.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RESIDUOS EN CHILE.....	2
1.2. RECICLAJE.....	4
1.2.1. Envases.....	5
1.2.2. Envases Tetra pak®.....	8
1.3. EMISIONES GEI EN DISPOSICIÓN FINAL.....	12
1.4. HUELLA DE CARBONO.....	13
1.4.1. Análisis de la huella de carbono.....	15
1.4.2. Cálculo huella de carbono.....	17
2. PROBLEMA.....	25
3. OBJETIVOS.....	26
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	26
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
4. METODOLOGÍA.....	27
4.1. HUELLA DE CARBONO	27
4.2. HUELLA DE CARBONO DE LA PLANTA DE RECICLAJE	27
4.3. HUELLA DE CARBONO RELLENO SANITARIO	30
4.4. HUELLA DE CARBONO TABLEROS DE MADERA.....	32
4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	32
5. RESULTADOS.....	33
5.1. HUELLA DE CARBONO PLANTA DE RECICLAJE.....	33
5.2. HUELLA DE CARBONO DISPOSICIÓN EN RELLENO SANITARIO EL MOLLE.....	42
5.3. HUELLA DE CARBONO TABLEROS OSB.....	48
5.4. RESUMEN DE RESULTADOS	49
5.5. PROPUESTAS DE MEJORAS	50
6. DISCUSIÓN	56
7. CONCLUSIONES.....	61
8. BIBLIOGRAFIA	62
ANEXOS	66



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Generación de residuos a nivel nacional según origen, 2015-2018.....	3
Figura 1-2. Generación de residuos a nivel nacional según origen, 2015-2018.....	4
Figura 1-3. Composición de los residuos municipales valorizados, 2018	5
Figura 1-4. Composición envase Tetra pak®	8
Figura 1-5. Mecanismo de reciclaje de envases Tetra pak®	9
Figura 1-6. Evolución de Producción de Tableros OSB en Chile período 2001-2019	10
Figura 1-7. Tipos de tableros OSB de Lousiana Pacific.....	11
Figura 1-8. Tablero reciclado de envases Tetra pak®	11
Figura 1-9. Patrón típico de generación de biogas	12
Figura 1-10. Emisiones de GEI por sector, período 1990-2018.....	16
Figura 1-11. Alcance GHG Protocol	17
Figura 1-12. Esquema Metodológico GHG Protocol.....	18
Figura 1-13. Participación relativa por fuente de generación eléctrica (%).....	23
Figura 1-14. Volumen de energía generada por fuente (GWh)	24
Figura 4-1. Factores de emisión del SEN período 2018-2021 (CO ₂ eq/MWh).....	29
Figura 4-2. Captación Biogás y Generación Eléctrica en relleno sanitario El Molle.....	30
Figura 5-1. Layout planta de reciclaje.....	34
Figura 5-2. Toneladas ingresadas al relleno El Molle desde el Gran Valparaíso (2019).....	43
Figura 5-3. Total de residuos ingresados al relleno El Molle (2013-2020).....	45
Figura 5-4. Metano producido por relleno sanitario El Molle.....	46
Figura 5-5. Comparación de resultados de HdC	49
Figura 5-6. Generación fotovoltaica mensual promedio	53



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Cantidad de envases y embalajes en el mercado y valorizados	6
Tabla 1-2. Porcentaje de envases de plástico, papel y cartón en RSU del Gran Valparaíso.....	7
Tabla 5-1. Datos generales y superficies de la planta de reciclaje	33
Tabla 5-2. Alcance 1	36
Tabla 5-3. Factores de emisión combustibles.....	37
Tabla 5-4. Cálculo Huella de carbono alcance 1	37
Tabla 5-5. Alcance 2.....	38
Tabla 5-6. Consideraciones de uso de los equipos	40
Tabla 5-7. Cálculo Huella de carbono alcance 2	41
Tabla 5-8. Estimación de viajes por comuna que aportan los envases Tetra pak® a disposición	42
Tabla 5-9. Alcance 1 por transporte de RSD a relleno sanitario	44
Tabla 5-10. Alcance 1 por emisión de biogás.....	47
Tabla 5-11. Alcance 2 por generación de electricidad.....	48
Tabla 5-12. Huella de carbono de tableros	49
Tabla 5-13. Actividades con mayor HdC del alcance 1.....	50
Tabla 5-14. Alcance 1 con mejoras propuestas	51
Tabla 5-15. Actividades con mayor HdC del alcance 2.....	52
Tabla 5-16. Consideraciones para simulación en Explorador Solar.....	52
Tabla 5-17. Resultados generación fotovoltaica.....	53
Tabla 5-18. Consumo y generación eléctrica en meses de invierno.....	54
Tabla 5-19. HdC de la planta de reciclaje con mejoras	55



1. INTRODUCCIÓN

La preocupación global sobre el medio ambiente ha llegado a todos los ámbitos de nuestras vidas, y la industria no es ajena a ello. Las diferentes iniciativas a nivel internacional tales como la conferencia de Estocolmo (1972), el Convenio de Basilea (1989) y el Protocolo de Kioto (1997), por nombrar algunas, que han contribuido a mitigar los impactos como la escasez de recursos naturales, la contaminación atmosférica, la acumulación de residuos y por sobre todo el cambio climático, constituyen una respuesta a los efectos ya presentes en este particular.

En cuanto a la generación de residuos, esta es una problemática que ha ido aumentando en el tiempo. El Banco mundial en el informe titulado What a Waste 2.0 (Los desechos 2.0) del año 2018, estimaba que la generación de residuos sólidos municipales aumentaría de 2.010 millones de toneladas en 2016 a 3.400 millones de toneladas en 2050, debido a la urbanización de las ciudades, su desarrollo económico y el crecimiento de la población. Además, para el año 2018 al menos el 33 % de estos residuos no se gestionaban sin riesgo para el medio ambiente, debido a la disposición inadecuada (basurales) y la quema de basura que perjudica la salud, daña el medio ambiente, afecta el clima, y dificulta el desarrollo económico en países tanto pobres como ricos (Banco Mundial, 2018).

Por tanto, este problema sanitario y ambiental hace crucial la búsqueda de alternativas para mejorar la gestión y manejo de los diversos residuos que se generan para que las ciudades y las comunidades sean sostenibles. Si no se toman medidas, el mundo se encaminará peligrosamente al aumento sostenido de los desechos y por tanto a una contaminación extraordinaria, pagándose así un precio más alto que el actual en términos de vidas, medios de subsistencia y el medio ambiente (Banco Mundial, 2018)

En cuanto a Chile, es uno de los países que lidera la generación de basura en Latinoamérica con 1,15 kilogramos per cápita diario, siendo superado sólo por México (Kaza *et al.*, 2018).

Entonces, la principal problemática de residuos en nuestro país, como en el mundo, está relacionada con la generación y la falta de gestión de los residuos en forma eficiente. En Chile los residuos, tanto municipales como industriales son enviados en su mayor parte a disposición final (99% y 78%, respectivamente), producto de una lógica tradicional de



extraer – producir – consumir – desechar (economía lineal) (MMA. Informe Estado Medio Ambiente 2020), no aprovechando el potencial que aún pueden tener los residuos en cuanto a recuperación de materiales, energía o dándole otro valor a través del reciclaje.

Sin embargo, desde que Chile pertenece a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) ha tenido que superar una serie de desafíos en materia medioambiental, desde consolidar una institucionalidad eficiente, los compromisos de emisiones de gases de efecto invernadero, hasta la gestión eficiente de los residuos. En este punto, nuestro país ha ido avanzando y trabajando en la incorporación paulatina del concepto de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en la gestión integral de residuos sólidos, promulgando la Ley 20.920/16, que promueve la disminución de la generación de residuos y fomenta el reciclaje para seis residuos prioritarios: aceites lubricantes, aparatos eléctricos y electrónicos, baterías, envases y embalajes, neumáticos y pilas.

La acción de reciclar, que va desde la etapa básica de segregar, hasta complejos procesos para recuperación de materiales, tiene un gran impacto positivo, como el ahorro de energía, la disminución de la contaminación y consumo de recursos naturales vírgenes, ya que alarga el ciclo de vida de los materiales. Pero la cuestión es, que la referida disminución en la contaminación se relaciona con el ahorro y eficiencia en el proceso industrial original, pero la pregunta de fondo es si esto compensa la contaminación que tiene el proceso utilizado en el reciclaje.

Se hace interesante, por tanto, determinar el nivel de contaminación de algún proceso de reciclaje de un residuo prioritario, a través de una herramienta estandarizada que pueda ser comparada con el impacto en el medio ambiente de la alternativa de no reciclar.

1.1. Residuos en Chile

Los residuos se generan como consecuencia de un modelo lineal de producción, consumo y eliminación para satisfacer las necesidades humanas, y en Chile se pretende quebrar este modelo incentivando el reciclaje y activar la economía circular que en su definición (MMA,2020), es un modelo de producción y consumo que implica compartir,

reutilizar, reparar, restaurar y reciclar materiales y productos existentes el mayor tiempo posible. De esta forma, se prolonga el ciclo de vida de los productos.

Para el año 2018, el país generó 19,6 millones de toneladas de residuos sólidos, de los cuales el 97% son no peligrosos. Sin embargo, de este total sólo 8,2 millones de toneladas (41,7%) son residuos domésticos generados por las comunas y reportados a través de la plataforma SINADER por las respectivas municipalidades.

En la Figura 1-1 se presenta la generación de residuos a nivel nacional para el período 2015 al 2018.

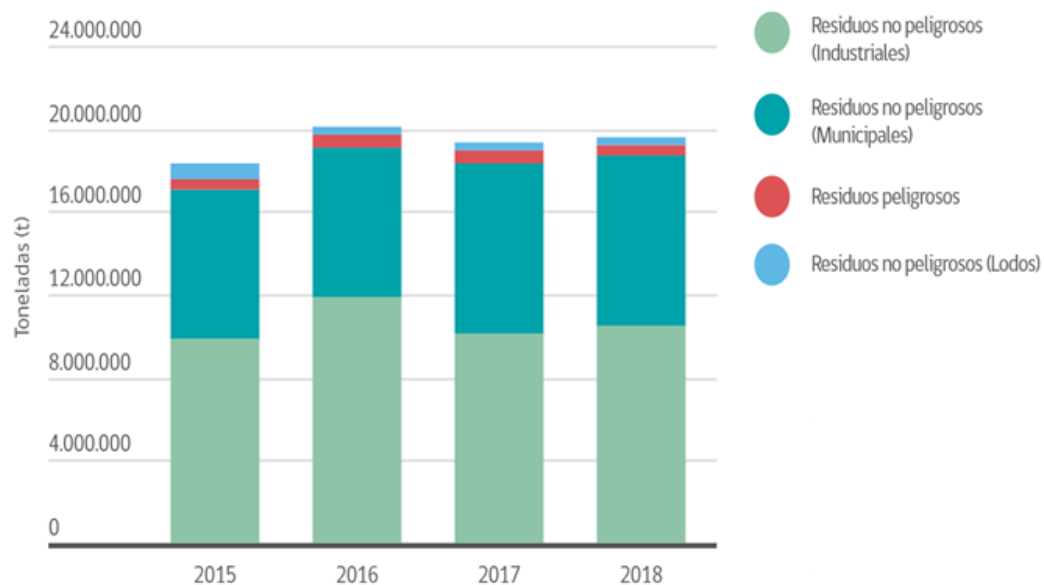


Figura 1-1. Generación de residuos a nivel nacional según origen, 2015-2018.

Fuente: MMA, Informe Estado Medio Ambiente 2020

Con respecto a la Región de Valparaíso, ésta aporta con el 10,6% de los residuos municipales teniendo un porcentaje del 72,2% que llega a vertedero o relleno sanitario (MMA, SINIA 2020).

Por otro lado, el Gran Valparaíso que es un área metropolitana que comprende gran parte de la Provincia de Valparaíso, cuya conurbación está compuesta por las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quilpué y Villa Alemana, concentra el 52,4% de la población regional, con 951.311 habitantes según la estimación del levantamiento censal

del año 2017. La generación de sus residuos municipales ha ido en aumento dado el crecimiento poblacional, pero se espera que los incentivos a los procesos de reciclajes dado la ley REP disminuya la fracción que va a disposición final.

En la Figura 1-2 se presenta la generación de residuos municipales de las comunas que conforman el Gran Valparaíso, las cuales se disponen en el relleno sanitario El Molle, ubicado en el camino La Pólvora, en la comuna de Valparaíso, con excepción de la comuna de Villa Alemana que dispone en el en el Relleno Sanitario San Pedro ubicado en la comuna de Quillota.

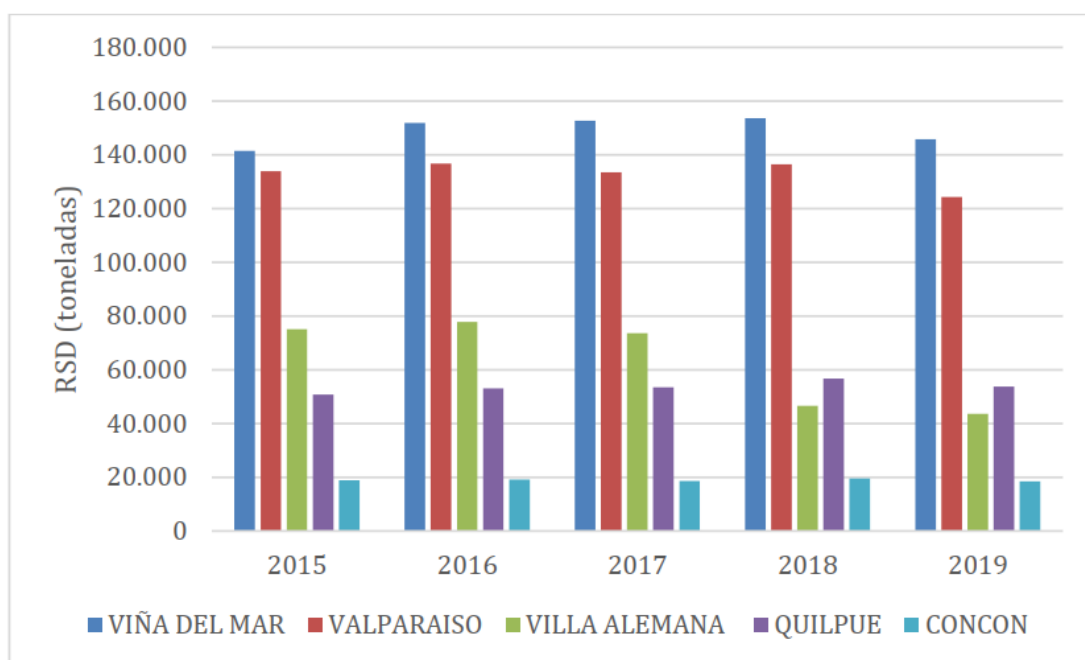


Figura 1-2. Generación de residuos a nivel nacional según origen, 2015-2018.

Fuente: (González, 2021)

1.2. Reciclaje

Según estadísticas del Ministerio del Medio Ambiente (MMA,2020) del total de residuos municipales el 99% va a disposición final, por tanto, solo el 1% de estos residuos van a algún tipo de valorización, donde el reciclaje corresponde al 45,8%.

La composición de la fracción valorizada incluye principalmente al vidrio, con una participación del 38,2% seguido por el papel y cartón con 22,2%. En la Figura 1-3 se muestra la composición de la valorización de residuos municipales.

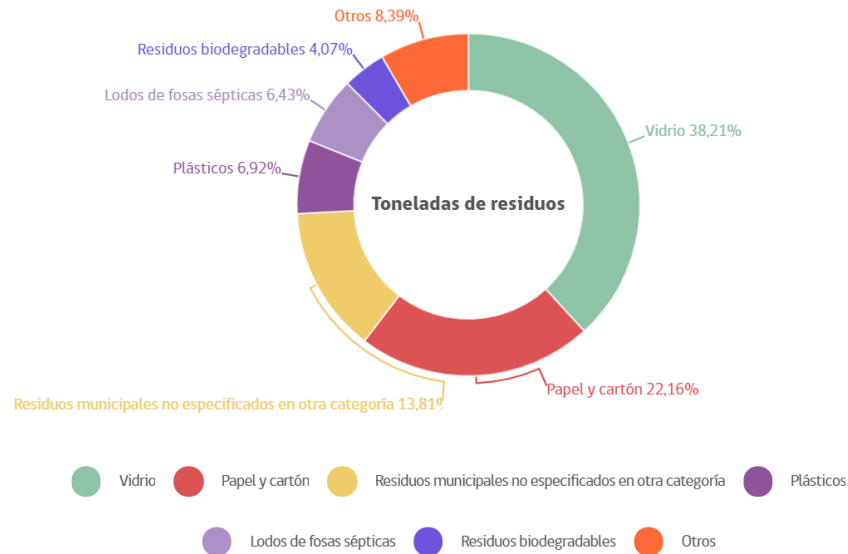


Figura 1-3. Composición de los residuos municipales valorizados, 2018

Fuente: MMA, Informe Estado Medio Ambiente 2020

Dadas las cifras presentadas, la Ley REP propone un gran desafío, sobre todo porque nuestro país no cuenta con la capacidad instalada suficiente para que el reciclaje haga la diferencia en la gestión eficiente de los residuos. El Catastro Nacional de instalaciones de Recepción y Almacenamiento, e Instalaciones de valorización de residuos en Chile, reporta sólo 54 valorizadores de residuos a lo largo del país, concentrados en la Región Metropolitana, seguido por Valparaíso y Biobío mostrando la falta de cobertura en las regiones más alejadas del centro del país (González, 2021).

1.2.1. Envases

Se define como envase a todo objeto de cualquier material o naturaleza, destinado a contener, proteger, manejar y transportar una sustancia u objeto para su distribución, comercialización, consumo, valorización y/o eliminación. La cantidad de residuos generados a partir de ellos es equivalente al consumo interno aparente de esto, dado que el



tiempo de comercialización y uso promedio es menor a un año. (C y V Medioambiente, 2015).

