



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

Contribución a la disminución de contaminación por leña en la comuna de Los Ángeles a partir de la utilización de biogás como alternativa de calefacción, generado con la basura orgánica de los habitantes de la comuna

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

DIANA DE JESÚS MORAGA ARRIAGADA

Profesores guía:

Dra. Claudia Ulloa Tesser

Dr. Jorge Jiménez del Río

Concepción, Chile

2022



**“Contribución a la disminución de contaminación por leña en la comuna de los
Ángeles a partir de la utilización de biogás como alternativas de calefacción,
generados con la basura orgánica de los habitantes de la comuna”**

PROFESOR GUÍA: Dra. CLAUDIA ULLOA TESSER

PROFESOR CO- GUÍA: Dr. JORGE JIMENEZ DEL RIO

PROFESOR COMISIÓN: Dra. PATRICIA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, mayo 2022

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN EJECUTIVO	VII
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 Pregunta de Investigación	2
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1.- Objetivo General.....	2
1.2.2.- Objetivos específicos.....	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Antecedentes problemática nacional y comunal.....	3
2.1.2 Situación actual de la comuna de Los Ángeles	4
2.1.2.1 Contaminación por leña	4
2.1.2.2 Medidas que se han tomado.....	6
2.1.2.3 Generación de basura orgánica	7
2.2 La leña.....	8
2.2.1 Combustión de leña.....	8
2.2.2 Efecto de la humedad en la combustión de la madera.....	9
2.2.3 Emisiones de sustancias contaminantes de la combustión de biomasa.....	11
2.3 Biogás.....	13
2.3.1 Producción del biogás: digestión anaerobia.....	13
2.3.2 Parámetros que influyen en la producción de biogás	14
2.3.2.1 <i>Temperatura:</i>	14
2.3.2.2 <i>Composición residual</i>	15
2.3.2.3 <i>pH</i>	16
2.3.2.4 <i>Contenido en sólidos</i>	16
2.3.2.5 <i>Tóxicos e inhibidores</i>	17
2.3.3 Materias primas	17
2.4 Transición energética: de leña a biogás	19
2.4.1 Importancia y beneficios del biogás	19
2.4.2 Energía útil.....	21
2.4.3 Reducción de emisiones gracias al biogás.....	21
3. METODOLOGÍA	23

3.1. Metodología para el objetivo específico 1	23
3.2. Metodología para el objetivo específico 2	24
3.3 Metodología para el objetivo específico 3.....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
4.1. Caracterización de la leña.....	35
4.1.1. Cantidad	35
4.1.2. Poder calorífico	35
4.1.3 Distribución consumo leña a distintos niveles de humedad.....	35
4.2. Producción de biogás.....	35
4.3 Reemplazo de leña por biogás.....	37
4.3.1 Energía consumida de la leña.....	37
4.3.2 Energía producida por el biogás	39
4.3.3 Reemplazo de leña por biogás.....	40
4.4. Emisiones evitadas.....	41
4.4.1 Emisiones de material particulado	41
4.4.2 Emisiones de Gases Efecto Invernadero	44
4.5 Impactos de la reducción de emisiones	55
4.5.1 Impactos locales	55
4.5.2. Impactos globales.....	60
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emisiones diarias MP.....	6
Figura 2: Emisiones diarias MP.....	7
Figura 3: Emisiones contaminantes por comida según el combustible utilizado, en relación con el GPL	12
Figura 4: Proceso de digestión anaerobia	14
Figura 5: Usos del biogás.....	20
Figura 6: Esquema de proceso de obtención de factores de emisión ponderados.....	30
Figura 7: Diagrama cronológico de obtención de datos	36
Figura 8: Disminución de leña según aumento en la producción de biogás.	40
Figura 9: Disminución de emisiones de MP _{2,5}	42
Figura 10: Disminución de emisiones de MP ₁₀	42
Figura 11: Disminución de emisiones de CO ₂ dada la disminución de leña.	45
Figura 12: Disminución de emisiones de CH ₄ dada la disminución de leña.....	46
Figura 13: Disminución de emisiones de N ₂ O dada la disminución de leña	47
Figura 14: Emisiones de CO ₂ dada la producción de biogás.	48
Figura 15: Emisiones de CH ₄ dada la producción de biogás.....	49
Figura 16: Emisiones de N ₂ O dada la producción de biogás	50
Figura 17: Disminución total de emisiones de CO ₂	51
Figura 18: Disminución total de emisiones de CH ₄	51
Figura 19: Disminución total de emisiones de N ₂ O	52
Figura 20: Disminución de la huella de carbono de CO ₂ dada la disminución de leña y producción de biogás	53
Figura 21: Disminución de la huella de carbono de CH ₄ dada la disminución de leña y producción de biogás.....	53
Figura 22: Disminución de la huella de carbono de N ₂ O dada la disminución de leña y producción de biogás.....	54
Figura 23: Disminución en la concentración de MP	56
Figura 24: Disminución de la concentración de MP _{2,5} dada la disminución de leña.....	57
Figura 25: Aumento en la disminución de casos de urgencias respiratorias dada la disminución de MP _{2,5}	59
Figura 26: Aumento en la disminución de casos de urgencias respiratorias dada la disminución de MP ₁₀	59
Figura 27: Huella de carbono inicial total y final total.....	61
Figura 28: Mapa de representación de la zona equivalente a plantación de Eucalipto en la zona urbana de la comuna de Los Ángeles según la disminución de huella de carbono.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Emisiones de contaminantes por distintos tipos de fuente en la comuna de Los Ángeles (ton/año)	5
Tabla 2: Porcentaje de la población por comuna que utiliza leña para calefacción.....	5
Tabla 3: Poder calorífico de la madera a distintos porcentajes de humedad base húmeda.	10
Tabla 4: Poder calorífico de la madera a distintos porcentajes de humedad en base seca.	11
Tabla 5: Rangos de temperaturas y tiempo de fermentación.	15
Tabla 6: Rendimiento de gas metano para diferentes sustratos.....	16
Tabla 7: Rangos de pH ideales para cada etapa.	16
Tabla 8: Porcentaje de sólidos totales según distintos estudios.	17
Tabla 9: Residuos orgánicos de diversos orígenes.....	18
Tabla 10: Comparación bibliográfica de cantidad de sólidos de basura orgánica y excretas ganaderas.....	18
Tabla 11: Rendimiento de distintas materias primas según distintas fuentes bibliográficas.	19
Tabla 12: Eficiencia térmica de distintos artefactos.	21
Tabla 13: Emisiones de GEI por MJ de energía para distintos combustibles	22
Tabla 14: Potencial de calentamiento global de gases efecto invernadero en un horizonte de tiempo de 100 años.	32
Tabla 15: Distribución de consumo de leña a distintos niveles de humedad.....	35
Tabla 16: Eficiencia térmica de artefactos.....	37
Tabla 17: Calor útil de cada artefacto.....	38
Tabla 18: Consumo total de leña por artefacto en la comuna de Los Ángeles.....	39
Tabla 19: Factores de emisión para MP ₁₀ y MP _{2,5} según humedad y artefacto	41
Tabla 20: Factores de emisión de MP ₁₀ y MP _{2,5} ponderados.	41
Tabla 21: Factores de emisión de leña y biogás para gases efecto invernadero	44

RESUMEN EJECUTIVO

La comuna de Los Ángeles experimenta problemas graves de calidad del aire en los meses del invierno debido al uso de leña para calefacción en los hogares. Se estudió el potencial de reducción de emisiones de material particulado y gases efecto invernadero gracias al reemplazo de leña por biogás en la comuna de Los Ángeles, gracias a la basura orgánica generada por los habitantes de la comuna.