Como se mencionó anteriormente, los envases y embalajes pasaron a ser residuos prioritarios en la Ley REP, pero hoy la disposición de estos residuos sigue siendo un problema de carácter ambiental con respecto a emisiones GEI, todo esto a pesar de la promulgación del D.S. 12/2020 que impone “la obligación de recolectar y reciclar todos los envases y embalajes de plástico, vidrio, cartón, lata y cartón para líquidos, para alcanzar el 60% de reciclaje de los envases domiciliarios”, sumado a iniciativas como el APL de Ecoetiqueta para Envases y Embalajes, que permite informar a los consumidores sobre los niveles de reciclabilidad de los productos que compran (MMA, 2200).

La Tabla 1-1 presenta la cantidad, en toneladas, de envases y embalajes puestos en el mercado y valorizados por subcategoría correspondiente al año 2018, donde se visualiza que se valoriza sólo el 12,5% de estos residuos (González, 2021).

Tabla 1-1 Cantidad de envases y embalajes en el mercado y valorizados

Subcategoría	Puesto en el mercado (t)	Valorización (t)
Cartón para líquidos	22.844	828
Metal	95.719	6.595
Papel y cartón	328.049	58.548
Plástico	323.776	14.721
Vidrio	486.576	76.301
Total	1.256.964	156.993

Fuente: (González, 2021)

Dentro de los envases de papel y cartón se incluye una amplia variedad de productos, entre los que se pueden mencionar:

- Cajas cartón corrugado y microcorrugado
- Envases tubulares de fibropapel
- Envases de cartulina



- Sacos multipliegos (10 kg y más) y bolsas (< 10 kg)
- Elementos de embalaje
- Bandejas pulpa moldeada
- Papel envolver: cortes menores
- Envases multicomponentes (“Tetra pak[®]”)

La industria de papel y cartón ha hecho esfuerzos por reducir el uso de materias primas, y en los últimos años ha logrado ahorros de hasta 30% en la fabricación de cajas de cartón corrugado y envases multicomponentes. Esto se ha logrado mediante el uso de tecnologías limpias, ecodiseño, o producción eficiente y reciclaje de materia prima (C y V Medioambiente, 2015).

En cuanto a los envases multicomponentes como el Tetra pak[®], éstos generan proporcionalmente menos residuos que otras alternativas de envasado, dado que este tipo de envase tiene un menor peso y su volumen se reduce significativamente colapsándolos. Estos envases son estables y por lo tanto no tóxicos dentro de un relleno sanitario, pero se requiere un largo período de tiempo para su degradación. (C y V Medioambiente, 2015).

En la Tabla 1-2 se presenta la composición de envases de plástico, papel y cartón en los residuos domésticos de las comunas del Gran Valparaíso.

Tabla 1-2. Porcentaje de envases de plástico, papel y cartón en RSU del Gran Valparaíso

Residuo	Valparaíso	Viña del Mar	Concón	Quilpué	Villa Alemana
Plástico Pet	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Plástico (otro)	8,9	9,6	9,4	9,3	9,1
Papel y cartón	7,6	8,1	8,0	7,9	7,8
Tetra pak [®]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Materia Orgánica	72,4	69,9	70,4	70,7	71,2
Total	90,0	88,8	89,0	89,1	89,3

Fuente (González, 2021)

1.2.2. Envases Tetra pak®

Los envases comúnmente llamados Tetra pak®, fueron creados por el Dr. Ruben Rausing, fundador de la empresa sueca Tetra pak®, quien inició el desarrollo de este tipo de envases con forma de tetraedro, cuyo fin era formar un tubo a partir de un rollo de papel plastificado, llenarlo con alimento o bebida y sellarlo por debajo del nivel del líquido.

Esta compañía desde su llegada a Chile en 1977 no sólo ha tomado un fuerte liderazgo dentro del mercado, sino que también ha logrado traspasar importantes valores como seguridad, calidad e innovación, a través de sus envases para una variada gama de productos como leche, jugos y salsas de tomates, entre otros. La versatilidad de estos envases lo entrega su innovadora composición de capas superpuestas y pegadas entre sí, de interior a exterior de: papel aluminio (5%) que protege contra el oxígeno y la luz para mantener el valor nutricional y el sabor del alimento en el envase a temperatura ambiente, cartón (75%), brinda estabilidad, fuerza y suavidad para la superficie de impresión y polietileno (5%) que protege de la humedad exterior y permite que el cartón se pegue al papel aluminio (Tetra pak®, 2020a).

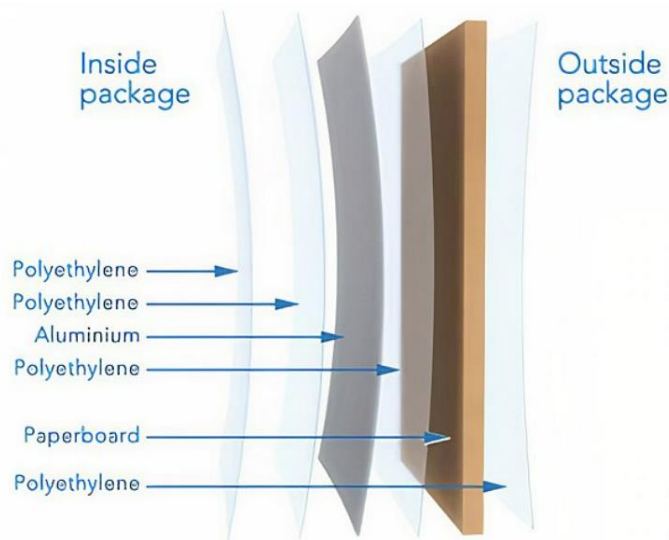


Figura 1-4. Composición envase Tetra pak®

Fuente: www.tetrapak.com

A nivel mundial Tetra pak® ofrece mucho más que equipos de envasado para productos alimenticios líquidos, sino que también proporciona una gama de tecnologías de procesamiento y envasado y distribución, diseñados para optimizar el uso de recursos. En la actualidad, están enfocados en diseñar envases de cartón fabricados únicamente con materiales de origen vegetal que sean totalmente renovables, totalmente reciclables y sin emisiones de carbono. Sin embargo, como solución a corto plazo a la problemática mundial de la disposición de residuos, y lo que les compete en responsabilidad sobre sus envases, esta compañía tiene iniciativas conjuntas en varios países con más de 170 recicladores para fortalecer la infraestructura de recolección, clasificación y reciclaje de envases de cartón. Además, invierten conjuntamente con recicladores para aumentar la capacidad de procesar materiales, y colaboran con proveedores de tecnología para mejorar los procesos de reciclaje. (Tetra pak®, 2020b).

Esto habla del compromiso de este tipo de empresas con la responsabilidad extendida que tienen sobre sus envases. En la Figura 1-5 se muestra el proceso genérico de reciclaje de estos envases.

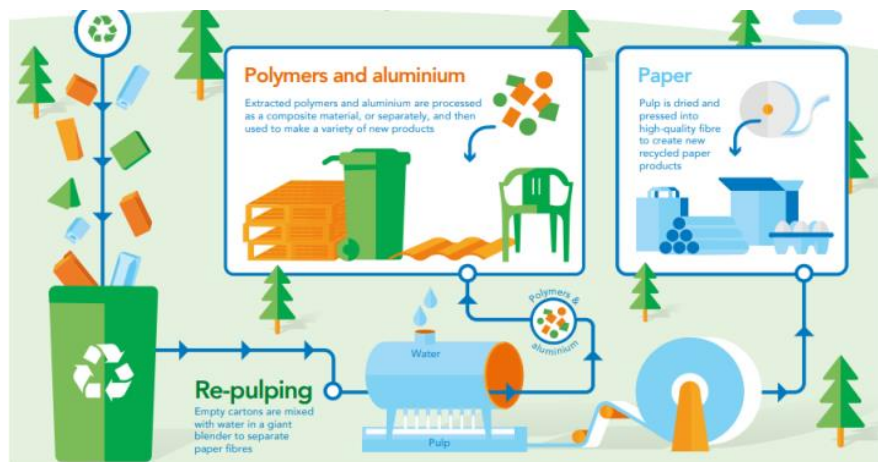


Figura 1-5. Mecanismo de reciclaje de envases Tetra pak®

Fuente: Tetra pak®, 2020

Dentro de los tipos de reciclaje que se efectúa a los envases Tetra pak® existe la elaboración de placas ecológicas para distintos usos de construcción interior como revestimientos y techumbres, las cuales constituyen un reemplazo para los tableros de madera aglomerada como el OSB, rebajando el uso de materias primarias.

En el rubro forestal, los tableros son aquellos productos fabricados a partir de la degradación de madera y posterior agregación en piezas estandarizadas, agregando en forma optativa elementos químicos que mejoran sus propiedades. La fabricación de tableros es una de las áreas que más ha evolucionado en la industria forestal chilena, abarcando la producción de madera contrachapada, de partículas, prensada, tableros de densidad media (MDF) y tableros OSB (INFOR, 2020).

Los tableros OSB, por su sigla en inglés, Oriented Strand Board, son paneles formados a base de virutas u hojuelas, las cuales se orientan en forma mecánica o electrostática, formando capas delgadas del tablero. De esta manera, el producto puede estar formado por tres o cinco capas dispuestas perpendicularmente entre sí. Las hebras son encoladas y prensadas en caliente, empleándose una resina fenólica, dadas las características de uso estructural y exteriores de estos tableros (Carrasco, 2012).

En Chile, este tipo de tablero no era muy conocido hasta la llegada al país de la empresa Louisiana Pacific S.A., la cual instaló su primera planta en el año 1999. Desde entonces se ha logrado producir y comercializar los tableros OSB a gran escala en nuestro país, tal como se aprecia en el gráfico de la Figura 1-6.

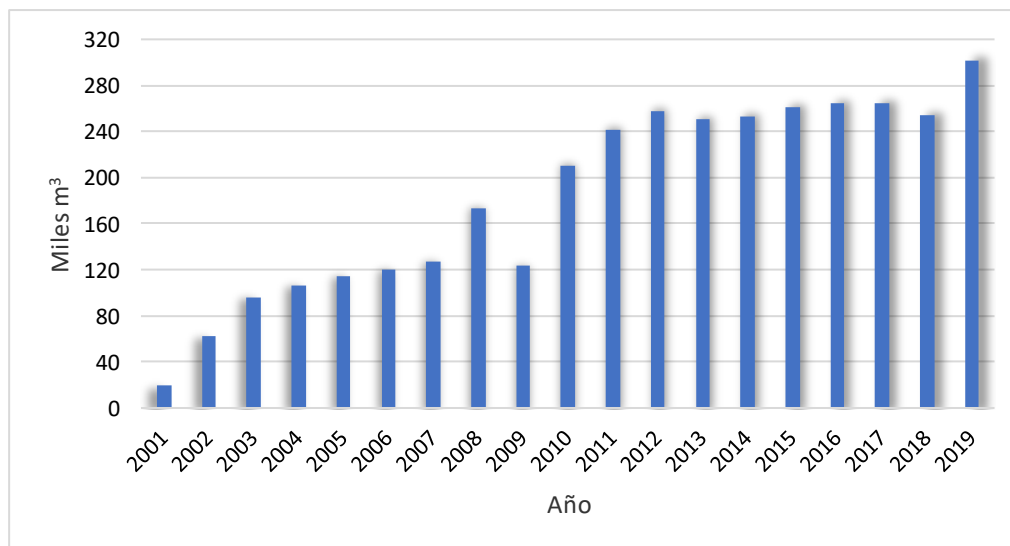


Figura 1-6. Evolución de Producción de Tableros OSB en Chile período 2001-2019

Fuente: INFOR, 2020

En la Figura 1-7 se presentan tres tipos de tableros OSB que tiene en el mercado chileno la empresa Lousiana Pacific.



Figura 1-7. Tipos de tableros OSB de Lousiana Pacific

Fuente: www.lpchile.cl

Por otro lado, la elaboración de tableros a partir de envases Tetra pak[®] es muy similar que la producción de tableros OSB donde existe una etapa de reducción de tamaño de partículas por trituración o chipeo seguido por un lavado y termina con termocompresión a una temperatura aproximada de 170°C durante 20 minutos, obteniendo un tablero ligero y resistente a la humedad (González, 2021). Además, salen al mercado después de una etapa de corte con las mismas dimensiones que el tablero OSB. En la Figura 1-8 se presenta el tablero reciclado.



Figura 1-8. Tablero reciclado de envases Tetra pak[®]

Fuente: www.tecaplak.cl/productos.php

1.3. Emisiones GEI en disposición final

Los impactos al ambiente por la disposición de residuos en lugares no regulados y/o autorizados tiene relación con la contaminación del suelo y las napas subterráneas por infiltración de lixiviados, además de la circulación de vectores sanitarios que transmiten infecciones. Sin embargo, la normativa de rellenos sanitarios ha introducido cambios técnicos y constructivos que controlan estos impactos de base.

Pero sean vertederos o rellenos sanitarios, se generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tales como metano y dióxido de carbono como resultado de la descomposición de la materia orgánica de los residuos dispuestos, por acción de organismos anaeróbicos.

El gas generado en estos sitios de disposición final, denominado biogás, tiene una composición variable según datos de literatura, de metano (45 – 70% CH₄) y dióxido de carbono (30 – 55% CO₂) (Moreno, B., 2017) que dependerá de características propias de cada relleno sanitario, la cantidad de materia orgánica y la composición del residuo, además de cuán eficiente se maneje para reducir la respectiva contaminación por emisiones GEI. En la Figura 1-9 se muestra el patrón típico de generación de biogás según las fases de descomposición del residuo.

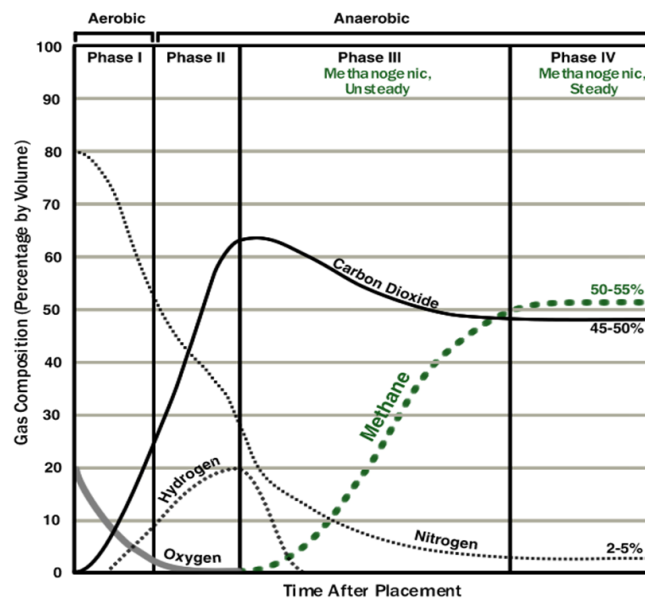


Figura 1-9. Patrón típico de generación de biogás

Fuente: EPA, 2020



Según datos del MMA, sólo el 79% de los residuos municipales que son dispuestos llegan a rellenos sanitarios. Aquellos más eficientes, como el relleno Las Lomas Lo Colorado en la Región Metropolitana, utilizan la fracción capturada de metano en el biogás como combustible aprovechando su alto poder calorífico ($35,8 \text{ MJ/m}^3$) para generar energía eléctrica lo cual reduce las emisiones GEI (Keller, 2011).

Como ya se mencionó la mayoría de las comunas establecidas en el Gran Valparaíso (Valparaíso, Viña del Mar, Concón y Quilpué) disponen sus residuos en el relleno sanitario El Molle el cual tiene generación eléctrica a partir de biogás desde el año 2017, con un nivel de generación en el año 2019 de 1.500 MW (valor entregado por Veolia).

1.4. Huella de Carbono

La preocupación internacional por las consecuencias adversas del cambio climático ha motivado a las organizaciones e instituciones a tomar medidas para conocer a fondo la dinámica de los gases de efecto invernadero, siendo la huella de carbono uno de los indicadores reconocidos mundialmente para comprender dicha dinámica.

La huella de carbono se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO_2 equivalentes (www.mma.gob.cl).

Los gases que se indican en el Protocolo de Kioto como máximos responsables del efecto invernadero son: el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre y, desde la COP celebrada en Doha a finales de 2012, el trifluoruro de nitrógeno. Sin embargo, el CO_2 es el GEI que influye en mayor medida al calentamiento del planeta, y es por ello que las emisiones de GEI se miden en función de este gas. Por esta razón, las toneladas de CO_2eq indica el potencial de calentamiento atmosférico o potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno de estos GEI, expresado en términos del PCG de una unidad de CO_2 (Espíndola *et al*, 2012).

Existen diferentes métodos presentados en la literatura para el cálculo de la Huella de Carbono en empresas, organizaciones, servicios, procesos y productos. A continuación, se presentan los más usados (MTE, España 2014).



- *Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol)*. Desarrollado por *World Resources Institute* (Instituto de Recursos Mundiales) y *World Business Council for Sustainable Development* (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible).

Esta iniciativa es fruto de una colaboración multilateral entre empresas, organizaciones no-gubernamentales y gobiernos, además, cuenta con el apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (United States Agency for International Development, USAID) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, USEPA).

El protocolo GHG ha logrado un alto nivel de reconocimiento a escala mundial y aparece como la principal referencia, junto con los estándares ISO 14064. Además, de constituirse como referente en términos de lineamientos generales, el protocolo GHG también ha desarrollado un conjunto de herramientas (software) para el cálculo de la HdC inicialmente de empresas. La popularidad y el reconocimiento de este protocolo, aunado a la gratuidad de las aplicaciones ha concretado el éxito y alta demanda de ellas (Espíndola et al, 2012).

- *UNE-ISO 14064-1*. De acuerdo con el GHG Protocol se desarrolla en 2006 la norma ISO 14064 que se estructura en 3 partes. La que sería de aplicación para esta guía es la 14064-1 que especifica los principios y requisitos, a nivel de organización, para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de GEI. Las otras partes de esta norma se dirigen, por un lado, a proyectos sobre GEI específicamente diseñados para reducir las emisiones de GEI o aumentar la remoción de GEI (ISO 14064-2) y, por otro lado, a la validación y la verificación de los GEI declarados (ISO 14064-3).