El estudio se orienta a establecer el potencial teórico para sustituir leña por biogás, sin embargo, no se analizan con profundidad los desafíos que conlleva su implementación, sus contratiempos, obstáculos, limitaciones, etc. Por lo anterior, los resultados han sido expresados desde 0 a 100% de potencial, considerando intervalos de 10%.

Los resultados de este trabajo se calcularon en tres grandes partes, expresadas en cada objetivo específico. Primero, se calculó la cantidad de leña consumida y sus características, para esto se revisó bibliografía de estudios nacionales como el expediente del Plan de Descontaminación de la comuna. Luego se calculó la cantidad de biogás generado gracias a la basura orgánica de los habitantes, considerando parámetros fisicoquímicos y variables del proceso de digestión anaeróbica, obteniendo la cantidad de basura del RETC, y los datos específicos para la basura de las variables antes mencionadas de estudios científicos. Por último, se estimó el reemplazo de leña por biogás, la cantidad de emisiones atmosféricas disminuidas y los impactos asociados, obteniendo los datos necesarios bibliográficamente.

La cantidad de leña consumida por los habitantes de la comuna es de 89.823 ton/año con un poder calorífico de 2303 kcal/kg, equivalente a 865,5 TJ/año a nivel comunal. Por otro lado, la cantidad de basura producida por los habitantes es 62.827

ton/año, de la cual 61,34% es orgánica, produciendo 4.816.226 m³/año con un poder calorífico de 3920 Kcal/m³, equivalentes a una energía de 79 TJ/año

Al reemplazar leña de uso residencial por biogás, se lograría disminuir en 8.200 ton/año el consumo de leña, dando como resultado la disminución de 223 ton/año de MP_{2,5} y 230 ton/año de MP₁₀.

La reducción en las emisiones de material particulado contribuiría a la disminución de los niveles de concentración ambiental anual de 43,81 a 39,81 µg/m³ para MP₁₀ y de 27,48 a 25 µg/m³ para MP_{2,5}, evitando 12.715 y 15.560 casos de atenciones de urgencias respiratorias al año respectivamente.

Por otro lado, para los gases efecto invernadero se lograría reducir en 4.533 ton/año, 23,3 ton/año y 0,308 ton/año las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, respectivamente, correspondiente a un total de **5.208** ton/año de CO₂eq, equivalente a la cantidad capturada por una plantación de 174,17 hectáreas de Eucalipto.

Además, la huella de carbono evitada por las emisiones de la cantidad de basura orgánica producida, suponiendo que no exista ningún sistema de captación, equivale a evitar la huella de carbono de 15.821 vacas.

1.INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es un problema persistente que ha tomado relevancia en las últimas décadas dado el aumento de emisiones luego de la revolución industrial del siglo XVIII y la masificación del automóvil en las ciudades.

A pesar de que las normativas de calidad del aire a nivel mundial o en cada país han dado resultado en mantener las emisiones por debajo de los límites establecidos, diversos estudios han encontrado que aún bajo estos niveles, los eventos de incremento de contaminación atmosférica se asocian con efectos nocivos sobre la salud (Ballester, Tenías & Pérez, 1999).

Las emisiones de gases efecto invernadero provocan el aumento de la temperatura global, que se estima aumentará en 1,5°C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2018), y en consecuencia el cambio climático. En este contexto el 5^{to} Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático señala que en Chile estos impactos estarán directamente relacionados con la pesca y acuicultura, los recursos hídricos, la biodiversidad, el sector silvoagropecuario, la temperatura y la pluviometría (IPCC, 2014).

La Comuna de Los Ángeles de la región del Biobío ha experimentado graves problemas de contaminación atmosférica debido a las emisiones de contaminantes del aire derivados del consumo residencial de leña para calefacción y cocción de alimentos. Su alto consumo y penetración en los hogares de la comuna se deben a su menor precio en relación con otros energéticos, su disponibilidad y factores culturales que posicionan a la leña entre los energético preferidos por los hogares del centro sur del país. Actualmente, la ciudad de Los Ángeles posee un Plan de Descontaminación Atmosférico, que contempla reducir los niveles ambientales de material particulado. Sin embargo, no se ha logrado reducir los niveles de concentración ambiental de por debajo de la norma.

Por otro lado, la comuna no presenta instancias de reciclaje de basura orgánica, como puntos de recolección, programas municipales o incluso educación al respecto, por lo que la totalidad de desechos orgánicos domiciliarios llegan directamente al relleno sanitario de la comuna.

El proyecto de tesis busca contribuir a alternativas tecnológicas orientadas a reducir las emisiones atmosféricas no sólo de material particulado, sino que también, de gases efecto invernadero, a través de una solución sustentable, reemplazando la leña por biogás, generado con la basura orgánica domiciliaria de la comuna, aportando de esta manera, una instancia de reciclaje.

Para la investigación se recopiló información sobre las características de la leña, la cantidad consumida, los artefactos utilizados y la cantidad de basura producida y su potencial energético y los resultados están expuestos de 0 a 100% de potencial de implementación, para así obtener un espectro más amplio de una aplicación del proyecto en distintos contextos.

1.1 Pregunta de Investigación

¿Cuáles son los impactos asociados a la introducción del biogás como energético para calefacción en la matriz energética residencial de la ciudad de Los Ángeles?

1.2. Objetivos

1.2.1.- Objetivo General

Evaluar el impacto en las emisiones atmosféricas de la introducción de biogás para calefacción en la matriz energética residencial en la zona urbana de Los Ángeles.

1.2.2.- Objetivos específicos

- 1) Caracterizar el consumo de leña para calefacción en el área de estudio.
- 2) Determinar la potencial producción de biogás, a través de la generación y características de los residuos orgánicos domiciliarios en la ciudad de Los Ángeles.
- 3) Estimar el potencial de reducción de emisiones de material particulado y gases de efecto invernadero mediante el reemplazo de leña por biogás.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes problemática nacional y comunal

2.1.1 Situación de la leña en el país

La leña es el energético preferido por los habitantes del país; se consume en un 39,6%, seguido del gas con un 31,4%, la electricidad con un 25,7%, parafina 2.6% y pellets 0,8% (In Data spa & CDT, 2018). A pesar de ser el energético más consumido, su comercialización es informal, debido a que el mercado en el que está inserto no se ha podido regular. Sin embargo, en los últimos 17 años se han tomado medidas para abordar las implicancias ambientales que genera su uso intensivo y poca regulación. En primer lugar, se han establecido PDA (Planes de Descontaminación Atmosféricos) que incluyen diversas medidas como prohibición de leña húmeda, recambio de calefactores, mejoramiento de condiciones térmicas de vivienda, etc. En segundo lugar, se ha promulgado la Ley N° 20.283 o “Ley de Bosque Nativo” la que establece incentivos para regularizar el comercio y el consumo de leña con el fin de proteger los bosques. Por último, se ha creado el Sistema Nacional de Certificación de Leña (SNCL) que es una institución que tiene como fin promover la certificación y fiscalización de la leña comercializada, según las directrices de la Norma Chilena N° 2907/2005 que establece que la leña debe cumplir con un nivel de humedad inferior o igual 25% en base seca (b.s.) para ser considerada “Leña seca”. Bajo esta norma también recibe la denominación de “leña semihúmeda” y “leña húmeda” a la leña que contiene un porcentaje de humedad de 25,1 a 30% y sobre 30% (b.s.), respectivamente.

Estas medidas institucionales no han tenido el impacto esperado, ya que los PDA no han podido reducir la contaminación en los niveles esperados, la Ley de Bosque Nativo ha tenido un impacto acotado y varias deficiencias y a más de 10 años de su implementación el SNCL el aumento en la penetración de la leña certificada ha sido mínima (RedPE, 2020).

2.1.2 Situación actual de la comuna de Los Ángeles

2.1.2.1 Contaminación por leña

El escenario de contaminación atmosférica en la comuna es bastante preocupante: Los Ángeles se encuentra entre las ciudades que tienen peor calidad del aire en invierno, junto con otras comunas con similitudes climáticas como Temuco, Coyhaique, Padre las Casas, Osorno y Valdivia. Esta situación se viene arrastrando desde hace muchos años, y sumado al enorme crecimiento demográfico de la comuna en las últimas dos décadas, el escenario sólo ha ido empeorando. Esta situación se debe al alto consumo de leña en la comuna.

Este alto consumo está dividido en cuatro tipos de fuentes emisoras: Fuentes puntuales, móviles, fugitivas y residenciales, siendo esta última la principal responsable a la contribución de emisiones en la comuna, aportando el 96% del total.

Este alto consumo domiciliario de leña se debe principalmente a tres factores:

- Inviernos muy fríos
- Alta disponibilidad de leña debido a que la comuna es una de tipo Agrícola forestal.
- Casi nula penetración de energías renovables.

Estas razones sitúan a Los Ángeles como una de las comunas que más leña consume, como se puede observar en la tabla 13.

Tabla 1: Emisiones de contaminantes por distintos tipos de fuente en la comuna de Los Ángeles (ton/año)

Tipo de fuente	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NO _x	SO ₂	COVs	NH ₃
Fuentes puntuales	561	146	459	610	36	1388	73
Fuentes residenciales	4032	3919	60979	218	4240	10530	479
Fuentes móviles	27	18,1	5523	757	38	376	16
Fuentes fugitivas	61	-	-	-	-	-	-
Total	4681,5	4065,3	66960,5	1585,5	4313,4	12293,4	568,1

Fuente: Estudio Definición de cuenca atmosférica para la comuna de Los Ángeles. SICAM, 2014.

Tabla 2: Porcentaje de la población por comuna que utiliza leña para calefacción.

Zona	%Total uso de leña
Valle Cachapoal	56,1
Curicó	54,1
Talca	58,2
Concepción	64,8
Chillán	71,7
Los Ángeles	87,0

Fuente: Encuesta de consumo energético para calefacción y cocción en el sector residencial. Corporación del Desarrollo Tecnológico, 2016.

Este escenario de alto consumo de leña, sumado a que los artefactos que la combustionan tienen una eficiencia muy baja, inferior al 15%, e inclusive una mejorada con hasta 25% (Viquez et al., 2018) han provocado una pésima calidad del aire, contaminando el componente ambiental atmosférico y provocando ciertas enfermedades respiratorias que se dan en la comuna asociadas a material

particulado como IRA alta, Influenza y Crisis Obstructiva Bronquial (Remaggi et al., 2019), además de mejorar la calidad de vida de las personas en el ámbito de salud.

2.1.2.2 Medidas que se han tomado.

El 2 de marzo de 2015 el Decreto Supremo N°11 declarara Zona Saturada por MP₁₀ y MP_{2,5} por concentraciones diarias en la comuna, por lo que se procede con urgencia a elaborar un Plan de Descontaminación Atmosférico que sería promulgado el 22 de febrero de 2017.

Este PDA tiene como objetivo dar cumplimiento a las normas primarias de calidad del aire para MP₁₀ y MP_{2,5}. La norma para MP₁₀ establece un límite de 120 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones diarias y anuales, respectivamente. La norma para MP_{2,5} establece límites de 50 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones ambientales diarias y anuales, respectivamente. Sin embargo, a pesar de que el PDA lleva 3 años en ejecución, aún no es posible vislumbrar grandes cambios en la calidad del aire. Esto queda reflejado en los gráficos presentados a continuación, para ambos tipos de material particulado, en el año 2020, en los cuales se observan peaks de emisiones que superan la norma.

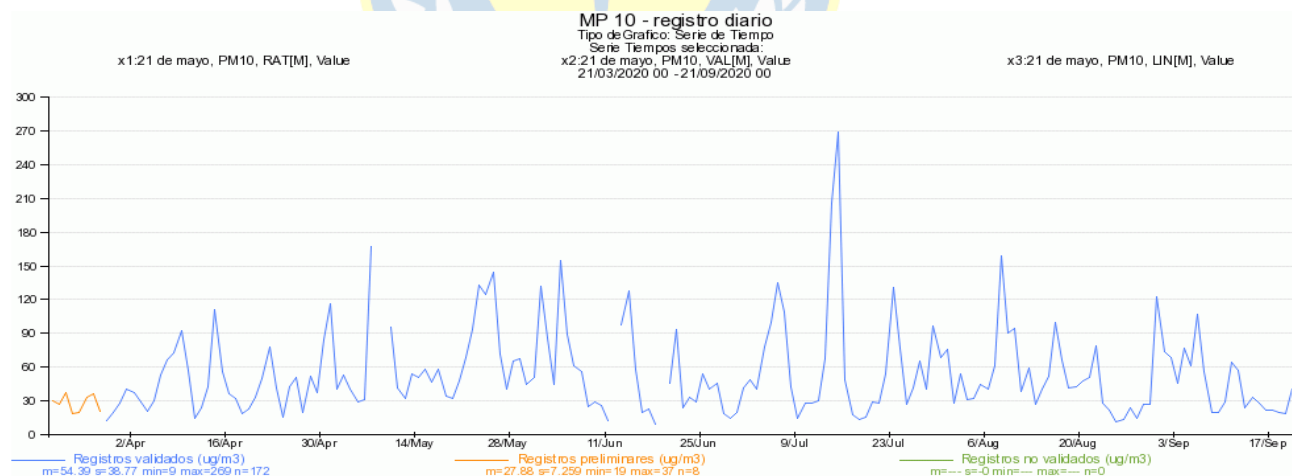


Figura 1: Emisiones diarias MP₁₀ período otoño invierno 2020.

Fuente: SINCA, 2020.