- *UNE-ISO 14065: 2012*. Requisitos para los organismos que realizan la validación y la verificación de gases de efecto invernadero, para su uso en acreditación u otras formas de reconocimiento.

- *IPCC 2006 GHG Workbook*. Una completa guía para calcular GEI provenientes de diferentes fuentes y sectores, y que incluye una detallada lista de factores de emisión.

- *Bilan Carbone (Francia)*. *La Agence d l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie* (Agencia Francesa del Medio Ambiente y Gestión de la Energía), se elaboró e



implementó a partir de 2004 esta herramienta metodológica dedicada a la medición de emisiones de GEI. Se basa en los contenidos de GHG Protocol e ISO 14064.

1.4.1. Análisis de la huella de carbono

El cálculo de la huella de carbono de una organización supone un análisis detallado de la actividad que lleva a cabo y las fuentes emisoras de GEI consideradas para el cálculo. Se distinguen 3 alcances: 1.- emisiones directas; 2.- emisiones indirectas por consumo eléctrico y 3.- las otras emisiones indirectas relacionadas con materias primas, disposición de residuos, etc. La determinación entonces de HdC viene dada por la siguiente ecuación general:

$$\text{HUELLA DE CARBONO}_{\text{organización}} = \sum (\text{DATO ACTIVIDAD X FACTOR DE EMISIÓN})_i$$

Donde i = tipo de alcance

Los factores de emisión de gases de efecto invernadero son obtenidos a partir de la categoría de impacto de cambio climático, siendo estos factores de emisión medidos en kg de CO₂ eq. Estos factores por tanto son indicadores que cuantifican las emisiones de GEI que son consecuencia directa de una actividad y que son estimados a partir de inventarios de emisiones contruidos bajo la metodología de análisis de ciclos de vida, ISO 14044:2006, la cual trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba). Luego estas estimaciones son procesadas por softwares especializados como el SimaPro, el cual también es utilizado por Huella Chile. (Estay *et al*, 2017).

Los factores de emisión pueden estimarse de forma global a través de bases de datos internacionales o calcularlos en forma específica con datos nacionales los cuales van cambiando año a año según las mejoras implementadas en el sector productivo para disminuir el efecto de los GEI.

Además, el cálculo de HdC puede permitir a las empresas más innovadoras, diseñar nuevos productos o servicios que reduzcan los impactos de los GEI de clientes o proveedores. Las actuaciones en huella de carbono ayudan a distinguir la empresa en un

mercado cada vez más consciente y que valora preferentemente a las empresas y productos más sostenibles, ya que el ejercicio de cálculo de la huella de carbono es el requisito previo para iniciar actuaciones en materia de cambio climático.

El análisis de huella de carbono proporciona, por tanto, un dato que puede ser utilizado como indicador ambiental de una actividad, incluso de un país o región. La participación de Chile en el total mundial de emisiones de GEI es de apenas 0,24% en el 2016. Según los cálculos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (Ingei), Chile reporta 6,2 toneladas por persona en 2016 y 6,1 toneladas en 2018, situándose muy por debajo del promedio de los países de la OCDE, que llega a 11,6 toneladas de CO₂ por persona (MMA, 2020).

Se presenta en Figura 1-10 la huella de carbono reportada por Chile para el 2018, donde el 7,2% de las emisiones GEI provienen del sector de residuos.

Según datos del Banco Mundial, si no se introducen mejoras en este sector, la huella de carbono relacionada con los desechos sólidos a nivel mundial probablemente llegará a 2.600 millones de toneladas de CO₂ equivalente para el 2050, (Banco Mundial, 2018).

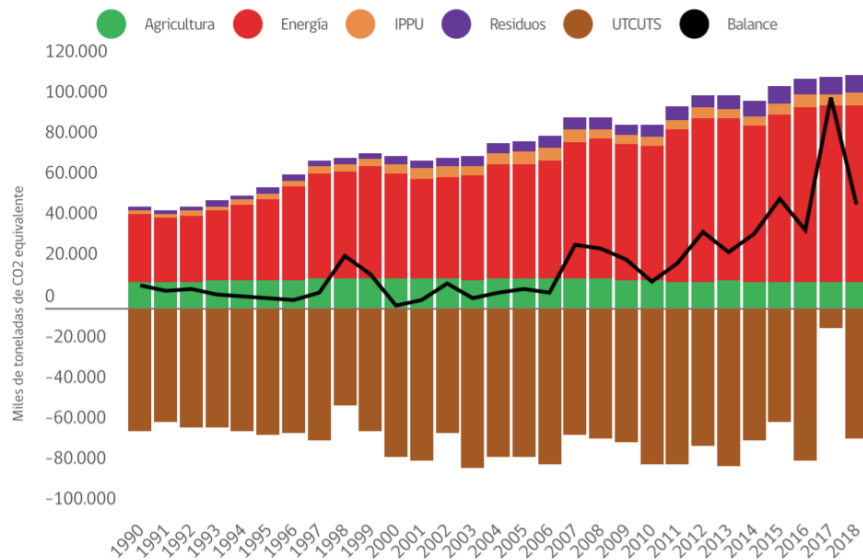


Figura 1-10. Emisiones de GEI por sector, período 1990-2018

Fuente: MMA. Informe Estado Medio Ambiente 2020

1.4.2. Cálculo huella de carbono

Como se mencionó en el punto anterior existen varias metodologías para el cálculo de la huella de carbono, pero todas ellas coinciden en la estimación de las emisiones GEI evaluando tres alcances generales, las cuales se presentan en forma esquematizada en la siguiente figura en base a la metodología GHG Protocol, la cual es la más utilizada.

Como se presenta en la Figura 1-11, se consideran tres tipos de emisiones en función del nivel de control que una organización o individuo tiene sobre ellas: (i) emisiones directas (Alcance 1) que resultan de actividades controladas por la organización, (ii) emisiones indirectas generadas por el uso o compra de electricidad o energía (Alcance 2), y (iii) emisiones indirectas generadas por productos o servicios (Alcance 3).

Las emisiones directas generalmente resultan del uso de combustibles (diésel o gas) que emiten CO₂ en el proceso de producción, o bien de emisiones de otros GEI como metano (CH₄) u óxido nitroso (NO₂) en la producción de ciertos bienes o servicios.

Como emisiones indirectas, por uso de electricidad se consideran todas aquellas que son producto de compras de energía para iluminación, calefacción y operación de equipos eléctricos.

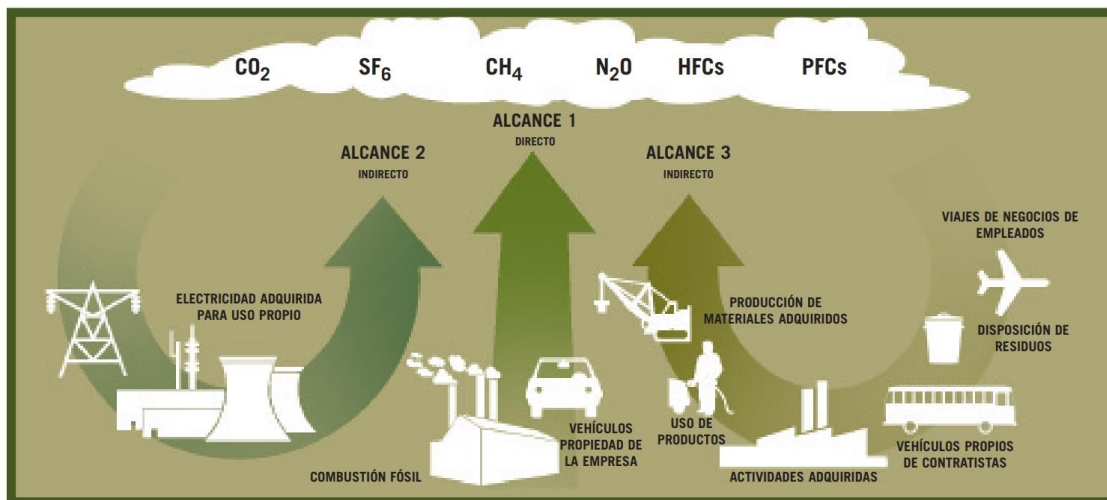


Figura 1-11. Alcance GHG Protocol

Fuente: www.ghgprotocol.org

La contribución de estas emisiones a la huella depende fuertemente de la composición de la matriz energética con la que se genera la electricidad. En este sentido, gran parte de las emisiones dependen de la estrategia de los países en la generación de energía.

Finalmente, las emisiones indirectas se derivan de las compras de bienes y servicios que hace una organización o individuo. En la medida que los utilice de forma eficiente, disminuye su huella de carbono por producto; en ese sentido se atribuye cierta responsabilidad en la generación de emisiones de este alcance.

Según este protocolo, toda organización debe incluir el primer y segundo ámbito, siendo la inclusión del tercero de forma voluntaria, ya que se enfatiza contabilizar y reportar las actividades para las que se tiene información confiable. (GHG Protocol, 2007)

En forma general el cálculo de la huella de carbono para esta metodología consta de los pasos presentados en Figura 1-12:

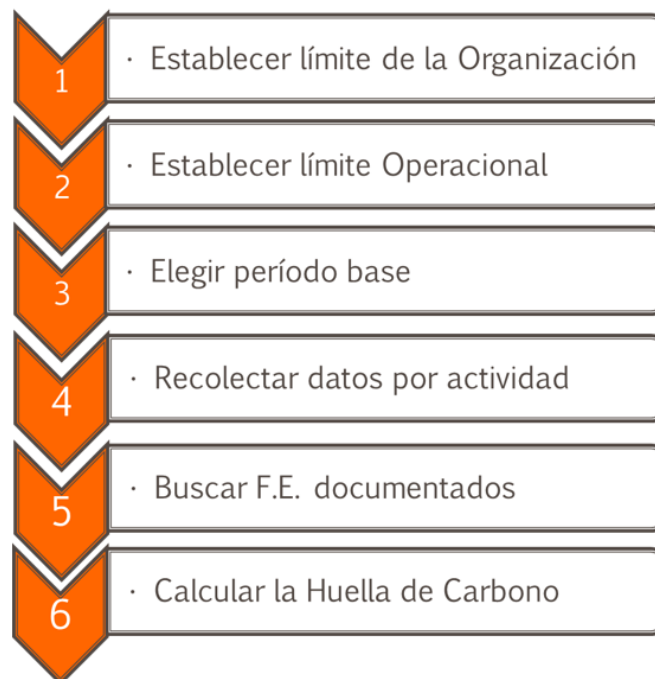


Figura 1-12. Esquema Metodológico GHG Protocol

Fuente: elaboración propia



1.- **Límite de la organización:** las operaciones de las empresas varían tanto en su estructura legal como en su estructura organizacional; incluyen operaciones que son de su propiedad, alianzas, subsidiarias y otras modalidades. Cuando una empresa fija sus límites organizacionales selecciona un enfoque para consolidar sus emisiones de GEI y dicho enfoque debe ser aplicado de forma consistente para determinar las unidades de negocio y operaciones que constituyen a la empresa para fines de contabilidad y reporte de GEI (GHG Protocol, 2007).

Para reportes corporativos el GHG Protocol diferencia dos enfoques distintos orientados a consolidar las emisiones de GEI: el de participación accionaria y los enfoques de control. Hay que tomar en cuenta que, si la empresa que reporta sus emisiones es propietaria absoluta de todas sus operaciones, su límite organizacional será el mismo, independientemente del enfoque que se utilice.

- Enfoque de participación accionaria

Bajo este enfoque una empresa contabiliza las emisiones de GEI de acuerdo a la proporción que posee en la estructura accionaria. Esta participación refleja directamente un interés económico, el cual representa el alcance de los derechos que una empresa tiene sobre los riesgos y beneficios que se derivan de una operación. Este principio económico, es consistente con los estándares internacionales de reporte financiero, lo que obliga a trabajar en forma conjunta el sistema contable con el legal, con la finalidad de que sea aplicada la participación accionaria apropiada en cada operación de la empresa que tenga compartida (GHG Protocol,2007).

- Enfoque de control

Bajo el enfoque de control una empresa contabiliza la totalidad de sus emisiones de GEI atribuibles a las operaciones sobre las cuales ejerce el control, aunque la empresa sea propietaria de alguna participación de éstas.

El control puede definirse tanto en términos financieros como operacionales. Al utilizar el enfoque de control para contabilizar sus emisiones de GEI las empresas deben decidir cuál criterio de estos dos criterios utilizar.



- Control financiero. Una empresa tiene control financiero sobre una operación si tiene la facultad de dirigir sus políticas financieras y operativas con la finalidad de obtener beneficios económicos de sus actividades.

- Control operacional. Una empresa ejerce control operacional sobre alguna operación si ésta tiene autoridad plena para introducir e implementar sus políticas operativas en la operación.

Bajo este enfoque, la empresa que tiene el control de una operación ya sea de manera directa o a través de una de sus subsidiarias, deberá contabilizar como propio el 100% de las emisiones de la operación (GHG Protocol,2007).

2.- **Límite operacional:** Después de determinar el límite organizacional en términos de las operaciones de las que es propietaria o tiene el control, la empresa debe establecer sus límites operacionales, asociado a la clasificación de sus emisiones directas o indirectas, Alcance 1, Alcance 2 y Alcance 3 en cada nivel de operación.

Alcance 1: Las emisiones directas de GEI son principalmente resultado de los siguientes tipos de actividades llevadas a cabo por la empresa:

- Generación de electricidad, calor o vapor. Estas emisiones resultan de la combustión de combustibles en fuentes fijas: calderas, hornos, turbinas, etc.
- Procesos físicos o químicos. La mayor parte de estas emisiones resultan de la producción de químicos y materiales, como cemento y aluminio. Considera además el procesamiento de residuos.
- Transporte de materiales, productos, residuos y empleados. Estas emisiones resultan de la combustión de combustibles en fuentes móviles que son propiedad o están controladas por la empresa: camiones, trenes, barcos, aviones, autobuses y automóviles.
- Emisiones fugitivas. Estas emisiones resultan de fugas en las juntas, sellos o empaques de los equipos; por ejemplo, emisiones de hidrofluorocarbonos (HFCs) durante el uso de equipo de aire acondicionado y refrigeración; y fugas de metano en el transporte de gas.



Alcance 2: Emisiones indirectas de GEI asociadas a la electricidad

Las empresas reportan como alcance 2 las emisiones de la generación de electricidad adquirida que es consumida en sus operaciones o equipos propios o controlados. Las emisiones de alcance 2 son una categoría especial de emisiones indirectas. Para muchas empresas, la electricidad adquirida representa una de las fuentes más importantes de emisión de GEI, y la oportunidad más significativa de reducir dichas emisiones. Contabilizar las emisiones de alcance 2 permite a las compañías valorar los riesgos y oportunidades asociadas a los cambiantes costos de electricidad y emisiones de GEI.

Alcance 3: Otras emisiones indirectas de GEI

El alcance 3 es opcional, pero entrega la oportunidad de innovar en la administración de las emisiones GEI. Las empresas pueden enfocarse en contabilizar y reportar las actividades que son relevantes a sus negocios y metas, y para las que tienen información confiable. Dado que las empresas deciden de manera unilateral qué categorías reportar, el alcance 3 no sirve de mucho al hacer comparaciones entre empresas.

Algunas actividades del alcance 3, se pueden incluir en el alcance 1 si las fuentes de emisión pertinentes son propiedad o están controladas por la empresa. Para determinar si una actividad está dentro del alcance 1 o 3, la empresa debe referirse al método utilizado para definir sus límites organizacionales (participación accionaria o control). Por ejemplo:

- Extracción y producción de materiales y combustibles adquiridos.
- Actividades relacionadas al transporte
- Transporte de materiales y bienes adquiridos
- Transporte de combustibles adquiridos
- Viajes de negocios de empleados
- Viajes de empleados de ida y vuelta al trabajo
- Transporte de productos vendidos
- Transporte y disposición de residuos generados en la operación



- Actividades relacionadas con la electricidad no incluidas en el alcance 2
- Extracción, producción y transporte de combustibles consumidos en la generación de electricidad (ya sea adquirida o generada por la empresa que reporta).
- Compra de electricidad que es vendida a un consumidor final (reportada por la empresa de servicio público).
- Generación de electricidad que es consumida en un sistema de transmisión y distribución (reportada por el consumidor final).
- Activos arrendados, franquicias y actividades realizadas por terceros.
- Uso de productos y servicios vendidos.
- Disposición de productos vendidos al final de su vida útil

3.- Como paso 3 en esta metodología se debe determinar el año base de cálculo el cual determina el alcance temporal del respectivo reporte.

4.- Como siguiente paso se levantan las respectivas actividades de los alcances 1, 2 y 3 y se recolectan los datos correspondientes al año base determinado.

5.- Los factores de emisión que se utilizan para el cálculo del alcance 1 son aquellos reportados por entidades públicas y privadas, que están dedicados al estudio y reportes globales de las emisiones GEI, tal como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) cuya función consiste en analizar de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente la información científica, técnica y socioeconómica pertinente para entender el cambio climático, sus repercusiones y riesgos futuros, así como las opciones que existen para adaptarse al mismo y atenuar sus efectos. (www.mma.gob.cl)

Por otro lado, el factor de emisión correspondiente al consumo eléctrico, (Alcance 2) se utiliza la reportada por los sistemas de generación eléctrica el cual toma en cuenta la distribución de la matriz energética de cada país o región según sea el alcance general de la actividad que se está calculando.

En Chile el mercado eléctrico, analizado desde la oferta de energía, está compuesto por tres sectores; generación, transmisión y distribución, cuyas actividades hacen posible la disposición de la energía eléctrica en los distintos puntos geográficos.

Estas actividades son desarrolladas por completo por empresas privadas, las que realizan las inversiones necesarias dentro de la normativa específica que rige para cada uno de estos sectores, desarrollándose el sector de generación bajo reglas de libre competencia a diferencia de los otros dos que lo hacen dentro de un esquema regulado, por la característica de monopolio que tienen ambos sectores.

En la Figura 1-13 se presenta la configuración de la matriz eléctrica de Chile para el período comprendido entre 1996 y 2020, el cual toma en cuenta las distintas fuentes de generación eléctrica por año de los sistemas: Interconectado Central (SIC) y el Interconectado del Norte Grande (SING), cuya interconexión hoy conforma el SEN, o Sistema Eléctrico Nacional.