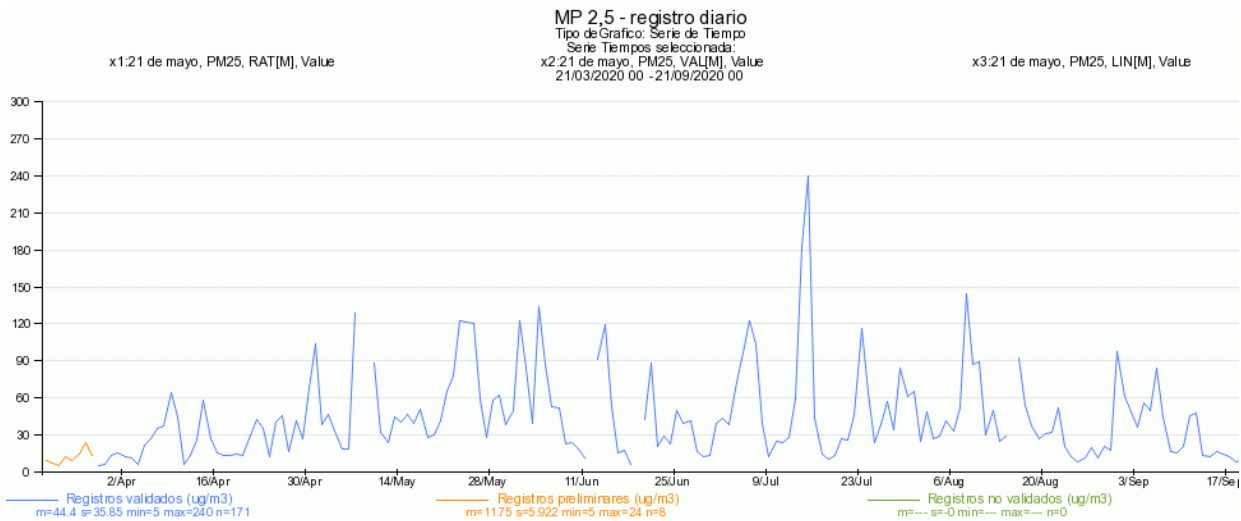


Figura 2: Emisiones diarias MP_{2,5} período otoño invierno 2020.

Fuente: SINCA, 2020.

La contaminación atmosférica en la ciudad de Los Ángeles es la principal razón por la que es totalmente necesario implementar el biogás como alternativa de calefacción. A pesar de que el PDA de Los Ángeles no considera esta alternativa, en su capítulo II titulado “Regulación para el control de emisiones asociadas a la calefacción domiciliaria” se enfoca principalmente en tres puntos para solucionar la problemática de la contaminación:

1. Regulación referida al uso y mejoramiento de la calidad de la leña;
2. Regulación referida al uso y mejoramiento de la calidad de los artefactos;
3. Regulación referida al mejoramiento térmico de las viviendas.

A pesar de que estas medidas pueden llegar a ser efectivas, no solucionan el problema de raíz, sólo son acciones paliativas en vez de preventivas. El real origen del problema es el energético utilizado, la leña.

2.1.2.3 Generación de basura orgánica

Es necesario implementar el biogás como contribución a la disminución de desechos orgánicos, debido a que actualmente las únicas instancias de reciclaje de materia orgánica son talleres municipales de compostaje, o entrega de composteras

a la comunidad. En la práctica, el 100% de la basura orgánica va a parar al relleno sanitario Laguna Verde de la empresa KDM, en el cual existe una gran presión debido a que, desde 2016 también recibe basura desde la comuna de Temuco, aportando aproximadamente 8 mil toneladas extras mensuales.

Sumado a lo anterior, el relleno sanitario Laguna Verde sólo capta y quema el biogás generado gracias a pozos de venteo, tubería de extracción, ventiladores de succión de biogás y una antorcha. Sin embargo, en el relleno existen fugas del 50% del biogás que se logra captar (R.S. N°236/2016), liberándose directamente en la atmósfera.

Además, los residuos orgánicos que presentan mejor rendimiento para producir biogás son los vegetales, por lo que, al estar compuesta la basura orgánica en su mayoría por desechos de comida, se podría fácilmente generar biogás de la basura domiciliaria.

Por último, esto sería una buena oportunidad para que la población de la comuna adquiriera la cultura del reciclaje y se educara de los beneficios de ésta, sintiéndose así partícipes a la contribución del cuidado ambiental, provocando de esta manera una buena disposición a la ampliación de esta implementación a más sectores, y a otro tipo de estrategias ambientales futuras.

2.2 La leña

2.2.1 Combustión de leña

La combustión es un conjunto de procesos físico-químicos en los que un combustible (CaHb) se oxida en presencia de un elemento comburente (generalmente O₂ del aire), desprendiendo luz y calor en forma de llama, junto a otros productos químicos resultantes de la reacción (Barrera et al., 2018).



La combustión se puede dar de manera completa e incompleta. La combustión completa se lleva a cabo sólo si la cantidad de oxígeno es suficiente según la estequiometría de la reacción para oxidar todo el combustible. Los gases producidos

por esta combustión son N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 . En el caso de la madera, se puede identificar una combustión completa cuando se genera una llama de color azul.

En la combustión incompleta, no se logra oxidar todo el combustible, debido a que el comburente no es suficiente, por lo que se liberan otros compuestos altamente contaminantes en los gases, denominados inquemados, tales como CO , H_2 , C , H_2S , N_2O e hidrocarburos como el metano (CH_4) (Barrera et al., 2018). En este caso la combustión incompleta se identifica por una llama de color amarillo.

2.2.2 Efecto de la humedad en la combustión de la madera

En el caso de la madera, el factor que más influye en la combustión es el contenido de humedad. La cantidad de agua en la madera puede repercutir negativamente en dos importantes aspectos las emisiones contaminantes y el poder calorífico.

La humedad repercute en las emisiones de contaminantes debido a que, a mayor cantidad de ésta en la madera, más energía se consume para liberar el exceso de agua, por lo que es menor la capacidad de generar una combustión completa, generando así más compuestos contaminantes en los gases.

El poder calorífico se define como la cantidad de energía liberada por la combustión completa de una unidad de combustible (gaseoso, líquido o sólido), obtenida a partir de condiciones de ensayo. El poder calorífico se puede expresar en diferentes unidades, tales como $[kcal/m^3]$ para gases, $[kcal/l]$ para líquidos y $[kcal/kg]$ para sólidos (Programa País Eficiencia Energética, 2010).

La cantidad de humedad en la leña es inversamente proporcional a su poder calorífico. Además, la humedad genera la disminución de sanidad y la proliferación de hongos, que perjudica aún más su potencial (Educar Chile, s.f.).

A continuación, se presentan dos tablas de Panshin (1959), en una de ellas se muestra la influencia de distintos niveles de humedad sobre el calor liberado por la combustión de la madera, es decir, el poder calorífico, y en la segunda se muestra la equivalencia entre leña en base húmeda y base seca.

Tabla 3: Poder calorífico de la madera a distintos porcentajes de humedad base húmeda.

Porcentaje de humedad (sobre peso húmedo)	Calor útil (Kcal/Kg)
0	3939
10	3600
15	3100
20	3015
30	2500
40	2150
60	1628
66	850
70	636

Fuente: Productos Forestales, Salvat, Madrid. PANSHIN, A. 1959. 605 p.