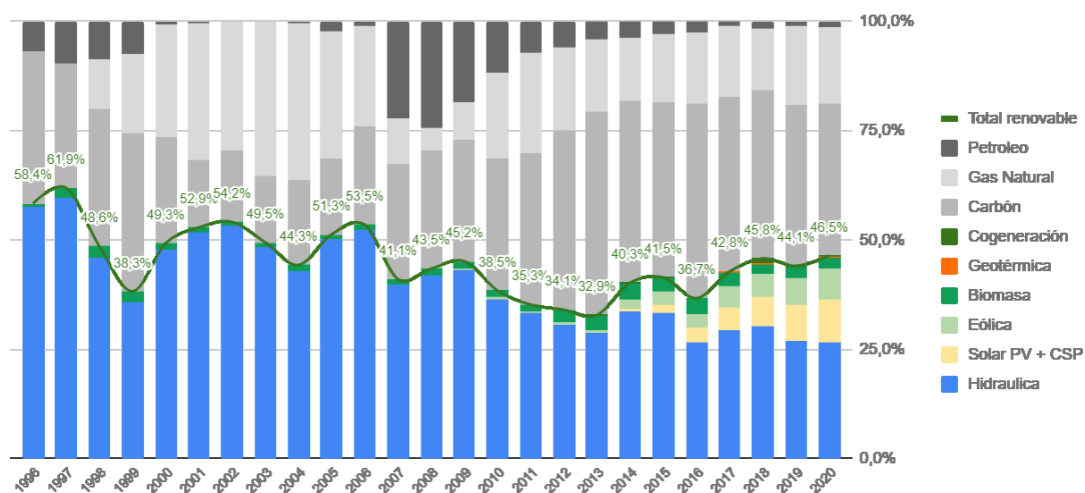


Figura 1-13. Participación relativa por fuente de generación eléctrica (%)

Fuente: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

En la Figura 1-14 se presenta el volumen de energía generada por las distintas fuentes durante el período 1996 y 2020, destacándose el aumento desde el año 2016 en la participación de las energías renovables como la solar y la eólica. Además, para este último período de 4 años, se visualiza la disminución en la generación a partir de hidroeléctricas, plasmando el problema de sequía que sufre la mayoría de las regiones del país.

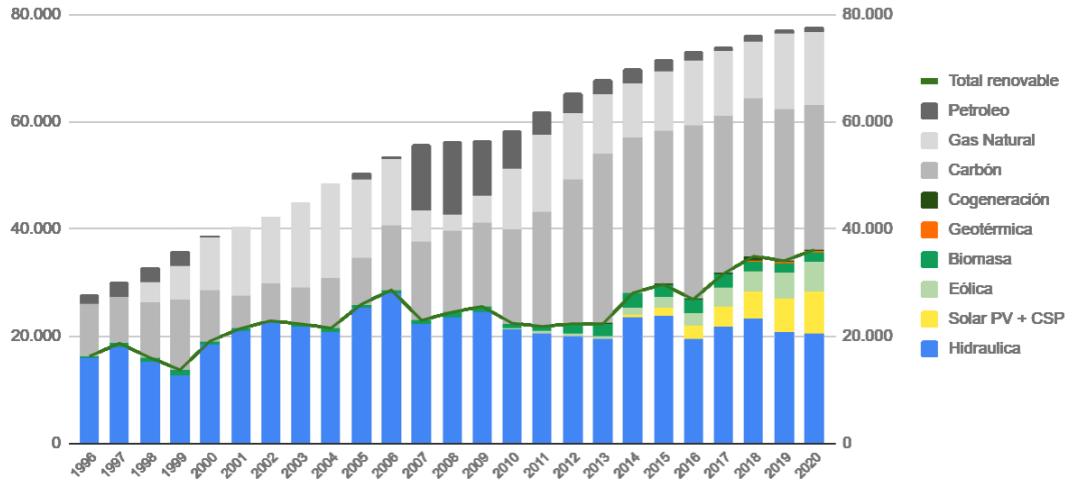


Figura 1-14. Volumen de energía generada por fuente (GWh)

Fuente: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

6.- En esta etapa de la metodología se hacen los cálculos para cada alcance definido según las actividades y factores de emisión con la ecuación presentada en el punto 1.4 anterior.

$$\text{HUELLA DE CARBONO}_{\text{organización}} = \sum (\text{DATO ACTIVIDAD} \times \text{FACTOR DE EMISIÓN})_i$$

Donde i = tipo de alcance (1, 2 y 3)



2. PROBLEMA

Dado los requisitos exigidos por la OCDE a los países socios, con respecto al manejo de los residuos, Chile ha respondido con la introducción del concepto de responsabilidad extendida del productor y la consiguiente promulgación de la Ley 20.920/16 (REP) la cual fomenta el reciclaje y la economía circular, incentivando la creación de nuevas y variadas iniciativas de reciclaje de residuos prioritarios establecidos en el citado cuerpo legal, las cuales son evaluadas técnica y económicamente y además, sustentan su evaluación ambiental, principalmente en la reducción de la cantidad de residuos que son enviados a rellenos sanitarios o la disminución de materias primas vírgenes para la elaboración de nuevos productos.

Sin embargo, se desconoce en general el aporte de estos procesos de reciclaje a la disminución de los impactos que generan al medio ambiente, por ejemplo, en la disminución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Así resulta interesante determinar la Huella de Carbono, usada como una herramienta estandarizada vinculada al impacto ambiental generado por dichas emisiones, en el proceso de reciclaje de un material que forme parte de un residuo prioritario en la Ley REP, como los envases, y compararlo con el impacto que tendría en el medio ambiente la alternativa de disposición final del residuo.

Por lo anterior, este trabajo propone la comparación de las huellas de carbono entre el proceso de reciclaje y la alternativa de disposición final del residuo en un relleno sanitario y el impacto por no reducir materia prima virgen en el proceso producción de tableros de madera de OSB, el cual es la unidad funcional de comparación al tablero producido en el reciclaje de envases Tetra pak®.



3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar la reducción potencial de las emisiones GEI al reciclar envases Tetra pak[®] como tableros de tipo aglomerado para la construcción.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar la Huella de Carbono de una planta de reciclaje de envases Tetra pak[®] en tableros de tipo aglomerado para la construcción.
- Estimar la Huella de Carbono del proceso de descomposición de envases Tetra pak[®] en relleno sanitario y del proceso de elaboración de paneles de madera aglomerada para construcción (tablero OSB).
- Identificar los puntos potenciales de mejora en el proceso de reciclaje de envases Tetra pak[®] donde se pueda reducir las emisiones GEI.



4. METODOLOGÍA

4.1. Huella de carbono

La huella de carbono además de utilizarse como herramienta para estimar los GEI de alguna actividad, permite definir y planificar estrategias que lleven a una reducción efectiva de estos gases como consecuencia de un mejor conocimiento de los puntos críticos.

Sin embargo, uno de los principales obstáculos en la implementación de la HdC como parámetro de medición del nivel de contaminación de un proceso productivo, de un producto o de un servicio, es la incertidumbre respecto a su cálculo y la discusión sobre los factores que deben considerarse en su determinación. En base a esto se han desarrollado diversas metodologías de cálculo entregando normas y guías internacionales. Todas estas herramientas tienen como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los informes de emisión de gases de efecto invernadero.

En base a lo anterior, se ha decidido utilizar para este trabajo el Green House Protocol (GHG protocol) como metodología para el cálculo de la huella de carbono, ya que es la herramienta más usada y estandarizada sobre la HdC.

4.2. Huella de carbono de la Planta de Reciclaje

La Planta de reciclaje de envases de Tetra pak[®], a la cual se determinará la huella de carbono, está a nivel de evaluación de prefactibilidad y estará ubicada en Viña del Mar, con una capacidad de reciclaje proyectada para el año 2020 de 253 t/año de envases para producir 6.480 tableros para la construcción (González, F. 2020).

Como se mencionó anteriormente, se utilizará para el cálculo de la HdC la metodología del GHG protocol que considera metodológicamente los pasos presentados en el punto 1.4.1 y que a continuación se detallan para el cálculo de la planta.

1.- Límite de la organización: la actividad industrial de reciclaje a la cual se determinará la HdC ha sido evaluada como una organización sin sucursales u otras instalaciones que dependan financieramente de ella, por esta razón, se usará el enfoque corporativo limitando la organización al control operacional según lo explicado anteriormente en base a la guía de GHG protocol, 2007.



2.- Límite operacional: Determinado el límite organizacional en términos de las operaciones de la planta se establecen sus límites operacionales, asociados a la clasificación de sus emisiones directas o indirectas, Alcance 1 y Alcance 2 para cada actividad de operación dejando fuera del cálculo el Alcance 3 por las razones expuestas en el punto 1.4.1. las actividades consideradas dentro del alcance operacional.

3.- Para el paso 3 se determina el 2019 como año base de la estimación de la HdC, para tener un cálculo más limpio sin las externalidades provocadas por la pandemia mundial.

4.- El levantamiento y supuestos sobre las actividades de la planta de reciclaje correspondientes a los alcances 1 y 2 se presentan en detalle en el capítulo de resultados. Estas actividades serán identificadas a partir de la evaluación de la planta efectuada por el estudio “Prefactibilidad Técnico-Económica de una Planta de Reciclaje de Tetra pack® Generado en el Gran Valparaíso” elaborado por la alumna Francisca González Fuenzalida para la obtención del título de Ingeniero Ambiental (2021).

Dado lo anterior, se determinarán los Alcance 1 y 2, identificando los combustibles fósiles ocupados en el primer alcance y sus consumos, como también aquel referido a la energía eléctrica para la búsqueda de los respectivos factores de emisión expresados en CO₂eq.

5.- Los factores de emisión que se utilizarán para el cálculo del alcance 1 serán aquellos reportados por el Programa Huella Chile, iniciativa del Ministerio del Medio Ambiente cuyo objetivo es cuantificar, reportar y gestionar las emisiones de GEI en los ámbitos público y privado. Este programa además, pone a disposición de las organizaciones una herramienta de cálculo en línea y gratuita que facilita la cuantificación y reporte de sus emisiones de GEI corporativas, insertas en el sistema de ventanilla única del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes de Chile (RETC).

Los factores de emisión (FE) entregados por este Programa están basados en informes de estudios especializados como el de Estay *et al*, 2017, el cual calcula los FE mediante el análisis de ciclo de vida (ACV), según la ISO 14040: 2006 y ISO 14044: 2006. Esta metodología se basa en la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema o producto a través de su ciclo de vida. Esto se realizó mediante el software SimaPro, el cual permite modelar estos subsistemas,

materias primas e insumos. Dicho programa incluye la base de datos Ecoinvent v3, que consta de diferentes fuentes, principalmente europeas.

Por otro lado, el factor de emisión correspondiente a la generación de la matriz eléctrica es reportada estadísticamente en forma anual por Energía Abierta, iniciativa de la Comisión Nacional de Energía a través de su página web (<https://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>). En la Figura 4-1 se presenta el gráfico que reporta Energía Abierta con los factores de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).



Figura 4-1. Factores de emisión del SEN período 2018-2021 (CO2eq/MWh)

Fuente: www.energiaabierta.cl

6.- Para el cálculo de la HdC de la planta de reciclaje de envases Tetra pak® se utilizará en forma general la ecuación presentada en el punto 1.4.1 anterior, generada a partir de las siguientes ecuaciones por alcance:

$$\text{HdC}_{\text{alcance } i} = \sum \text{actividad } i \times \text{factor de emisión } i$$

$$\text{Huella de carbono Planta Reciclaje} = \text{HdC}_{\text{Alcance 1}} + \text{HdC}_{\text{Alcance 2}}$$

Cabe hacer notar que en esta instancia se identificarán y analizarán dentro de las actividades operacionales de la planta aquellas con mayor huella de carbono, a las cuales se propondrán alternativas de mejora para reducir las emisiones GEI y así cumplir el tercer objetivo específico de este trabajo.

4.3. Huella de Carbono Relleno Sanitario

En virtud que la planta de reciclaje estará ubicada en la comuna de Viña del Mar, corresponde la disposición de los residuos en el relleno sanitario El Molle ubicado en el sector Quebrada Verde, camino La Pólvora en Valparaíso.

La metodología a utilizar para este caso es la misma que se usa para la planta (GHG Protocol) para efectos de comparación de los resultados, por tanto, se tomará en cuenta sólo los alcances 1 y 2.

Los cálculos se efectuarán basados en las bases de datos entregadas por Veolia que es la actual empresa concesionaria del relleno sanitario El Molle, sobre residuos recibidos, producción de biogás, porcentaje capturado y generación de energía eléctrica. En la Figura 4-2 se presenta la disposición de residuos y la generación de energía eléctrica de El Molle. Cabe señalar en relación con la citada figura, que se reportan valores muy bajos en diciembre del 2020 por detención de planta que duró hasta mayo del 2021.

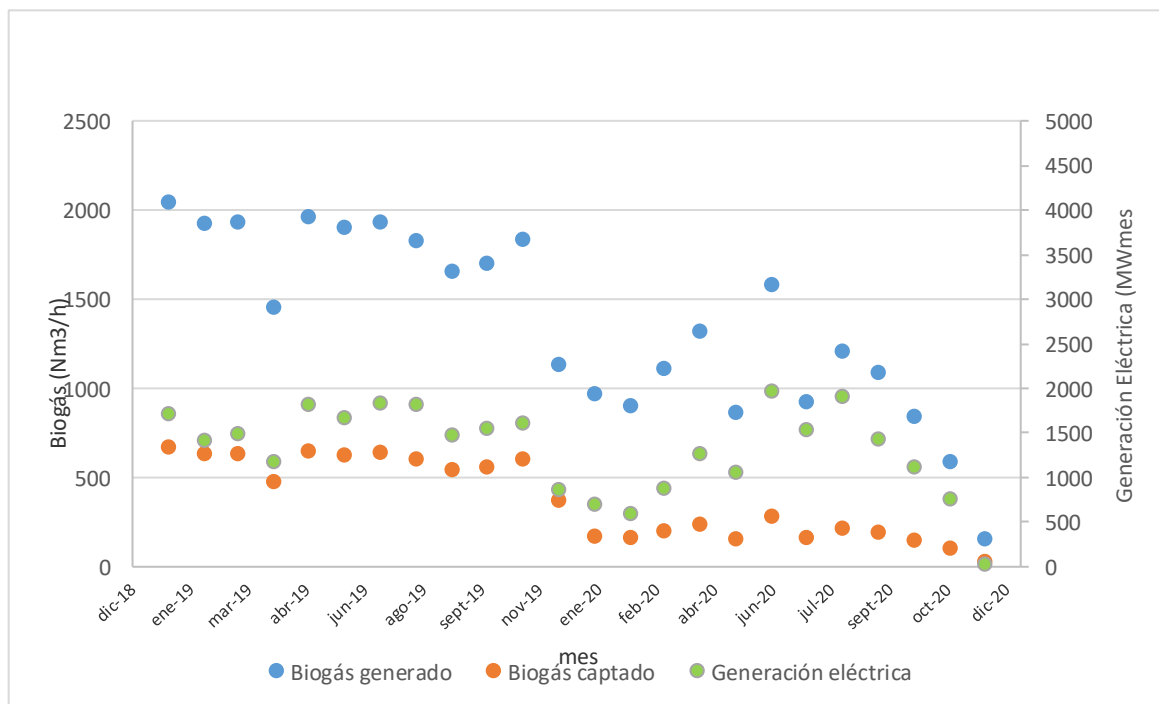


Figura 4-2. Captación Biogás y Generación Eléctrica en relleno sanitario El Molle

Fuente: Elaboración propia (datos Veolia)



A continuación, se presentan las ecuaciones de estimación de la HdC para este caso.

- **Alcance 1**

1. Transporte desde puntos de generación hasta el relleno sanitario de la fracción de envases Tetra pak[®] por comuna del Gran Valparaíso que no se reciclarían en la planta (227 t para el año 2019).

$$\text{HdC} = \text{consumo de combustible} \times \text{FE}$$

2. Generación de CO₂ y CH₄ (biogas) en celda de relleno sanitario

- a) Porcentaje de Biogas no captado implica que el CO₂ y el CH₄ de esta fracción pasan directo a la atmosfera.

$$\text{HdC} = t \text{ CO}_2 + t \text{ CO}_{2\text{eq}} \text{ del metano}$$

- b) Porcentaje de Biogas captado: implica que el CO₂ pasa a la atmosfera y el CH₄ se quema para producir electricidad

$$\text{HdC} = t \text{ CO}_2 + t \text{ CO}_2 \text{ producido por la combustión de metano}$$

- **Alcance 2**

El relleno sanitario El Molle genera energía eléctrica por tanto la huella de carbono es negativa ya que se evita la contaminación por consumir energía de la matriz.

$$\text{HdC} = \text{generación eléctrica} \times \text{FE}$$

La ecuación general para el cálculo de la HdC por disposición de los envases está dada por:

$$\text{HdC}_{\text{disposición}} = \text{HdC}_{\text{Transporte}} + \text{HdC}_{\text{Descomposición (Biogas)}} - \text{HdC}_{\text{generación}}$$



4.4. Huella de Carbono Tableros de Madera

Para la estimación de la Huella de Carbono de la producción de tableros de madera se tomará en cuenta sólo un tipo de estos productos, cuyo resultado pueda ser comparado con el tablero elaborado a partir de envases de Tetra pak[®]. Para este caso se utilizará específicamente el tablero OSB que se asemeja en sus características técnicas de compresión y flexión como tablero de construcción estructural al tablero reciclado (Quintero *et al*, 2017).

Los datos de comparación sobre los resultados de la huella de carbono se efectuarán en base a material bibliográfico, teniendo en cuenta que las metodologías utilizadas sean iguales u homologables según los alcances de los datos que se tienen de la planta de reciclaje y con los cuales se calcula la huella de carbono.

4.5. Comparación de resultados

Elaborado los respectivos cálculos de las huellas de carbono se dará respuesta al problema planteado por comparación directa de los resultados según lo siguiente:

- HdC (t CO_{2eq}) Planta Reciclaje / HdC (t CO_{2eq}) Disposición de envases en relleno sanitario
- HdC (t CO_{2eq} /unidad Funcional) Planta Reciclaje / HdC (t CO_{2eq} /unidad Funcional) Producción tablero OSB

5. RESULTADOS

5.1. Huella de Carbono Planta de Reciclaje

La planta de reciclaje de Tetra pak[®] evaluada estará ubicada en el sector de Reñaca Alto Norte en la comuna de Viña del Mar, la cual tendrá capacidad para reciclar el 5% del Tetra pak[®] generado como residuo proveniente de las diferentes comunas que integran el Gran Valparaíso. Este porcentaje equivale a 253 toneladas anuales de materia prima que generará una producción promedio de 6.480 unidades de tableros anuales, considerando un horizonte de evaluación de 15 años.

Los tableros producidos serán del tipo aglomerado de dimensiones 1,22 m de ancho y 2,44 m de largo con un espesor de 9 mm, cuyas características los hacen aplicables a la industria de la construcción y mobiliario. En la Tabla 5-1 se resumen los datos generales de la planta.

Tabla 5-1. Datos generales y superficies de la planta de reciclaje

Planta de Reciclaje	Valor	Unidad
Capacidad de reciclaje*	227	t/año
Producción de tableros*	5.814	Tableros/año
Dimensiones del tablero	122x244x0,9	cm ²
Nº de trabajadores	12	personas
Días laborales al año	240	días
Superficie de la planta	411	m ²
Superficie construida	380	m ²
• Área producción	240	m ²
• Oficinas (2)	21	m ²
• Recepción	9	m ²
• Baños y vestidores	15	m ²
• Comedor	15	m ²
• Patio y estacionamiento	80	m ²

* Valores para año 2019

El proceso de reciclaje utilizado en esta planta es por compresión térmica. El envase es triturado y prensado a altas temperaturas formando una placa resistente de aglomerado, con múltiples funciones útiles para la construcción de viviendas (González, 2021).

Las superficies y distribución de espacios administrativos y operacionales consideradas en el estudio están en base al layout que se presenta en la Figura 5-1.

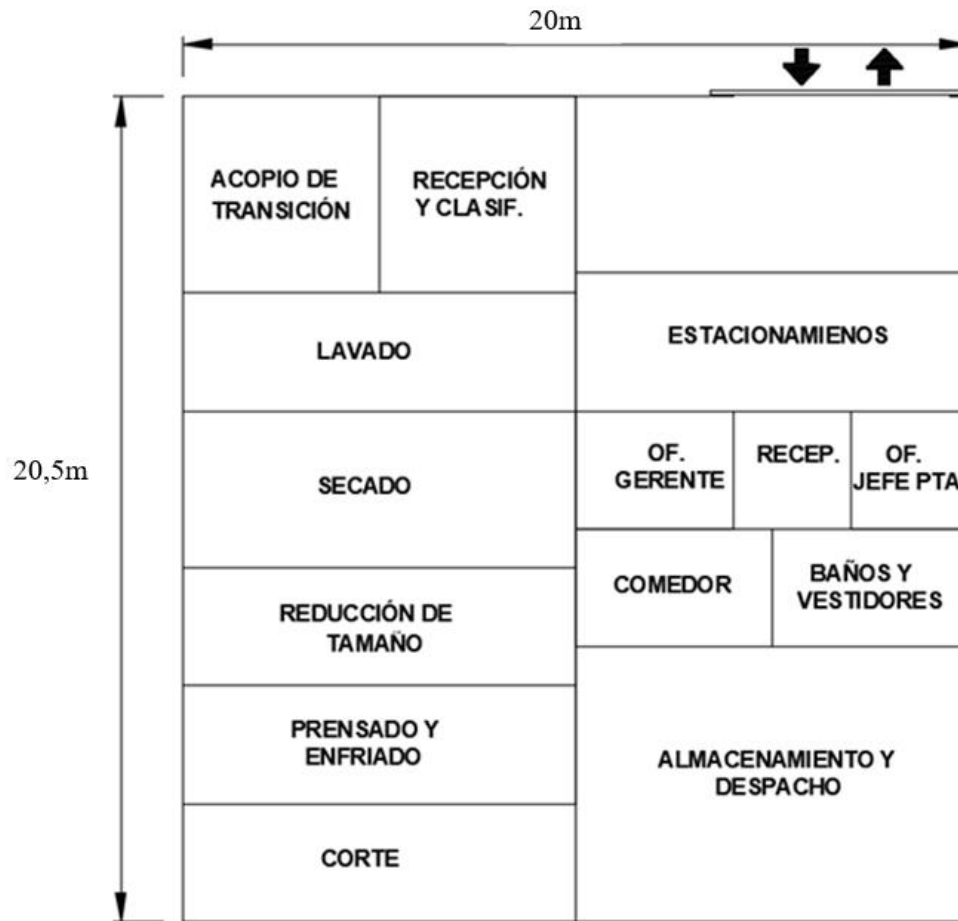


Figura 5-1. Layout planta de reciclaje

Fuente: elaboración propia

Cabe mencionar las siguientes consideraciones con respecto a las dependencias de la planta:

- Oficina Gerente general con baño
- Oficina Jefe de Planta
- Recepción donde trabaja una secretaria



- 1 baño de mujeres con ducha
- 1 baño/vestidor de operadores
- Zona de producción considera las siguientes áreas:
 - Recepción envases (materia prima) y clasificación
 - Acopio transitorio
 - Lavado
 - Secado
 - Reducción de tamaño
 - Prensado y enfriado
 - Corte
 - Almacenamiento y despacho

Para el cálculo del alcance 1 de la huella de carbono se identifican en la Tabla 5-2 las siguientes actividades, donde se presentan además, los antecedentes sobre tipo de vehículos, combustible y consideraciones de consumos.

Con respecto al transporte de los ejecutivos, estos se consideran alcance 1 en el cálculo de la HdC ya que a pesar de que se movilizan en sus autos el control financiero del transporte es de la planta.

Para el cálculo del transporte del Gerente General se considera que habita en la comuna de Concón y posee una auto marca Peugeot modelo 4008 el cual tiene un consumo promedio de 12,3 km/l (www.hub.peugeot.cl) con un trayecto por día de 70 km considerando el traslado desde su casa y la gestión comercial de la empresa.

Por otro lado, el Jefe de Planta vive en Valparaíso y tiene un auto marca Toyota modelo Yaris el cual tiene un consumo promedio de 17,1 km/l (www.toyota.cl) y se considera un trayecto desde su casa ida y vuelta en forma diaria.

En atención a las consideraciones descritas para el Gerente General y el Jefe de Planta se otorgan los bonos presentados en la Tabla 5-2 de \$120.000 y \$50.000 respectivamente.



Tabla 5-2. Alcance 1

Actividad	Combustible	Antecedentes
General		
Grupo Electrónico	Diesel*	Uso de emergencia 0 hrs. Consumo por pruebas 10 l/h por 4 horas al mes
Ducha del personal	LPG**	Ducha diaria de 8 minutos para 6 operadores
Grúa Horquilla	LPG	5 cilindros/mes de 11 kg/LPG
Transporte		
Traslado Ejecutivos	Bencina 95 octanos***	Bono \$120.000/mes para GG Bono \$50.000/mes para Jefe Planta
Traslado resto de personal	Bencina 95 octanos	Minivan Peugeot Expet. Rendimiento 16,7 km/l. 1 viaje ida y vuelta al día por circuito de 53,1**** km Valparaíso/Viña/Rotonda Concón/Valparaíso.
Viajes por compras y trámites	Bencina 95 octanos	Minivan Peugeot Expet. Rendimiento 16,7 km/l. 2 viajes a la semana en circuito de 40 Km
Retiro envases y distribución de producto terminado	Diesel	Camión Hyundai modelo Mighty HD 78. Rendimiento 10,8 km/l. Retiro todos los días y distribución cada 15 días (González, 2021)

* Valor del Diesel \$ 739/l con fecha 25/10/21 <http://www.bencinaenlinea.cl/web2/>

** Densidad LPG 0,55 kg/l

*** Valor de la gasolina 95 octanos \$ 993/l con fecha 21/10/21 <http://www.bencinaenlinea.cl/web2/>

**** Valor de distancias reportados en <https://www.google.com/search?q=DISTANCIA>

Por otra parte, el servicio de vigilancia es entregado por una empresa externa la cual paga el traslado de su personal incluido el nochero, por ello no se considera en el alcance 1 de la HdC de la planta.

Se presentan en la Tabla 5-3 los factores de emisión correspondientes al año 2019 para los combustibles utilizados en las actividades descritas en la tabla anterior.



Tabla 5-3. Factores de emisión combustibles

Combustible	Factor de Emisión
LPG	1,582 kgCO _{2eq} /l
Bencina	2,254 kgCO _{2eq} /l
Diesel	2,699 kgCO _{2eq} /l

Fuente: Huella Chile, 2019

Cabe señalar que en la base de datos de los factores de emisión no se entrega valores para los distintos tipos de bencinas según su octanaje, por tanto, se utiliza el dato del ítem “gasolina”. Se presenta en la Tabla 5-4 los resultados del cálculo de la huella de carbono para el alcance 1.

Tabla 5-4. Cálculo Huella de carbono alcance 1

Actividad	Consumo (l)	Combustible (l)	FE (kgCO _{2eq} /l)	HdC (kgCO _{2eq})
General				
Grupo Electrónico	480	Diesel	2,699	1.295,5
Ducha del personal	414,7	LPG	1,582	656,1
Grúa Horquilla	1.201,2	LPG	1,582	1900,3
Transporte				
Traslado Ejecutivos	2.326,1	Gasolina	2,254	5.243,1
Traslado resto de personal	763,1	Gasolina	2,254	2.059,6
Viajes por compras y trámites	229,9	Gasolina	2,254	850,5
Transporte envases y Distribución de	1.993*	Diesel	2,699	5.379,1
TOTAL				17.384,3

* Valor entregado por referencia bibliográfica (González, 2021)



En la Tabla 5-5 se presentan las actividades comprendidas en el Alcance 2 del cálculo de la huella de carbono.

Tabla 5-5. Alcance 2

Actividad	Consumo (kWh/año)	Antecedentes
Consumo eléctrico oficinas		
Computadores	1.344	2 computadores HP 206 G2. Consumo 350 W
Iluminación	115	2 luminarias por cada oficina + 1 en la recepción con 2 tubos LED c/u de 20 W. 4 h promedio encendidas
Calefacción	2.880	1 calefactor (2000 W) por oficina uso solo 3 meses al año. No hay aire acondicionado
Impresora	518	Una central, HP multifuncional
Cargas celulares	18	Carga de batería completa 1 h, 5 V y 3 Ah
Consumo eléctrico baños/vestidor		
Iluminación baños	51	1 luminaria en cada baño (2) con 2 tubos fluorescentes LED c/u de 20 W
Iluminación vestidor	48	1 luminaria en cada baño (2) con 2 tubos fluorescentes LED c/u de 20 W
Consumo eléctrico comedor		
Microondas	180	1,5 kW c/u Uso promedio diario 30 minutos



Tabla 5-5 Continuación

Iluminación	58	3 luminarias con 2 tubos fluorescentes LED c/u de 20 W
Refrigerador	356	Refrigerador MABE Eficiencia B (215 l) 29,68 kWh/mes
Hervidor	115	1.600 W. Uso promedio 0,3 hora al día
Consumo eléctrico iluminación exterior	3.326	Entrada y estacionamientos. 4 lámparas LED de 110 W c/u.

Consumo eléctrico galpón

Iluminación	1.536	17 lámparas LED de 100 W por 4 h al día
Lavadora*	763	
Reductora de tamaño*	13.320	
Prensa*	4.688	
Corte*	864	

* Equipos evaluados para el proceso de reciclaje obtenidos de la referencia bibliográfica (González, 2021)

En la Tabla 5-6 se presentan algunas consideraciones para los cálculos de iluminación, uso de equipos de impresión y el comedor.



Tabla 5-6. Consideraciones de uso de los equipos

Actividad	Consideraciones
Cargar celulares	Una carga completa por el 40% del personal.
Impresora	Uso diario de 8 h
Baños	1 baño de mujeres + 1 baño de hombre oficina GG. Se estima uso de 4 veces por persona por 0,13 h al día
Vestidor	1 vestidor con baño para hombres. Se estima uso de 1 h en la mañana y 1,5 h a la salida
Iluminación del comedor	Uso de 1 h por dos turnos
Refrigerador	Uso todo el año
Hervidor	Uso de 3 minutos en hervir por persona/3 veces al día /2 personas
Iluminación exterior	4 luminarias encendidas 1h en la mañana/3 h en la tarde y 1 luminaria en la noche (11 h)

El factor de emisión promedio del sistema eléctrico nacional correspondiente al año 2019 es 0,4056 tCO_{2eq}/MWh según datos de la iniciativa Energía Abierta del Ministerio de Energía.

En la tabla 5-7 se presentan los resultados del cálculo de la huella de carbono para el alcance 2.



Tabla 5-7. Cálculo Huella de carbono alcance 2

Actividad	Consumo (kWh/año)	FE (kgCO ₂ eq/kWh)	HdC (kg CO ₂ eq)
Consumo eléctrico oficinas			
Computadores	1.344		545,1
Iluminación	115		46,7
Calefacción	2.880		1.168,1
Impresora	518		210,3
Carga de celulares	18		7,3
Consumo eléctrico baños/vestidor			
Baños	51		20,8
Vestidor	48		19,5
Consumo eléctrico comedor			
Microondas	180		73,0
Iluminación	58		23,4
Refrigerador	356		144,5
Hervidor	115		46,7
Consumo eléctrico iluminación exterior	3.326	0,4056	1.349,2
Consumo eléctrico galpón			
Iluminación	1.536		623,0
Lavadora	763		309,5
Reductora de tamaño	13.320		5.402,6
Prensa	4.688		1.901,5
Corte	864		350,4
TOTAL			12.241,5

Teniendo en cuenta todas las actividades de la planta y las consideraciones de uso y consumo de los diferentes equipos utilizados se determina la huella de carbono de la planta de reciclaje para el año 2019 según sigue:

$$\text{HdC}_{\text{planta reciclaje}} = 17.384,3 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} + 12.241,5 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$$

$$\text{HdC}_{\text{planta reciclaje}} = \mathbf{29,6 \text{ t CO}_{2\text{eq}}}$$

5.2. Huella de carbono disposición en Relleno Sanitario El Molle

Para el cálculo del alcance 1 en el lugar de disposición de los envases de Tetra pak[®], se debe determinar el transporte de residuos urbanos domésticos recolectados desde las comunas del Gran Valparaíso, teniendo en cuenta que a la planta de reciclaje llegaría el 5% de los envases Tetra pak[®] generados por estas comunas y que la fracción de dichos envases en los residuos recolectados es de 1,25% (González, 2021).

En la Tabla 5-8 se presentan los resultados de la estimación del número de viajes de los camiones recolectores municipales por comuna.

Tabla 5-8. Estimación de viajes por comuna que aportan los envases Tetra pak[®] a disposición

Comunas	RSD/Comuna (t)	Envases (t)	Recepción envases en Planta (t)	RSD equivalente** (t)	Viajes por comuna*
Valparaíso	103.047	1.283	64	5152	603
Viña del Mar	127.840	1.592	80	6392	748
Concón	17.296	215	11	865	101
Quilpué	54.768	682	34	2738	320
Villa Alemana	61.308	763	38	3065	359
TOTALES	364.259	4.535	227	18213	

* Sólo considera el viaje de ida al relleno

** Capacidad del camión recolector 8,55 t

Densidad basura compactada en camión 0,450 t/m³

Fuente: Elaboración propia con datos de RSU recibidos por comuna en el año 2019 (El Molle, Veolia)

Como se mencionó en el capítulo de introducción, la comuna de Villa Alemana actualmente dispone sus residuos urbanos en el relleno sanitario San Pedro ubicado en la provincia de Quillota. Sin embargo, se considerará para el cálculo de la HdC que la fracción de Tetra pak® generado irá a disposición al relleno El Molle ya que según información de este relleno Villa Alemana dispuso parte de sus residuos durante el año 2019. En la Figura 5-2 se presentan las toneladas de residuos dispuestos en El Molle por cada Municipalidad que compone el Gran Valparaíso.

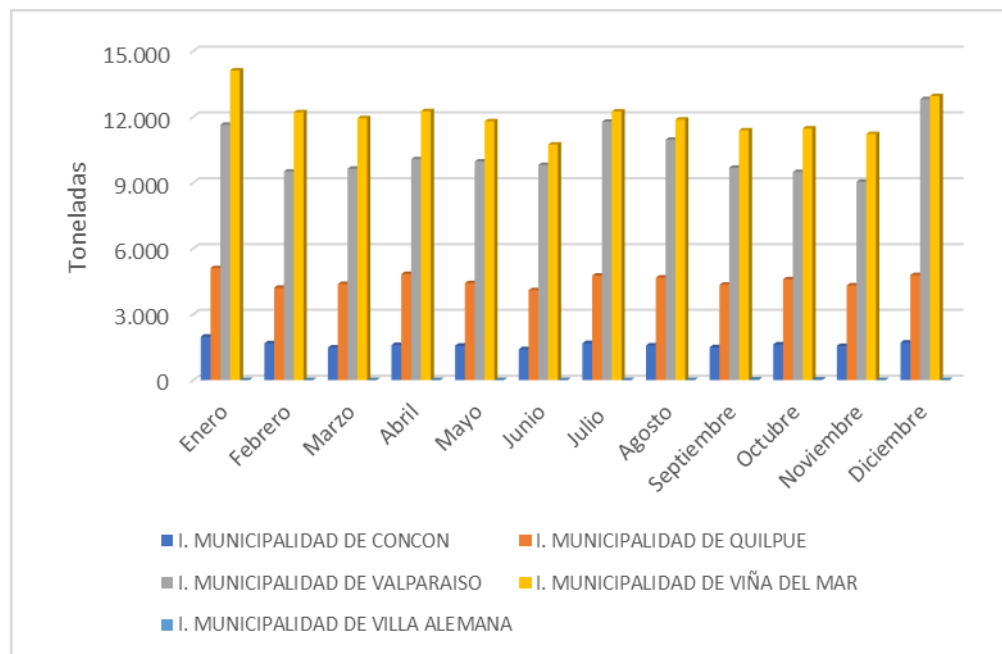


Figura 5-2. Toneladas ingresadas al relleno El Molle desde el Gran Valparaíso (2019)

Fuente: elaboración propia (valores Veolia)

La huella de carbono asociada al transporte de los residuos a vertedero se presenta en la Tabla 5-9.