Tabla 4: Poder calorífico de la madera a distintos porcentajes de humedad en base seca.

Porcentaje de humedad (sobre base seca)	Calor útil (Kcal/Kg)
0	3939
11	3600
18	3100
25	3015
30	2872
35	2729
43	2500
67	2150
150	1628
233	636

Fuente: Productos Forestales, Salvat, Madrid. PANSHIN, A. 1959. 605 p.

2.2.3 Emisiones de sustancias contaminantes de la combustión de biomasa

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha declarado en sus estudios que la mitad de la población mundial depende de combustibles sólidos, como la madera, el carbón, residuos agrícolas o estiércol, para satisfacer sus necesidades energéticas básicas. La energía de biomasa, que incluye la leña, residuos de cultivos y desechos de animales, provee en promedio cerca del 30% de la energía primaria en los países en desarrollo (Cortés & Ridley, 2013).

En general los combustibles sólidos son mucho más contaminantes en relación con los líquidos o gaseosos, además de ser a los que peor uso se le da, tanto por la mala utilización de los artefactos al combustionar un combustible con un alto nivel de humedad.

Un estudio en la India estimó las emisiones de los principales contaminantes tóxicos derivados de la leña por cada comida preparada en las cocinillas típicas de la India, en comparación con el combustible limpio más fácilmente disponible, el gas de petróleo licuado (GPL). Las dos especies de leña estudiadas (*Acacia* ssp. Y *Eucalyptus* spp.) producían unas 25 veces más partículas que el GPL y otros combustibles de biomasa producían todavía más.

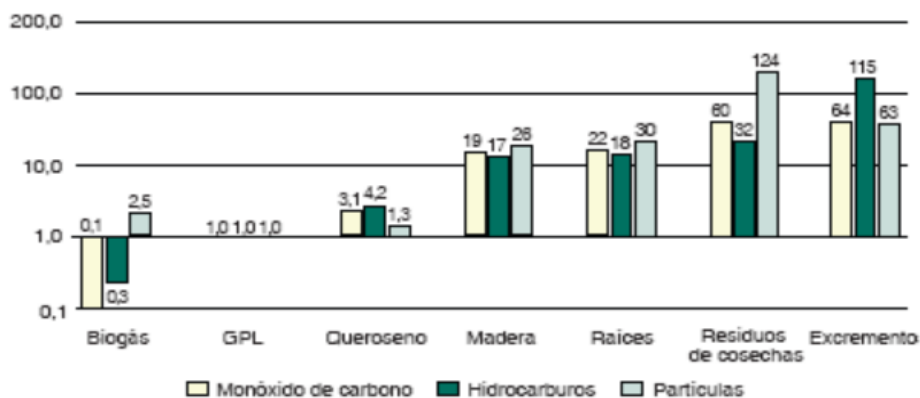


Figura 3: Emisiones contaminantes por comida según el combustible utilizado, en relación con el GPL (1,0 en la escala).

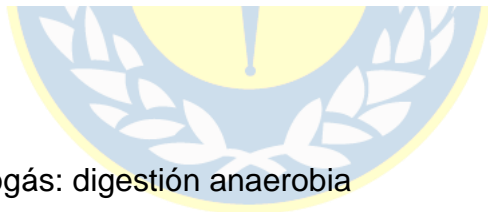
Fuente: *Household fuels and ill-health in developing countries: what improvements can be brought by LP gas (LPG)?* Smith, Rogers & Cowlin, 2005. World LP Gas Association & Intermediate Technology Development Group.

La leña además de liberar gases tóxicos, también es contaminante porque produce material particulado. Este contaminante está estrechamente asociado a las enfermedades respiratorias debido a la saturación en las zonas urbanas en períodos fríos. Este material particulado está presente de dos maneras:

- **MP₁₀**: partículas inhalables, con diámetro aerodinámico de 10 micrómetros y menores;
- **MP_{2.5}**: partículas finas inhalables, con diámetro aerodinámico de 2,5 micrómetros y menores.

Algunas partículas de menos de 10 micrómetros de diámetro pueden entrar profundamente en los pulmones y algunas incluso pueden entrar en el torrente sanguíneo. De estas, partículas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro, también conocidas como partículas finas o $MP_{2.5}$, representan el mayor riesgo para la salud (EPA, 2021).

Por otro lado, la combustión de leña libera 4 de los 5 gases efecto invernadero, óxido nitroso, metano, vapor de agua y dióxido de carbono, exceptuando el ozono. Sin embargo, para la leña el CO_2 se considera neutro. Estos gases contribuyen al efecto invernadero debido a que los gases de la atmósfera tienen la propiedad de atrapar calor de una manera semejante a los paneles de cristal de plástico que se usan en los invernaderos (Muñoz & Bazán, 2003). Esto provocando a su vez un aumento en el calentamiento global, que finalmente tiene como consecuencia anomalías climáticas en el planeta, tales como: Pérdida de biodiversidad, aumento de tormentas intensas, aumento de temperaturas, aumento en el nivel de mar, sequías, escasez de alimentos, pobreza y desplazamiento, entre otras (ONU, 2021).



2.3 Biogás

2.3.1 Producción del biogás: digestión anaerobia

La digestión anaerobia, o biometanización es un proceso en donde microorganismos, principalmente bacterias, degradan materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás o metano (CH_4). Se compone principalmente de cuatro etapas: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis.

Hidrólisis: En esta etapa las moléculas complejas o polímeros se transforman en sus respectivos monómeros, moléculas pequeñas más solubles y degradables, a través de exoenzimas excretadas por bacterias hidrolíticas (Acosta & Obaya, 2005).

Acidogénesis: Los compuestos producidos en la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos, como el ácido butírico, acético y propiónico (Acosta & Obaya, 2005).

Acetogénesis: Los productos de la acidogénesis son convertidos en más ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

Metanogénesis: Esta última etapa es en la que las bacterias metanogénicas, a partir de los productos de la Acetogénesis, van a producir los compuestos principales del biogás: metano y dióxido de carbono.



Figura 4: Proceso de digestión anaerobia.

Fuente: *Kinetics of Anaerobic Treatment*. S. G. Pavlostathis & E. Giraldo-Gomez, 1991. Water Science & Technology. Volume 24.

2.3.2 Parámetros que influyen en la producción de biogás

2.3.2.1 Temperatura:

Este parámetro influye en la velocidad directamente en las especies de microorganismos involucrados y su crecimiento. Las temperaturas psicrófilicas

aumentan la estabilidad de los procesos disminuyendo la diferencia entre las velocidades de degradación a diferentes temperaturas (Forster, 2005). Por otro lado, las temperaturas termofílicas aumentan la eficacia en la reducción de materia orgánica, produciendo biogás. Además, las altas temperaturas influyen positivamente destruyendo patógenos y virus que podrían perjudicar o arruinar la degradación. A continuación, se presenta el tiempo de fermentación a distintas temperaturas.

Tabla 5: Rangos de temperaturas y tiempo de fermentación.

Rango de temperatura	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo fermentación
Psicrofílica	4-10°C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20°C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation. Lagrange, B. 1979. Vol.2. Edisual / Energies Alternatives.

2.3.2.2 Composición residual

La digestión anaerobia va a depender de la naturaleza del residuo. En general, mientras más complejo es el residual, más ácidos grasos volátiles (AGV) se producen y al final, el rendimiento de CH₄ es mayor (Lorenzo & Obaya, 2005). Los residuos sólidos urbanos suelen contener altas concentraciones de fracción orgánica fácilmente degradable (carbohidratos y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos (Angelidaki & Ahrangi, 1997). A continuación, se presenta una tabla con cantidad de metano y biogás producido por distintos componentes.

Tabla 6: Rendimiento de gas metano para diferentes sustratos.

Componente	%CH ₄	m ³ /kg SV destruido
Carbohidratos (C ₆ H ₁₀ O ₅)	50	0,886
Grasas (C ₅₀ H ₉₀ O ₆)	70	1,335
Proteínas (6C.2NH ₃ .3H ₂ O)	84	0,587

Fuente: La digestión anaeróbica, aspectos teóricos, parte I. Lorenzo Y. & Obaya M. 2005. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>

2.3.2.3 pH

Al igual que la temperatura influye directamente en la velocidad de crecimiento y el tipo de microorganismos que estarán presentes en el proceso. Además de influir en el metabolismo y su estabilidad. De manera resumida el pH puede influir en el cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos) y la alteración de los compuestos no enzimáticos del sistema (ionización del sustrato, desnaturalización de la estructura proteica de la enzima) (Lorenzo & Obaya, 2005).

Tabla 7: Rangos de pH ideales para cada etapa.

Etapa	Hidrólisis	Acidogénesis	Acetogénesis	Metanogénesis
pH	6,5-7,0	6	7,0-7,2	7,0-8,5

Fuente: "Digestión anaeróbica termofílica seca de RSU; estudio de la variable del proceso de arranque y estabilización del bio-reactor"; Tania Foster Carneiro, 2005. Tesis Doctoral en Ingeniería Química, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.

2.3.2.4 Contenido en sólidos

Los residuos están compuestos por una parte de agua y una de sólidos, siendo ésta los sólidos totales. Dentro de éstos se encuentran los sólidos volátiles, que están hechos de compuestos orgánicos que teóricamente se convierten en biogás. La

cantidad de sólidos influirá directamente en el rendimiento de la degradación y el funcionamiento de los digestores.

Tabla 8: Porcentaje de sólidos totales según distintos estudios.

Porcentaje	Fuentes bibliográficas
19,6%	Secretaría de extensión Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Rosario (2019)
19,2%	Forster. (2005)
19,9%	Pavi et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.5 Tóxicos e inhibidores

El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado (FAO, GEF, Ministerio de energía, PNUD, 2011).

2.3.3 Materias primas

Existe una gran cantidad de opciones de materia prima para generar biogás, desde desechos domésticos como basura orgánica y desechos humanos, desechos ganaderos y agrícolas como residuos vegetales o excretas animales y desechos industriales como aguas servidas o lodos cloacales. A continuación, se presentan las principales materias primas para la generación de biogás.

Tabla 9: Residuos orgánicos de diversos orígenes.

Tipo de residuo	Composición
Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, coquetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: "Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA)". Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile.

Las materias primas más utilizadas para la producción de biogás son principalmente desechos orgánicos municipales y excretas ganaderas. La basura orgánica por regla general tiene más sólidos totales y volátiles que las excretas, por lo que existe una mayor cantidad de materia para degradar y convertir en biogás.

Tabla 10: Comparación bibliográfica de cantidad de sólidos de basura orgánica y excretas ganaderas.

Materia prima	Angelidaki & Ahring, 1993	Esguerra, 1989
Heces animales	4 - 15 % ST	5%-10% ST
	3 - 8 % SV	4%-8% SV
Basura orgánica	Menor a 20% ST	Mayor a 20% ST

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las heces ganaderas necesitan un tiempo de retención hidráulica menor; pero contienen una mayor cantidad de tóxicos o inhibidores que pueden perjudicar el proceso.

Se ha demostrado que las mezclas de materias primas generan un rendimiento mucho más alto de producción de biogás, dado que existe una mayor un ambiente

nutricio mucho más variado para la realización de los procesos metabólicos de los organismos.

Tabla 11: Rendimiento de distintas materias primas según distintas fuentes bibliográficas.

Varnero y Arellano, 1991			Pazera et al., 2015				
Materia prima/industria	Excretas bovino	Excretas porcino	Arroz	Papas	Tomate	Procesamiento de frutas y verduras	Industria cárnica
Rendimiento (m ³ /ton)	40	60	352	606	603	59	73

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Transición energética: de leña a biogás

2.4.1 Importancia y beneficios del biogás

El uso de esta energía viene remontado de las primeras civilizaciones de la humanidad, dado que los sumerios en el año 3000 a.C. practicaban la digestión anaerobia de residuos (Toruño et. al, 2016). El primer digester implementado del que se tiene registro fue en India en el año 1890 y luego en Inglaterra se utilizó este biocombustible para el alumbrado público en la ciudad de Exeter, producido con los mismos lodos cloacales de la ciudad (Hilbert, 2016). Sin embargo, no es hasta el siglo pasado cuándo se le comienza a tomar real importancia a esta bioenergía, debido al impacto ambiental que se comenzó a generar producido por las energías convencionales, luego de la revolución industrial.

El biogás, como toda energía renovable, trae consigo múltiples beneficios que las energías convencionales carecen, destacando principalmente que su producción es ilimitada, debido a que los recursos que utiliza en ello son prácticamente inagotables, como el sol en la energía fotovoltaica, el viento para la energía eólica, y la materia orgánica para la bioenergía.

Uno de los aspectos más importantes del biogás es su gran versatilidad, debido a que se puede utilizar de muchas maneras para producir distintos tipos de energía.



Figura 5: Usos del biogás.

Fuente: La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. Tobares L. (2013).

Esta versatilidad a su vez permite que muchos combustibles convencionales y contaminantes puedan ser reemplazados por el biogás a través de sus equivalencias. Por ejemplo, 1 m³ de biogás equivale a 0,7 l. de gasolina, 2,4 kWh de electricidad, 0,63 m³ de gas natural y 1,3 kg de madera.

El biogás actualmente ha sido empleado, en pequeña escala, en muchas zonas mayoritariamente rurales o más vulnerables para sustituir otros combustibles de calefacción o cocción, debido a sus múltiples beneficios. Tal es el caso de un estudio del diseño de un modelo de suministro de biogás doméstica para la localidad rural de Chitete en Zambia, conformada por aproximadamente 300 hogares. Dentro de los beneficios de la implementación de biogás está el ahorro de dinero por gastos en otros combustibles, beneficios de salud por disminución de emisiones, generación de ingresos por ventas de fertilizantes, entre otros.

Es de gran importancia considerar al biogás como reemplazante de muchas energías debido a los beneficios que trae asociados; pero hay que tener en cuenta

que el reemplazo de los combustibles se debe hacer a través de su energía útil, debido a que, si se considera la energía bruta, se estaría en un escenario en el cual el 100% de la energía sería aprovechada, lo cual no ocurre en el día a día.