Tabla 5-9. Alcance 1 por transporte de RSD a relleno sanitario

Comunas	Distancia (km)	Consumo* promedio camión recolector (l/km)	Consumo Diesel (m ³)	FE Diesel (kgCO _{2eq} /m ³)	HdC (kgCO _{2eq})
Valparaíso	16,5		3,3		8.856
Viña del Mar	23,3		5,7		15.515
Concón	34,2	0,33	1,1	2.699	3.081
Quilpué	27		2,9		7.702
Villa Alemana	32,2		3,8		10.282
TOTAL					45.436,3
					45,4 tCO_{2eq}

* Se considera camión recolector marca Volkswagen Constellation que se ocupa en la comuna de Valparaíso
Consumo promedio entregado por vendedor de concesionaria Volkswagen

Para el cálculo del HdC hay que tomar en cuenta que este tipo de envase tiene una composición del 75% de papel y cartón (Tetra pak[®], 2020), por tanto, la materia orgánica degradada en el relleno sanitario, la cual producirá parte del biogás con GEI (metano y CO₂) son 170 t/año traducidas como celulosa.

El cartón procesado con algún revestimiento como los envases Tetra pak[®] se demoran cerca de 5 años en su descomposición (santamartasostenible, 2021), y dado que el relleno sanitario El Molle se estima que, por sus años de operación, se encuentra en estado estacionario, se considera que independiente de la proporción del tipo de residuos, éste generará biogás en la misma proporción que la composición general.

En la Figura 5-3 se presentan las toneladas históricas que ha recibido el relleno sanitario El Molle desde su inicio.

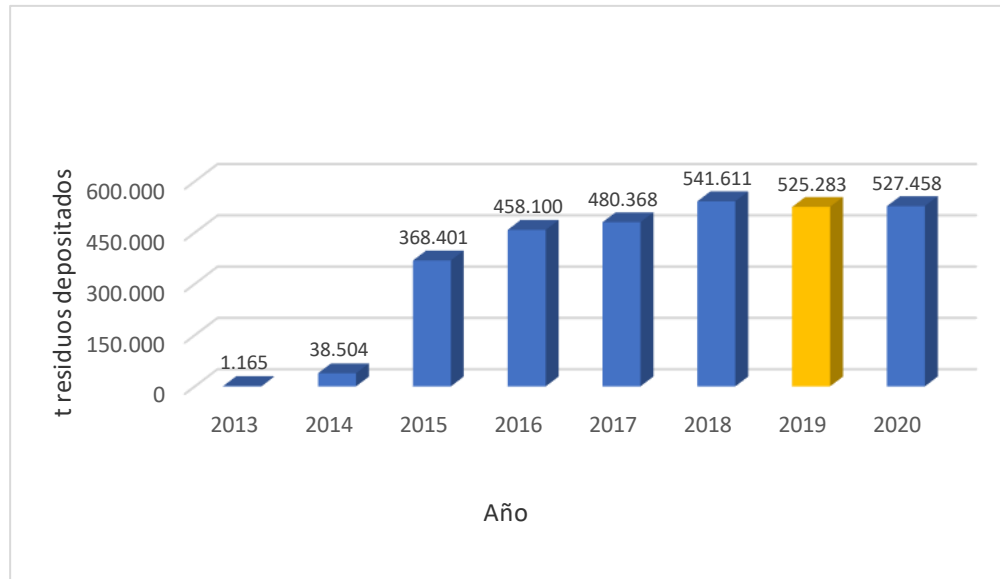


Figura 5-3. Total de residuos ingresados al relleno El Molle (2013-2020)

Fuente: elaboración propia (valores Veolia)

La empresa Veolia, concesionaria del relleno sanitario reporta una generación de metano (CH_4) de 10.491 t en el año 2019 lo que determina una generación unitaria de metano de 0,0043 t de CH_4/t Residuo (RSD), teniendo en cuenta la totalidad de residuos ingresados a la celda del relleno sanitario desde su inicio y que además, ha sido acumulativo en cantidad y por consiguiente en metano generado.

Por otro lado, la empresa concesionaria efectúa mediciones sólo del metano y el oxígeno en la corriente de biogás, por tanto, no se tiene valores reales medidos de la composición de CO_2 . Incluso para el año 2019, la empresa Veolia reporta sólo metano que corresponde a un porcentaje del 30,7% en el biogás producido. Además, esta empresa reporta para ese mismo año un porcentaje de captura de metano del 33%.

Dado que no se dispone de la medición de CO_2 , se hará la estimación de la generación de este componente en el biogás según la composición media recopilada en bibliografía, por lo cual se tomará una proporción de 50% metano y 50% dióxido de carbono para efectuar los cálculos de la huella de carbono (EPA, 2020).

En la Figura 5-4 se muestra la generación de metano para el año 2019 en comparación al flujo de biogás medido.

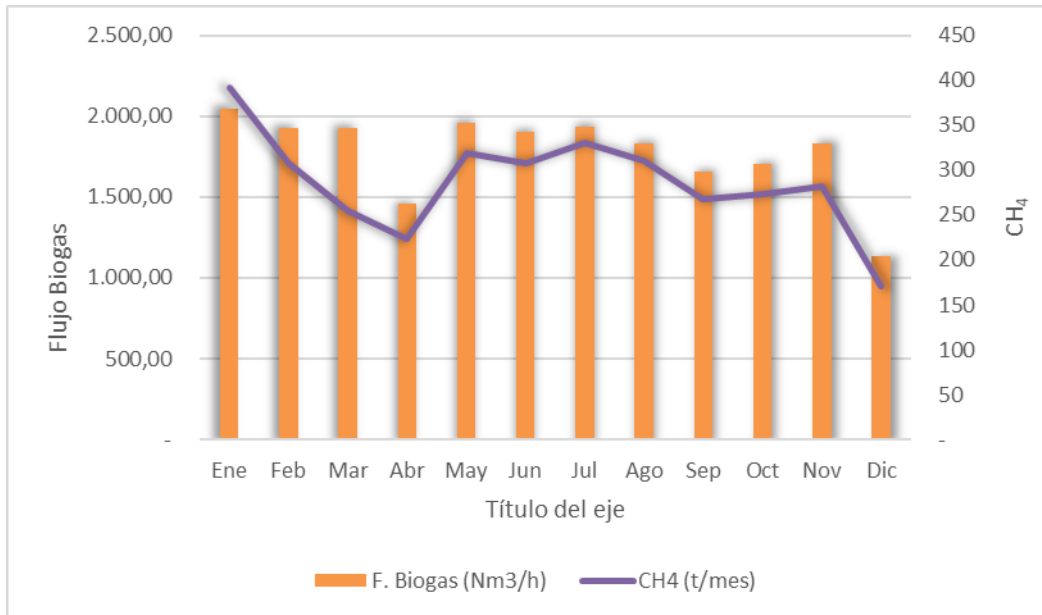


Figura 5-4. Metano producido por relleno sanitario El Molle

Fuente: elaboración propia (valores Veolia)

El relleno sanitario El Molle genera electricidad a partir de la fracción de biogás capturada, generando para el 2019, 1.535 MWh, por tanto, se estima dentro del alcance 1 de la HdC la combustión completa de metano capturado.

Dado los valores entregados por Veolia y las consideraciones mencionadas se presenta en la Tabla 5-10 la HdC por emisión de biogás generada a partir de la fracción de envases.

Tabla 5-10. Alcance 1 por emisión de biogás

Biogás	Cantidad t/año	PCG CH ₄	HdC t CO _{2eq}
Metano total	0,975		
Metano no capturado (atmósfera)	0,653	25*	16,3
Metano capturado (combustión)	0,322		
Producción CO ₂ por combustión**			0,885
CO ₂ total			0,975***
TOTAL			18,16

* Potencial de calentamiento global del metano (IPPC, 2018)

** Se asume combustión completa

***Composición 50% en comparación al metano

Considerando los resultados del transporte y la emisión de biogás por descomposición de los envases, el alcance 1 se determina por:

$$\text{HdC}_{\text{alcance1}} = 45,4 \text{ tCO}_{2\text{eq}} + 18,16 \text{ tCO}_{2\text{eq}}$$

$$\text{HdC}_{\text{alcance1}} = 63,56 \text{ tCO}_{2\text{eq}}$$

Por otra parte, el alcance 2 para el relleno sanitario está dado por la generación de energía eléctrica que como se explicó en capítulo anterior, se considera una huella de carbono negativa considerando que se evita el impacto o la huella asociada a la generación de electricidad de la red por no consumirla. Por esta razón el alcance 2 viene dado por la generación de electricidad asociada a la fracción considerada de envases, según se muestra en la Tabla 5-11.



Tabla 5-11. Alcance 2 por generación de electricidad

Generación	Energía MWh/año	FE t CO ₂ eq/MWh	HdC t CO ₂ eq
Generación total	1.535		
Generación por fracción de envases	0,1435	0,4056	0,058

Dado los cálculos de los alcances 1 y 2, la huella de carbono por la disposición de envases de Tetra pak® en el relleno sanitario El Molle es la siguiente:

$$\text{HdC}_{\text{disposición}} = 63,56 \text{ tCO}_{2\text{eq}} - 0,058 \text{ tCO}_{2\text{eq}}$$

$$\text{HdC}_{\text{disposición}} = \mathbf{63,5 \text{ tCO}_{2\text{eq}}}$$

5.3. Huella de Carbono Tableros OSB

Para realizar la comparación entre la de huella de carbono de la producción del tablero reciclado a partir de envases Tetra pak® con la emisión de la producción de tableros de virutas orientadas (OSB) se basará en la información entregada por el artículo “Assessment of Carbon Footprinting in the Wood Industry” (Evaluación de la huella de carbono en la industria de la madera) realizada por Andreja Kutnar y Callum Hill, publicado en el año 2014 en la revista “Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors”, Volumen 2.

Para poder efectuar la comparación de las huellas de carbono entre el tablero OSB y el reciclado, el cálculo efectuado para este último debe corregirse tomando en cuenta la unidad funcional de 1 m³ de tablero y el transporte por distribución de los tableros al mercado, que en el caso del reciclado está considerado en el cálculo.

Cabe señalar que ambos tableros están elaborados con las mismas dimensiones de 122 x 244 x 0,9 cm² ya que son medidas estándar.

La huella de carbono total para el tablero OSB fue estimada en 310 kg CO_{2eq} (Kutnar J., Hill, C., 2014) para la unidad funcional determinada. En base a este valor obtenido de la publicación referenciada se presentan las huellas de carbono de ambos tableros en la Tabla 5-12.

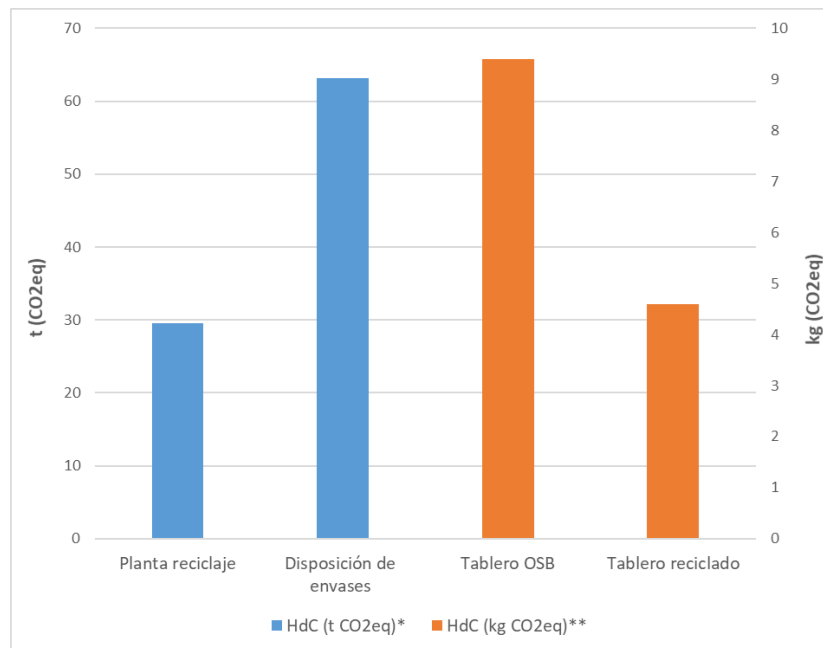
Tabla 5-12. Huella de carbono de tableros

Tablero	HdC (kg CO _{2eq})*
OSB	9,4
Reciclado	4,6

* Por tablero

5.4. Resumen de resultados

En la Figura 5-5 se resumen los resultados obtenidos del cálculo de huella de carbono para los casos a comparar.



* En base a producción/disposición de 227 t de Tetra pak®

** En base a unidad funcional, un tablero

Figura 5-5. Comparación de resultados de HdC

Fuente: elaboración propia

5.5. Propuestas de mejoras

Una de las ventajas de calcular la huella de carbono es que al analizar cada actividad productiva o corporativa se identifican aquellos puntos críticos que tienen potencial de mejora y así ser más eficientes no sólo desde el punto de vista de costos sino también desde la perspectiva medioambiental.

En base a lo anterior se identifican para el caso de la planta de reciclaje aquellas actividades por tipo de alcance que emiten mayores cantidades de GEI, las cuales representan el 72,2% de la HdC calculada y que se presentan en las tablas 5-13 y 5-15 por alcance.

Tabla 5-13. Actividades con mayor HdC del alcance 1

Actividad	HdC Kg CO₂eq	% c/r Alcance 1	% c/r al total
Traslado Ejecutivos	5.243,1	30,2	17,8
Traslado resto de personal	2.059,6	11,8	7
Transporte envases y Distribución de tableros	5.379,1	30,9	18,2
TOTAL	12.681,8	61,1	43,0

Dentro de las mejoras que pueden proponerse para estos ítems se consideran de dos tipos, aquellas relacionadas con la gestión de recursos y otra al cambio de tecnología. En la primera categoría se considera, por ejemplo, mejorar la planificación y modo de reuniones comerciales (on line vía zoom) por parte del gerente general, el traslado del jefe de planta sea junto con el resto del personal y la optimización de la planificación de ruta del camión en base a software especializado, como el Hightway o Route4Me, entre otros.

Por otro lado, el cambio de tecnología está asociada a optimizar el tipo de vehículos que se utilizan en el transporte, a eléctricos, de los cuales sólo el camión está dentro de aquellos que la empresa puede cambiar, debido a que los otros dos son de propiedad del personal.



Teniendo en cuenta el tipo de mejoras por gestión, se estima una reducción del alcance 1 en un 22,4% considerando una disminución en un 20% del traslado del gerente general, la ausencia del consumo del transporte del jefe de personal en su auto y la optimización en un 30% de la ruta del camión. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5-14. Alcance 1 con mejoras propuestas

Actividad	HdC Original (kgCO_{2eq})	HdC con Mejoras (kgCO_{2eq})
Grupo Electrógeno	1.295,5	1.295,5
Grúa Horquilla	1,900,3	1.900,3
Ducha del personal	656,1	656,1
Traslado Ejecutivos	5.243,1	2.960,8
Traslado resto de personal	2.059,6	2.059,6
Transporte compras y trámites	850,5	850,5
Transporte envases y Distribución de tableros	5.379,1	3.765,4
TOTAL	17.384,3	13.488,3

Con respecto al cambio del camión diesel a eléctrico, no se considera en este trabajo el análisis de este cambio ya que por los costos asociados a éste no se hace viable para el tipo de empresa que se evaluó, debido a que la inversión afectará al precio final de los tableros, pudiendo dejarlos fuera del mercado. Además, se debe tener en cuenta que dicho cambio también afectará el alcance 2 de la huella de carbono ya que debiera considerarse el consumo eléctrico del camión.

Por otra parte, las actividades del alcance 2 que aportan mayor HdC se presentan en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15. Actividades con mayor HdC del alcance 2

Actividad	HdC (kg CO_{2eq})	% c/r Alcance 2	% c/r al total
Iluminación exterior	1.349,2	11,0	4,6
Equipo Reductor de tamaño	5.402,6	44,1	18,2
Prensa	1.901,5	15,5	6,4
TOTAL	8.653,3	70,7	29,2

Para las actividades consideradas en el alcance 2 se propone mejorar a través de la instalación de paneles solares fotovoltaicos, los cuales aporten cero HdC por ocupar este tipo de energía renovable.

Se utiliza para el proyecto de los paneles fotovoltaicos, el simulador de la página web del Ministerio de Energía (<http://solar.minenergia.cl>), considerando las variables que se solicitan y se resumen en la Tabla 5-16.

Tabla 5-16. Consideraciones para simulación en Explorador Solar

Ítem	Consideración
Ubicación	Reñaca Alto Norte, Viña del Mar
Superficie disponible	380 m ²
% Superficie real ocupada	75%
Configuración	Fijo inclinado
Montaje	Roof mount cell glassback
Inclinación	29°
Azimut	-23
Coef. de temperatura	-0,45 %/°C
Eficiencia del inversor	96%
Pérdidas	14%

Según los datos considerados, el Explorador Solar entrega los resultados de la generación fotovoltaica presentados en la Tabla 5-17.

Tabla 5-17. Resultados generación fotovoltaica

Ítem	Resultado
Capacidad Instalada	51,68 kW
Total Diario	189,0 kWh
Total anual	69 MWh
Factor planta	15,0%

En la Figura 5-6 se presenta el gráfico entregado por el Explorador Solar sobre la generación fotovoltaica anual con datos mensuales promedios.