2.4.2 Energía útil

Es la cantidad de energía realmente utilizada para cumplir la tarea productiva del equipo o aparato consumidor, por ejemplo, el calor necesario que deban absorber los alimentos para cocinarse (García et al., 2017). La energía útil depende principalmente de dos factores, el poder calorífico del combustible y la eficiencia térmica del artefacto en donde se quema.

Según la segunda ley de la termodinámica, eficiencia térmica se define como la relación entre el trabajo útil producido por un sistema y la cantidad de calor que ingresa al mismo (García et al., 2017).

La eficiencia térmica va a depender de la capacidad de cada artefacto. A continuación, se presentan eficiencias de distintos tipos de aparatos según bibliografía.

Tabla 12: Eficiencia térmica de distintos artefactos.

	Tama (2009)		Bailis et al. (2007)	
Artefacto	Cocina GLP	Cocina eléctrica a inducción	Estufa GLP	Estufa a leña
Eficiencia	40%	84%	45%	12-25%

Fuente: Elaboración propia

2.4.3 Reducción de emisiones gracias al biogás

Como se mencionó anteriormente existe una variada gama de beneficios ambientales del biogás. Al producirlo, se genera una gestión ideal de los residuos orgánicos, dándoles un uso sustentable y evitando así, por ejemplo, las emisiones fugitivas de metano provenientes del sector agrícola-ganadero liberadas directo a la atmósfera, o la de descomposición de materia orgánica en rellenos sanitarios.

La digestión anaerobia tiene una pérdida energética 20 veces menor y produce gases con un poder calorífico mucho mayor que la digestión aerobia (FAO, 2011). Además, al ser un proceso hermético, se evitan las emisiones de óxido nitroso y amoníaco.

No sólo se pueden evitar emisiones provenientes de la misma biomasa que genera el biogás, sino que también de otros tipos de biomasa que tienen un proceso de producción de energía muy distinto: la combustión. Los principales contaminantes evitados de la combustión son el material particulado y los GEI. Esto cobra especial relevancia en las emisiones residenciales por leña, debido a que, a diferencia de la combustión por procesos industriales en calderas, las cocinas o estufas no tienen un sistema de captación de emisiones lo suficientemente eficiente, o simplemente no tienen ninguno, liberando directamente estos contaminantes a la atmósfera.

A continuación, se presentan las emisiones de GEI para madera y biogás:

Tabla 13: Emisiones de GEI por MJ de energía para distintos combustibles.

Combustible	Emisiones por MJ de energía			
	gCO ₂	mgCH ₄	gCO	mgN ₂ O
Biogás	81,5	57	0,11	5,4
Carbón	682	1300	26,2	1,4
GLP	139	8,9	0,82	6
Leña	532	600	14	4,3
Estiércol	885	7100	39	270

Fuente: *Digestores de biogás domésticos a pequeña escala: ¿Una opción para mitigar el calentamiento global o una potencial bomba climática?* Bruun S., Stoumann L, Khanh V. & Sommer S., 2014. *Revisión de energía renovable y sostenible, Volumen 33.* 736-741.

Además, la combustión de biogás no genera material particulado, por lo que el abatimiento de emisiones de MP del biogás comparado con la leña sería considerable.

Debido a que nuestro planeta se encuentra en una situación crítica desde el punto de vista ambiental, resulta de vital importancia en la actualidad, calcular e informar la cantidad de emisiones de contaminantes emitidas, ya sea a nivel individual, territorial o corporativo. Esto nos permite comprobar si las respectivas normas aplicables están siendo respetadas, adoptar medidas de mitigación, crear estrategias, conformar acuerdos con participación de distintos actores, entre muchas otras cosas.

3. METODOLOGÍA

En términos generales, se realizó un estudio teórico de la potencial reducción de contaminación atmosférica por distintos contaminantes en la comuna, gracias al reemplazo de leña por biogás. Sin embargo, de manera práctica, y dentro de los límites de este estudio, no fue posible saber si es factible o viable llevar a cabo el proyecto, o de la manera en que se podría llevar a cabo, considerando sus alcances, obstáculos, limitaciones, contratiempos, etc. Es por ello que los resultados de esta investigación se realizaron considerando desde 0 a 100% el potencial reemplazo de leña por biogás y, de esta manera, estar considerando cualquier escenario posible.

3.1. Metodología para el objetivo específico 1

Determinar el consumo de leña para calefacción y sus características.

Cantidad:

Para obtener un valor de consumo de leña lo más realista y confiable posible, se obtuvieron los valores más actuales o actualizados de:

- Consumo de leña anual por hogar
- Cantidad de hogares en la zona de estudio
- Penetración del consumo de leña en la zona.

Para luego utilizarlos en la siguiente ecuación:

*Consumo de leña comunal = consumo leña por hogar * cantidad de hogares * penetración*

Consumo de leña a distintos niveles de humedad:

Se determinaron la distribución del consumo de leña de la comuna de Los Ángeles a distintos niveles de humedad.

Según la Norma Chilena 2907/2005 los rangos de humedad para leña húmeda, semihúmeda y seca son los siguientes:

Leña seca: 0-25%

Leña semihúmeda: 25-30%

Leña húmeda: >30,1%

Lo anterior se realizó a través de una revisión bibliográfica en estudios nacionales de instituciones públicas, ministerios o universidades, o revisando el PDA comunal.

Poder calorífico:

El poder calorífico de la leña se obtuvo de La Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

Cabe destacar que, no se consideró la influencia de la humedad en el poder calorífico de la leña para el cálculo de emisiones a pesar de que es un factor muy influyente. Como se mencionó en el marco teórico, el mercado de la leña en Chile, y, por consiguiente, en la comuna, es muy irregular, por lo que no se puede establecer con seguridad los niveles de humedad de la leña que se comercializa o su poder calorífico. De igual forma, en el caso del material particulado, la influencia de la humedad está reflejada en los factores de emisión dispuestos por instituciones oficiales.

3.2. Metodología para el objetivo específico 2

Determinar la potencial producción de biogás, a través de la generación y características de los residuos orgánicos domiciliarios en la ciudad de Los Ángeles.

Para efectos de esta investigación, se establecieron tres supuestos para determinar la potencial producción de biogás. Estos supuestos fueron establecidos debido a que tienen que ver con parámetros prácticos y técnicos óptimos respecto al funcionamiento de un biodigestor, y están fundamentados por la literatura.

- 1) Temperatura de 55°C
- 2) Biodigestor tipo Batch
- 3) Tiempo de Retención Hidráulica 15 días

Luego se seguirá la metodología de Tania siguiente metodología de cálculo:

-Determinación basura orgánica producida anualmente a nivel comunal:

Ec 2:

$$\text{Basura orgánica anual (Kg)} = \text{Basura anual (Kg)} * \% \text{ orgánico comunal basura}$$

-Determinación de sólidos totales:

Ec 3:

$$ST (Kg) = \%ST \text{ típico basura orgánica} * \text{Basura orgánica diaria (kg)}$$

-Dilución:

Ec 4:

$$M_1 * C_1 = M_2 * C_2$$

Donde:

M_1 = masa (kg) de sustrato

C_1 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato puro, sin agregado de agua

M_2 = masa total de la mezcla sustrato + agua (kg)

C2 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato con agregado de agua

-Determinación remoción sólidos volátiles:

Ec 5:

$$SV \text{ removidos (Kg)} = \% \text{ remoción} * SV \text{ (Kg)}$$

-Determinación de sólidos volátiles:

Ec 6:

$$SV \text{ (Kg)} = \text{sólidos totales (Kg)} * \% \text{ SV en ST}$$

-Determinación de biogás producido:

Ec 7:

$$\text{Biogás} = SV \text{ removidos (Kg)} * \text{Rendimiento biogás} \left(\frac{m^3}{Kg \text{ SV}} \right)$$

Los datos que se necesitaron para realizar los cálculos fueron obtenidos bibliográficamente de las siguientes fuentes: ¹Amb. & Energía Industrial Ltda., 2009, ²Forster, 2005, ³Aparna & Monoj, 2015, ⁴Fongsatitkul, Elefsiniotis & Wareham, 2010, ⁵ Pavi et al. 2017.