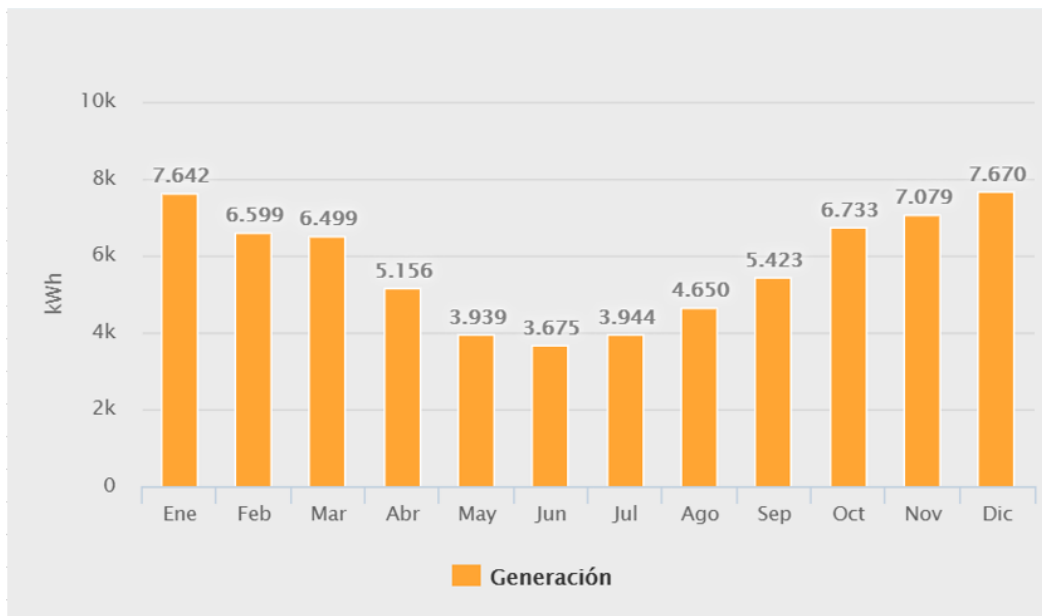


Figura 5-6. Generación fotovoltaica mensual promedio

Fuente: <http://solar.minenergia.cl>



Se toma en cuenta que el consumo anual de la planta de reciclaje en promedio es de 28.021 kWh, lo que estaría cubierto con la generación fotovoltaica, sin embargo, se debe considerar el consumo mensual ya que existe para la planta un alza en los meses de invierno del consumo por calefacción. Por tanto, el análisis a efectuar es considerar el peak de consumo de la planta con respecto a la generación en los meses que son de menor generación fotovoltaica. El análisis se muestra en la Tabla 5-18.

Tabla 5-18. Consumo y generación eléctrica en meses de invierno

Ítem	Energía mensual kWh	% Déficit
Consumo promedio mensual invierno	3.993	
Consumo promedio mensual resto del año	3.033	
Energía disponible fotovoltaica *		
Mayo	2.814	7,2
Junio	2.625	34,3
Julio	2.817	29,4
Agosto	3.321	16,8

* Se considera la energía que se puede consumir teniendo en cuenta que no se acumula y que no se trabaja los fines de semana

La metodología del cálculo, las consideraciones y los resultados detallados entregado por el Explorador Solar se presentan en el reporte que se encuentra en Anexo E.

El análisis anterior determina entonces que la HdC del alcance 2 disminuirá a 1,4 tCO_{2eq} ya que no se estaría consumiendo energía de la red durante el año con excepción de los meses comprendidos desde mayo hasta agosto. En la Tabla 5-19 se presenta el resultado de la huella de carbono calculada considerando las mejoras propuestas en ambos alcances.



Tabla 5-19. HdC de la planta de reciclaje con mejoras

Alcance	HdC (t CO_{2eq})
Alcance 1	13,9
Alcance 2	1,4
TOTAL	15,3

Por tanto, teniendo en cuenta las mejoras propuestas se estima que la HdC total de la planta se reducirá a 15,3 tCO_{2eq} lo que se traduce a una reducción de 48,3%.

6. DISCUSIÓN

La Huella de Carbono calculada para la disposición final de los envases Tetra pak[®] resultó ser 2,15 veces mayor a la estimada para planta de reciclaje, según las consideraciones y supuestos explicados en el capítulo anterior, lo que determina que la acción de reciclar disminuye efectivamente los impactos que se generan al medio ambiente, con la alternativa de no hacer algún tipo de reutilización, lo que implica “botar” estos envases.

Se debe tomar en cuenta que, en este concepto de “botar”, se consideró en el cálculo de la HdC la disposición final en forma correcta, llegando los residuos a un relleno sanitario donde se controlan los impactos de su proceso. Sin embargo, en la realidad parte de estos residuos son dispuestos en botaderos no autorizados o vertederos de bajo control lo que generan otros impactos adicionales a las emisiones de GEI.

Con respecto a la HdC calculada para la disposición final en el relleno sanitario El Molle, el mayor aporte a las emisiones es el transporte del residuo desde las diferentes comunas que conforman el Gran Valparaíso hasta el relleno, siendo el 71,5% del total de la huella calculada, aun cuando dentro de las consideraciones del cálculo sólo se tomó en cuenta la ida del camión al relleno y no se adicionó las emisiones por la ruta de recolección en cada comuna, ya que no se disponía de esta información. Además, tampoco se considera la vuelta del camión desde El Molle.

Con respecto al rendimiento del vehículo, se debe tomar en cuenta que el utilizado en el cálculo es el valor estándar en carretera entregado por la marca y modelo del camión, lo cual difiere completamente del valor real cuando se efectúa la ruta de recolección, ya que se hace más ineficiente, llegando a valores entre 1,8 a 1,26 l/km (Nguyen, T., 2009) aumentando aún más la HdC por el traslado de los envases a disposición final.

Por otra parte, las suposiciones efectuadas sobre las condiciones del relleno sanitario El Molle son básicamente las ideales tomando en cuenta los registros disponibles por parte de Veolia y el tiempo de operación desde el año 2013. Sin embargo, se debe considerar otras variables como la composición real de los residuos que se disponen, la existencia de una etapa de ajuste inicial en la operación del relleno, con respecto a las



condiciones necesarias para que se produzca biogás con la materia orgánica que se dispone. Además, interfieren variables climáticas y el O₂ presente en las capas superiores, en la descomposición anóxica. Por tanto, al ir rellenando la celda mejora la producción de biogás hasta su máximo potencial para luego decaer.

Todas estas desviaciones a las consideraciones y suposiciones tomadas en el cálculo de las emisiones por disposición de los envases de Tetra pak[®] hace necesario un estudio más acucioso sobre las condiciones del relleno sanitario y las mediciones de flujo del biogás con la respectiva composición del metano y el CO₂.

Con respecto a la composición del gas, cabe señalar que se efectuó una sensibilización del cálculo teniendo en cuenta la composición del biogás reportado por la empresa KDM de su Relleno Sanitario Lomas Lo Colorado, ubicado en la Región Metropolitana, la cual es de 48,5% de metano y 40,2% de CO₂ (Keller, A., 2011), resultando una HdC por el biogás producido de 18,0 tCO_{2eq}, que al compararlo con las 18,16 tCO_{2eq} obtenidas bajo el supuesto de 50% de cada componente, se determina que prácticamente no influye la proporción de estos compuestos sobre la huella de carbono.

Teniendo en cuenta el análisis efectuado se determina que las huellas de carbono comparadas entre la planta de reciclaje y la disposición de los envases existe una considerable brecha (29,6 v/s 63,5 t CO_{2eq}), la cual se hace más extensa si se toman en cuenta aquellas consideraciones expuestas en este análisis, dejando el proceso de reciclaje como la mejor opción para la disminución del impacto ambiental atribuido a las emisiones de GEI.

Por otra parte, en la HdC del tablero OSB, el artículo de Kutnar y Hill principalmente describe y compara el impacto ambiental de la huella de carbono de catorce productos de madera primaria, tales como: madera blanda, madera aserrada secada al aire y al horno, tableros de fibra dura, madera laminada encolada para uso de interiores y exteriores, tableros de fibra de densidad, tableros de partículas para uso en interiores y exteriores, contrachapados para uso en interiores y exteriores, pallets de madera y **tableros de fibras orientadas (OSB)**. Además, el artículo muestra una preocupación por las estrategias y acciones políticas que están tomando en la Comunidad Europea que afecta

directamente a la industria de los productos forestales, enfocándose en los ya mencionados productos de madera primaria.

Para estimar la huella de carbono de los tableros OSB, Kutnar y Hill, utilizan la metodología del Análisis del Ciclo de la Vida (LCA), también conocido como análisis de la cuna a la tumba. Considerando desde la extracción de materias primas, su fabricación, distribución, su uso y finalmente termina con el tratamiento de residuos, subproducto o eliminación del mismo. Sin embargo, los autores evalúan un ciclo de vida parcial del producto, desde la “cuna a la puerta”, es decir, desde su fabricación, hasta antes de su distribución al consumidor, considerando en la producción el uso de combustibles, electricidad y calor.

Las fases de uso y eliminación de los OSB por parte del usuario final fueron omitidas de la evaluación, debido a la dificultad de su seguimiento. Así mismo, los datos del impacto del ciclo de vida aguas arriba, insumos de energía, materias primas, productos, coproductos, desechos y liberaciones al aire, agua y suelo no se analizaron específicamente en este artículo.

Para la comparación de las huellas de carbono de los diferentes productos, los autores, utilizan una unidad funcional, la cual es de 1 m³ de tablero.

Con respecto al cálculo de las huellas de carbono se calcularon con la metodología detallada en IPCC 2001 GWP 100a V1.02 (Cambio climático, 2001) y el IPCC 2007 que contiene los factores de cambio climático con un plazo de 100 años. Es importante mencionar que las emisiones incorporadas no incluyen ninguna compensación por el carbono almacenado en los materiales de madera.

Cabe mencionar, que los datos de entrada y salida para realizar el cálculo de la huella de carbono fueron obtenidos de la base de datos Ecoinvent 2.0 (2010) y modelados en el software SimaPro (2009).

Por otro lado, Kutnar y Hill determinaron el aporte de los diferentes ítems que contribuyen a la huella de carbono para el tablero OSB, la cual fue estimada en 310 kg CO_{2eq} para la unidad funcional determinada (1 m³ de tablero). En gráfico presentado en el Anexo F se muestra que la huella de carbono asociada al adhesivo fenólico aporta el 59,6% a la HdC total del tablero.



Tomando en cuenta las condiciones a las cuales los autores estimaron la HdC se efectuó la comparación de este parámetro entre los procesos de reciclaje y producción de tableros OSB que indica que el reciclaje es el proceso con menos emisiones de gases de efecto invernadero aun cuando se debe considerar en esta comparación que las HdC fueron calculadas en años base distintos, ya que como se mencionó anteriormente, el estudio de los investigadores Kutnar y Hill fue calculada en base a Ecoinvent 2.0 con datos europeos de insumos y materias primas del año 2010.

Además, se toman en cuenta otros factores que difieren en el cálculo de estas huellas que es la composición del tablero comparado con el que se produce en Chile (porcentaje y tipos de madera) (Carrasco, 2012), (Kutnar *et al* 2014) y la matriz energética en el 2010 en la Comunidad Europea y la de Chile en el 2019 lo que se traduce en una diferencia en el factor de emisión usado en el cálculo.

Dado lo anterior, se deja para futuros trabajos de investigación la determinación más precisa de la huella del tablero OSB que es, según este trabajo, 2 veces mayor que la del tablero elaborado por reciclaje de los envases de Tetra pak®.

Se estima que esta diferencia no podrá revertirse aún cuando existan mejoras en el proceso del tablero OSB o un cambio de tecnología, dado que esto último también sería aplicable a la producción de tableros reciclados.

Con respecto a las mejoras propuestas a la planta de reciclaje están orientadas a disminuir la huella en aquellas actividades como el transporte de la empresa (alcance 1), tanto del personal como aquella asociada a la recolección de envases y la distribución de los tableros, las cuales representan el 43% de la huella total, y el consumo de energía eléctrica (alcance 2), relacionado con la iluminación exterior y el funcionamiento de los equipos de prensado y reducción de tamaño, las cuales representan el 70,7% del total de este alcance.

Es importante destacar que la solución de poner paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en la planta de reciclaje reduce en un 88,6% el alcance 2 de



su huella de carbono, determinándose así que es la mejora más eficiente para la reducción de las emisiones de GEI evaluadas en este trabajo.

Se considera que a pesar de efectuar el ajuste de las suposiciones que se tomaron en cuenta en el cálculo de las HdC en cada caso comparado, no se revertirá el resultado de que la planta de reciclaje tiene una menor carga ambiental asociada a su proceso dado que tiene un potencial de mejora tal, que al implementarlas disminuiría la HdC casi en un 50%, lo que aumenta aún más la brecha con respecto a las otras huellas calculadas.

Finalmente, hay que destacar que los beneficios de los procesos de reciclaje no sólo están relacionados con la disminución de emisiones de GEI, sino también con el ahorro de energía y la reducción en el consumo de recursos naturales vírgenes.



7. CONCLUSIONES

Se determina la Huella de Carbono en 29,6 tCO_{2eq}, de una planta con capacidad para reciclar 227 t de envases Tetra pak® y producir 5.814 tableros de tipo aglomerado para la construcción.

Se evalúa y determina la reducción potencial en un 53% de las emisiones de GEI al reciclar envases de Tetra pak® como tableros de tipo aglomerado para la construcción en comparación a la alternativa de disponer estos residuos en relleno sanitario.

Se estima la Huella de Carbono del proceso de elaboración de paneles de madera aglomerada para la construcción del tipo OSB en 9,4 kgCO_{2eq} y se compara bajo la unidad funcional de un tablero, con la producción de tableros reciclados (HdC=4,6 kgCO_{2eq}) reportando una disminución en la emisión de GEI del 48,3%.

Para la planta de reciclaje de envases de Tetra pak® se identificaron 3 puntos potenciales de mejora en el alcance 1 relacionados con el transporte y 3 del alcance 2, donde se puede reducir las emisiones de GEI, los cuales constituyen el 72,2% de la huella total.

La solución propuesta para la disminución del alcance 2 (paneles solares fotovoltaicos) resultó ser más efectiva compensando casi la totalidad de las emisiones (88,6%) por consumo desde la red eléctrica durante el año 2019.

Además, la generación de energía fotovoltaica cubriría el consumo del año con excepción del período comprendido entre los meses de mayo a agosto.

Finalmente, se determina que un proceso industrial de reciclaje aporta una disminución en los impactos ambientales considerando las emisiones de gases efecto invernadero, determinado a través de una herramienta estandarizada como la huella de carbono.



8. BIBLIOGRAFIA

Banco Mundial (2018). Los desechos: Un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos. [En línea]

<https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>

Banco Mundial (2018). What A Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

Carrasco, E. (2012). “Estudio Descriptivo de los Tableros OSB (Oriented Strand Board) y su Repercusión en el Sector Forestal Chileno”. Tesis. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Universidad de la Frontera.

Comisión Nacional de Energía, Chile. Factores de Emisión Matriz Energética. [En línea] <https://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>

C y V Medioambiente. (2015). Estudio. Diagnóstico Sectorial Sector Envases y Embalajes (L1-12/2014). Consejo de producción Limpia, Chile.

Elías, X. (2009). Reciclaje de residuos industriales, residuos sólidos y fangos de depuradora. 2ª edición. ISBN 978-84-7978-835-3. 1295 p.

EPA, (2020). Basic Information About Landfills Gas. United States Environmental Protection Agency. www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas

Espíndola, C., Valderrama, J. (2012). “Huella de Carbono, Parte 1: Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas”. Revista Información Tecnológica. Vol. 23(1), 163-176 (2012). doi: 10.4067/S0718-07642012000100017.

Estay, T., Ovalle, X. (2017). Informe Final. “Desarrollo de factores de emisión específicos para el programa HuellaChile”. Universidad Andrés Bello, Facultad de Ecología y Recursos Naturales, Escuela de Ingeniería Ambiental.



García, J. (2019). “Evaluación del Potencial de Generación de Energía Eléctrica a Partir de Biogás Producido En Rellenos Sanitarios En Chile”. Tesis. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica Federico Santa María. [En línea]

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/49121/3560902038825UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Generación Eléctrica en Chile: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

González, F. (2021). “Prefactibilidad Técnico-Económica de una Planta de Reciclaje de Tetrapak Generado en el Gran Valparaíso”. Tesis. Escuela de Ingeniería de Medio Ambiente. Facultad de Ingeniería. Universidad de Valparaíso. Chile.

Ministerio del Medio Ambiente, Huella Chile. Factores de Emisión GEI Plataforma (2019). [En línea] <https://huellachile.mma.gob.cl/material-de-apoyo/>

IPPC. (2018). Informe Técnico <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>

IPPC. (2020). Informe. El Cambio Climático y la Tierra. Resumen para encargados de políticas. ISBN 978-92-9169-354-2.

Instituto Forestal (INFOR). (2019). La Industria de Tableros y Chapas 2019. Boletín estadístico N° 169, Chile.

Instituto Forestal (INFOR). (2020). Anuario Forestal Boletín Estadístico/Statistical Bulletin N°174. ISBN: 978-956-318-165-4. Santiago, Chile.

ISO. (2006). Gestión Ambiental— Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices (Norma 14044:2006). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>



Kaza, S, Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos para 2050. Desarrollo Urbano. Washington, DC: Banco Mundial.

Keller, A. (2011). “Proyecto Generación Eléctrica con Gas de Relleno Sanitario Central Loma Los Colorados I y II”. Taller de Biogas de Rellenos Sanitarios. KDM Energía S.A.

Kiss, G., Aguilar G. (2006). “Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final”. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, México.

Kutnar, J., Hill, C. (2014). “Assessment of Carbon Footprinting in the Wood Industry”. Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 2, EcoProduction, DOI: 10.1007/978-981-4585-75-0_6.

Ministerio del Medio Ambiente, Chile. (2020). “Informe del Estado del Medio Ambiente 2020”. [En línea] <https://sinia.mma.gob.cl/interactivo-iema2020/>

Ministerio del Medio Ambiente, Chile. www.mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/

Moreno, B. (2017). “Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias”. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería Química. Universidad del Litoral. Argentina.

Nguyen, T, Gibson, B. (2009). “Estimación del consumo de combustible para las actividades de recolección de residuos sólidos urbanos (RSU) en la acera”. SAGE Journals. Volumen 28, número 4.

<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X09337656?journalCode=wmra>



Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). (2017). Residuos municipales, Estadísticas ambientales. <http://dx.doi.org/10.1787/888933712814> (diciembre 2020)

Quintero, M, Rodríguez, P., Rubio J., Jaramillo L., Núñez-Moreno F. (2017). Caracterización de la flexión y compresión de elementos estructurales huecos fabricados con láminas de Tetra pak® reciclado y cálculo aproximado de la huella de carbono producida en su elaboración. Revista Ingeniería de Construcción. Vol 32 N°3 2017. <https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/736/pdf>.

Santa Marta Sostenible (2021): Tiempo de degradación de los residuos. Una historia de tiempo y materiales. <https://santamartasostenible.org/tiempo-de-degradacion-de-productos-y-residuos/>

Tetra pak®. (2020a). Reciclaje de cartón. [En línea] <https://www.tetrapak.com/enmy/sustainability/planet/community-recycling>.

Tetra pak®, (2020b). Reporte de Sustentabilidad. [En línea] <https://www.tetrapak.com/content/dam/tetrapak/publicweb/gb/en/sustainability/documents/sustainability-report2020.pdf>

World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute, (2001). Protocolo de Efecto Invernadero, Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte. Edición revisada 2007.



ANEXOS

ANEXO A. Cálculo HdC

Tabla 1. Factores de emisión

Sistema eléctrico	0,4056 tCO ₂ eq/MWh
Gas LPG	1,582 kgCO ₂ eq/l
Bencina	2,254 kgCO ₂ eq/l
Diesel generador/fuente móvil terrestre	2,699 kgCO ₂ eq/l

Tabla 2. Cálculo Alcance 1

ACTIVIDAD	ANTECEDENTES	COMBUSTIBLE	CONSUMO (l)	FE (kgCO ₂ eq/l)	kgCO ₂ eq
General					
Grupo Electrónico	Uso de emergencia. Consumo por pruebas 10 l/h por 4 horas al mes	Diesel	480,0	2,699	1.295,5
Transporte personal					
Bono directivos/gestión comercial	Bono \$105.525/mes para GG /\$120.000 Bono \$41.029 a Jefe Planta/\$50.000	Bencina 95	2.326,1	2,254	5.243,1
Traslado resto personal en auto empresa	Minivan Peugeot Expet. Rendimiento mixto 16,7 km/l, 1 viaje al día por circuito de 53,1 km Valpo./Viña/Rotonda Concón/Valpo.	Diesel	763,1	2,699	2.059,6
Viajes por compras y trámites	Minivan Peugeot Expet. Rendimiento mixto 16,7 km/l, 2 viajes a la semana en circuito de 40 km	Diesel	229,9	3,699	850,5
Combustible camión (recepción y distribución)	Ref. tesis. Retiro todos los días Distribución cada 15 días	Diesel	1.993,0	2,699	5.379,1
Consumo gas por duchas	Ducha diaria de 8 minutos para 6 operadores	LPG	414,7	1,582	656,1
Grúa horquilla	5 cilindros/mes de 11 kg/LPG	LPG	1.201,2	1,582	1.900,3
TOTAL					17.384,3

Tabla 2. Cálculo Alcance 2

ACTIVIDAD	ANTECEDENTES	CONSUMO (kWh/año)	FE (kgCO ₂ eq/kWh)	kgCO ₂ eq
Consumo eléctrico oficinas (4)				
Computadores	2 computadores HP 206 G2. Consumo 350 W	1.344	0,4056	545,1
Iluminación	2 luminarias por cada oficina + 1 en recepción con 2 tubos LED c/u de 20 W. 4 h promedio encendidas	115	0,4056	46,7
Calefacción	1 calefactor (2000 W) por oficina uso solo 3 meses al año. No hay aire acondicionado	2.880	0,4056	1.168,1
Impresora	Sólo la central. HP multifuncional Consumo 270 W	518	0,4056	210,3
Carga celulares. Una carga completa por el 40% del personal.	Carga de batería completa 1 h, 5 V y 3 Ah	18	0,4056	7,3
Consumo eléctrico baños/vestidor				
Baños	1 luminaria en cada baño (2) con 2 tubos fluorescentes LED c/u de 20 W	51	0,4056	20,8
Vestidor	2 luminaria en cada baño (2) con 2 tubos fluorescentes LED c/u de 20 W	48	0,4056	19,5
Consumo eléctrico comedor				
Microondas	1,5 kW c/u Uso promedio diario 30 minutos	180	0,4056	73,0
Iluminación	3 luminarias con 2 tubos fluorescentes LED c/u de 20 W	58	0,4056	23,4
Refrigerador	Etiqueta refrig. (215 l) 29,68 kWh/mes	356	0,4056	144,5
Hervidor	1.600 W. Uso promedio 0,3 hora al día	115	0,4056	46,7
Consumo eléctrico iluminación exterior				
	Entrada y estacionamientos. 4 lámparas led de 110 W c/u.	3.326	0,4056	1.349,2
Consumo eléctrico galpon				
Iluminación	16 lámparas LED de 100 W por 4 h al día	1.536	0,4056	623,0
Lavadora	Ref. tesis Francisca González	763	0,4056	309,5
Reductora de tamaño	Ref. tesis Francisca González	13.320	0,4056	5.402,6
Prensa	Ref. tesis Francisca González	4.688	0,4056	1.901,5
Corte	Ref. tesis Francisca González	864	0,4056	350,4
TOTAL				12.241,5

ANEXO B. Identificación de actividades para Mejoras

Tabla 1. Alcance 1

ACTIVIDAD	kgCO2eq	% alcance	% total
General			
Grupo Electrónico	1.295,5	7,5%	4,6%
Transporte personal			0,0%
Bono directivos/gestión comercial	5.243,0	30,2%	18,4%
Traslado resto personal en auto empresa	2.059,6	11,8%	7,2%
Viajes por compras y trámites	850,5	4,9%	3,0%
Combustible camión (recepción y distribución)	5.379,1	30,9%	18,9%
Consumo gas por duchas	656,1	3,8%	2,3%
Grúa horquilla	1.900,3	10,9%	6,7%
TOTAL	17.384,2	100%	61,1%

Tabla 2. Alcance 2

ACTIVIDAD	CONSUMO (kWh/año)	FE (kgCO2eq/kWh)	kgCO2eq	% alcance 2	% total
Consumo eléctrico oficinas (4)					
Computadores	1.344	0,4056	545,1	4,5%	1,84%
Iluminación	115	0,4056	46,7	0,4%	0,16%
Calefacción	2.880	0,4056	1.168,1	9,5%	3,94%
Impresora	518	0,4056	210,3	1,7%	0,71%
Carga celulares. Una carga completa por el 40% del personal.	18	0,4056	7,3	0,1%	0,02%
Consumo eléctrico baños/vestidor					
Baños	51	0,4056	20,8	0,2%	0,07%
Vestidor	48	0,4056	19,5	0,2%	0,07%
Consumo eléctrico comedor					
Microondas	180	0,4056	73,0	0,6%	0,25%
Iluminación	58	0,4056	23,4	0,2%	0,08%
Refrigerador	356	0,4056	144,5	1,2%	0,49%
Hervidor	115	0,4056	46,7	0,4%	0,16%
Consumo eléctrico iluminación exterior	3.326	0,4056	1.349,2	11,0%	4,55%
Consumo eléctrico galpon					
Iluminación	1.536	0,4056	623,0016	5,1%	2,10%
Lavadora	763	0,4056	309,5	2,5%	1,04%
Reductora de tamaño	13.320	0,4056	5.402,6	44,1%	18,24%
Prensa	4.688	0,4056	1.901,5	15,5%	6,42%
Corte	864	0,4056	350,4	2,9%	1,18%
TOTAL	30.181		12.241,5	100%	41,32%



ANEXO C. Factores de emisión 2019, Huella Chile

CCH Nivel	CCH Nivel 2	CCH Nivel 3	CCH Nivel 4	Contaminante	Combustible	Incertidumb	Valor del FF
Alcance 1	Fuentes fijas	General	Gas de refinería	Óxido Nitroso (N2O)	Gas de refinería	BAJA	0,0004
Alcance 1	Fuentes fijas	General	Gas licuado de petróleo	Dióxido de Carbono (CO2)	Gas licuado	BAJA	1582,3485
Alcance 1	Fuentes fijas	General	Gas licuado de petróleo	Metano (CH4)	Gas licuado	BAJA	0,7022
Alcance 1	Fuentes fijas	General	Petróleo 6	Óxido Nitroso (N2O)	Petroleo 6	BAJA	6,2751
Alcance 1	Fuentes móviles	Medio terrestre	Medio terrestre	Dióxido de Carbono (CO2)	Petroleo 2 (Diesel)	BAJA	2698,5459
Alcance 1	Fuentes móviles	Medio terrestre	Medio terrestre	Metano (CH4)	Petroleo 2 (Diesel)	BAJA	3,9768
Alcance 1	Fuentes móviles	Medio terrestre	Medio terrestre	Óxido Nitroso (N2O)	Gas natural	BAJA	0,028
Alcance 1	Fuentes móviles	Medio terrestre	Medio terrestre	Dióxido de Carbono (CO2)	Gasolina	BAJA	2253,6161
Alcance 1	Fuentes móviles	Medio terrestre	Medio terrestre	Metano (CH4)	Gasolina	BAJA	3,4601
Alcance 1	Fuentes fijas	Generador	Petcoke	Metano (CH4)	Petcoke	MEDIA	0
Alcance 1	Fuentes fijas	Generador	Petróleo 2 (Diésel)	Dióxido de Carbono (CO2)	Petroleo 2 (Diesel)	BAJA	2698,5459
Alcance 1	Fuentes fijas	General	Gas ciudad (cañería o corrien	Dióxido de Carbono (CO2)	Gas de caneria	MEDIA	1,73
Alcance 1	Fuentes fijas	General	Petróleo 2 (Diésel)	Metano (CH4)	Petroleo 2 (Diesel)	BAJA	3,0591



ANEXO D. HdC Relleno Sanitario El Molle

INDICE	0,0043	T CH ₄ /T RSD
TETRAPAK	227	T

ALCANCE 1

CALCULO METANO

2019	T/AÑO	EQ CH ₄ /CO ₂	TCO _{2eq}
GENERACIÓN DE METANO TOTAL	0,975		
METANO A LA ATM. (NO CAPTADO)	0,653	25	16,3
METANO CAPTURADO (COMBUSTION)	0,322		0,885

EC COMB.

PM CH₄ = 16 g/molMOL CH₄ = 20.125MO CO₂ = 20.125T CO₂ = 0,885PM CO₂ = 44 g/molCALCULO CO₂

COMPOS. VEOLIA

COMPOS. KDM

2019	T/AÑO (50% c/u) ¹	T/AÑO (25,47%) ²
GENERACIÓN DE CO ₂	0,975	0,808
CO ₂ NO CAPTURADO	0,653	0,541
CO ₂ CAPTURADO	0,322	0,267

TOTAL ALCANCE 1 ¹

18,192

TCO_{2eq}TOTAL ALCANCE 1 ²

18,025

TCO_{2eq}

ALCANCE 2 (-)

GENERACION ELECTRICA

3.441,47

T CH₄

2019	MW/AÑO	T CO _{2eq} /MWh	T CO _{2eq}
GENERACIÓN ELECTRICA TOTAL	1535	0,4056	622,596
GENERACIÓN ELECTRICA TETRA PAK	0,1435		0,058

HUELLA DE CARBONO TOTAL ¹

63,57

TCO_{2eq}HUELLA DE CARBONO TOTAL ²

63,40

TCO_{2eq}

ANEXO E. Pantallas Explorador Solar

GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA

FORMULARIO RESULTADOS Y GRÁFICOS DESCARGAR RESULTADOS

Monofacial Modelo Básico
 Monofacial Modelo Avanzado
 Bifacial Modelo

CARACTERÍSTICAS DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO

Capacidad Instalada: kW **ESTIMAR CAPACIDAD**

Coefficiente de Temperatura del panel (%/°C):

Área Total Disponible (m²): (m²)

Fracción del área ocupada por paneles (%): (%)

Eficiencia Nominal del Panel (%): (%)

GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA

FORMULARIO RESULTADOS Y GRÁFICOS DESCARGAR RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN

Tipo de arreglo:

Tipo de Montaje:

Inclinación (°):

Azimut (°): **OPTIMIZAR ÁNGULOS**

PÉRDIDAS

Capacidad del inversor (kW):

Eficiencia del Inversor (%):

Factor de Pérdidas del sistema fotovoltaico (%):



GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA

FORMULARIO RESULTADOS Y GRÁFICOS DESCARGAR RESULTADOS

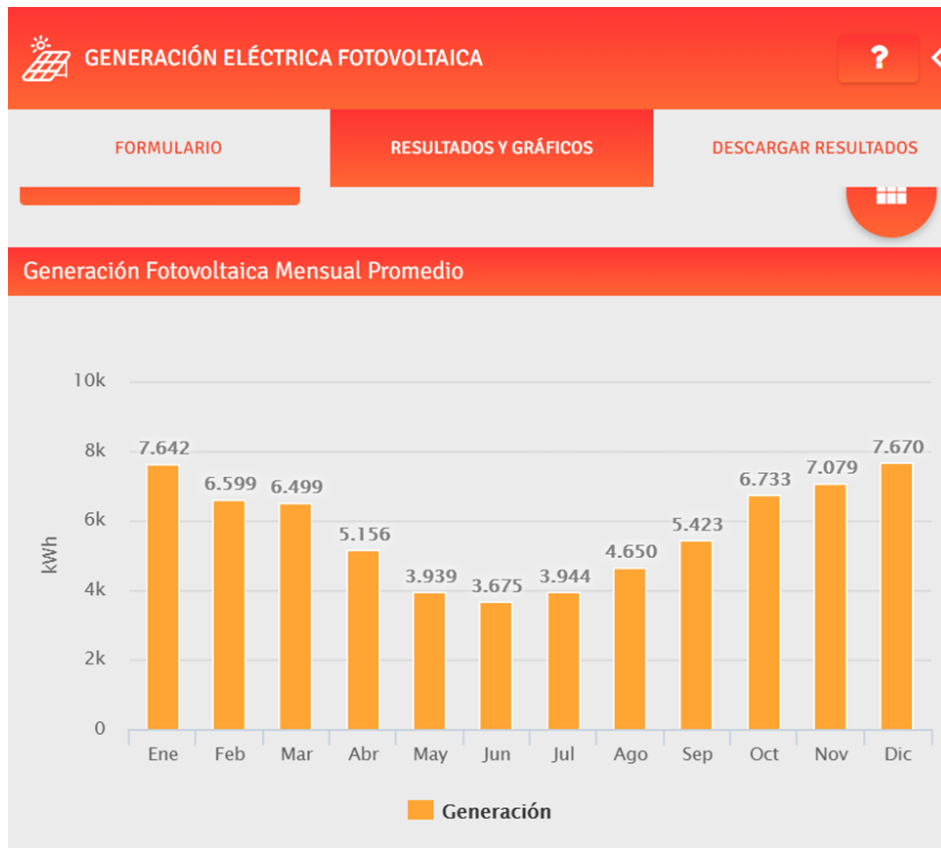
Mi Sitio

Latitud	-32,9791	Longitud	-71,4970	Altura	196 msnm
Tipo de Panel:	Fijo Inclinado	Inclinación:	29	Azimet:	-23

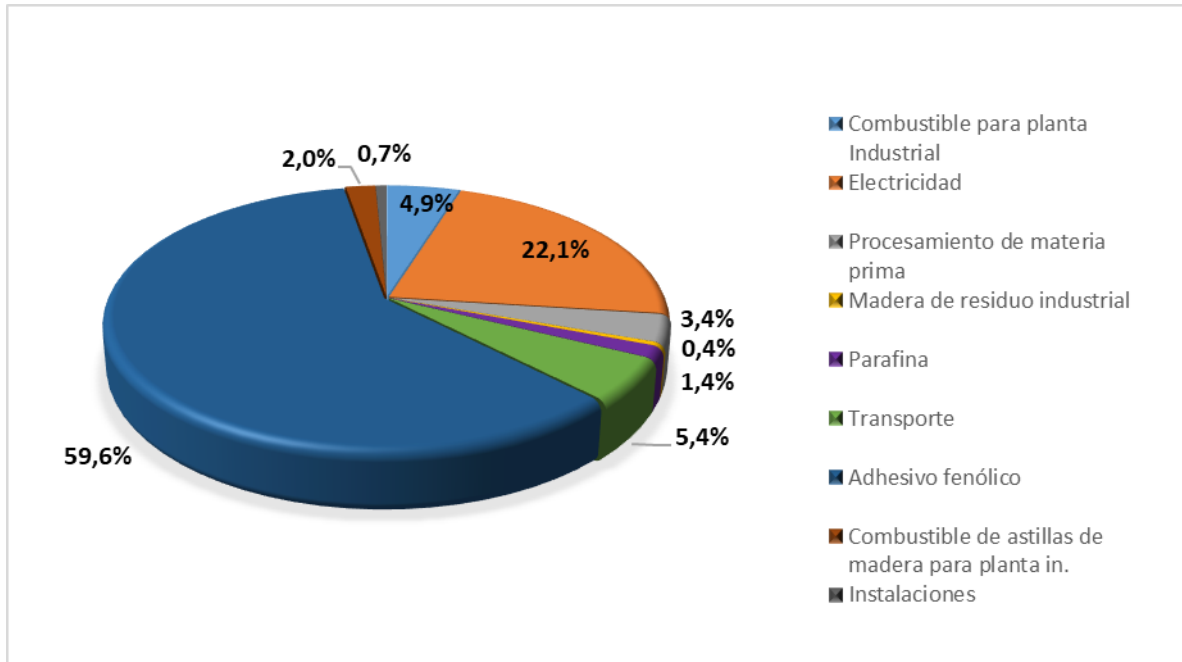
Resultados de generación fotovoltaica

Total Diario	Total Anual	Factor de Planta
189,04 kWh	69.001 kWh	15,0 %

SELECCIONAR GRÁFICO ▾



ANEXO F. Distribución del aporte a la HdC del tablero OSB



Fuente: Kutnar, J., Hill, C. (2014)