La metodología de cálculo utilizada es la expuesta por los autores Asís, H., Dopazo, F. & Gianoglio Paulo en su investigación titulada “Producción de energía a partir de biogás obtenido a partir de residuos sólidos urbanos.”

3.3 Metodología para el objetivo específico 3

3) Estimar la reducción de emisiones de MP y GEI's mediante el reemplazo de leña por biogás.

La determinación del reemplazo de leña por biogás se realizó considerando su energía útil, debido a que un escenario en donde se considera la energía bruta directamente de los poderes caloríficos de los combustibles sería utópico, ya que los artefactos que se utilizan para calefaccionar no tienen el 100% de eficiencia.

a) Energía útil de la leña

Para el cálculo de la energía útil consumida en leña en la comuna se determinó lo siguiente:

- **Artefactos que se utilizan para la calefacción a leña** en la comuna de Los Ángeles y la distribución porcentual de cada uno de ellos, o sea el porcentaje de uso de cada artefacto. Para esto se revisará el expediente del Plan de Descontaminación de la comuna.
- Para la **eficiencia térmica o eficiencia de combustión**, se supusieron valores aproximados de eficiencia térmica, de acuerdo a las características de cada artefacto.

Una vez teniendo el poder calorífico de la leña y la eficiencia térmica de los artefactos, se utilizó la siguiente ecuación para obtener la energía útil, que se obtiene de cada uno de los aparatos.

Ec. 8:

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Cantidad de calor liberado (útil)} \left(\frac{E}{m}\right)}{\text{Poder calorífico del coombustible quemado} \left(\frac{E}{m}\right)}$$

Con el calor útil y la distribución de cada artefacto, se obtendrá un calor útil promedio en unidades de energía en masa para la comuna.

Ec. 9:

$$\bar{X}p \text{ Energía útil hogar} \left(\frac{E}{m}\right) = \sum \text{Calor útil artefacto}_i * \% \text{ hogares uso artefacto}_i$$

Para obtener la energía útil promedio total que se consume en la comuna, se multiplicará la energía útil promedio hogar por la cantidad de leña consumida:

Ec. 10:

$$\bar{x} \text{ Energía útil total consumida } \left(\frac{E}{t} \right) = \bar{X} p \text{ Energía útil hogar } \left(\frac{E}{m} \right) * \text{ Cantidad de leña consumida } \left(\frac{m}{t} \right)$$

Se sigue el mismo procedimiento para estimar la energía útil del biogás, pero en este caso, el único artefacto encargado de la combustión de éste será la estufa a gas tradicional, por lo que no será necesaria una búsqueda de distribución.

Para determinar el poder calorífico del biogás se obtuvo de Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

Al igual que con los artefactos de combustión por leña, se supuso un valor de eficiencia basado en las características del calefactor a gas con tiro balanceado. Luego con los valores de la eficiencia de la estufa y el poder calorífico del biogás, se obtuvo el calor útil utilizando la ecuación 2.

Para calcular la energía total comunal útil que se puede obtener del biogás, primero fue necesario saber cuánto biogás se puede producir. Para ello se utilizaron los datos de rendimiento de biogás por cantidad de sólidos volátiles y cantidad de basura orgánica generada en la comuna, identificados bibliográficamente.

Ec. 11:

$$\text{Biogás total comunal } \left(\frac{V}{t} \right) = \text{Rendimiento basura } \left(\frac{V}{m} \right) * \text{Cantidad de basura generada } \left(\frac{m}{t} \right)$$

Luego de obtener ambos datos se utiliza la ecuación 6, como sigue:

Ec. 12:

$$\text{Energía total comunal del biogás } \left(\frac{E}{t}\right) = \text{Biogás total comunal } \left(\frac{V}{t}\right) * \text{Calor útil } \left(\frac{E}{V}\right)$$

c) Reemplazo de energías

Por último, con los resultados de las energías útil comunales consumida y producida, se estimó la energía total que el biogás no puede reemplazar.

Ec. 13:

$$\text{Energía total no reemplazada} = \text{Energía útil total comunal consumida } \left(\frac{E}{t}\right) - \text{Energía útil total comunal del biogás}$$

Esta energía se transformará a unidades de masa, utilizando el calor útil promedio de la leña.

Ec. 14:

$$\frac{\text{Energía total no reemplazada } (E/t)}{\text{Calor útil promedio hogar } (E/m)} = \text{Cantidad de leña no reemplazada } (m/t)$$

Para finalizar, se utilizó la ecuación 9 para calcular la cantidad de leña reemplazada

Ec. 15:

$$\text{Cantidad leña reemplazada } \left(\frac{m}{t}\right) = \text{Cantidad leña comunal consumida } \left(\frac{m}{t}\right) - \text{Cantidad leña no reemplazada } \left(\frac{m}{t}\right)$$

Una vez estimada la potencial producción de biogás y la cantidad de leña que se podría reemplazar, se procedió a calcular las emisiones que se podrían evitar. Para efectos de este estudio, se calcularon las emisiones para gases efecto invernadero y material particulado, tanto de la leña como del biogás.

Para el cálculo se utilizó el capítulo 2: “Combustión Estacionaria” del Volumen 2: “Energía” de la Metodología de Las Directrices del IPCC 2006 para gases de efecto

invernadero. Esta metodología plantea que para calcular las emisiones de un contaminante específico dado un combustible, se necesita el factor de emisión de ese contaminante según el combustible y el consumo total del último.

Ec. 16:

$$Emisión_{i,j} \left(\frac{m}{t} \right) = Factor\ de\ Emisión_{i,j} \left(\frac{m}{m} \text{ ó } \frac{m}{E} \right) * Consumo\ combustible_j \left(\frac{m}{t} \text{ ó } \frac{E}{t} \right)$$

Los factores de emisión de los gases de efecto invernadero se obtuvieron de las Directrices del IPCC para estos gases, del informe AP-42 de la EPA o de la consultora nacional SICAM.

Dado que para el caso del material particulado existen factores de emisión mucho más específicos, se consideraron la humedad de la leña y los artefactos, con sus respectivas distribuciones de consumo y uso a nivel comunal, como factores influyentes en éstos. Una vez obtenidos los datos anteriores se procedió al cálculo de factores de emisión ponderados para la situación de la comuna. A continuación, se presenta un esquema explicativo del procedimiento de obtención de los factores de emisión.

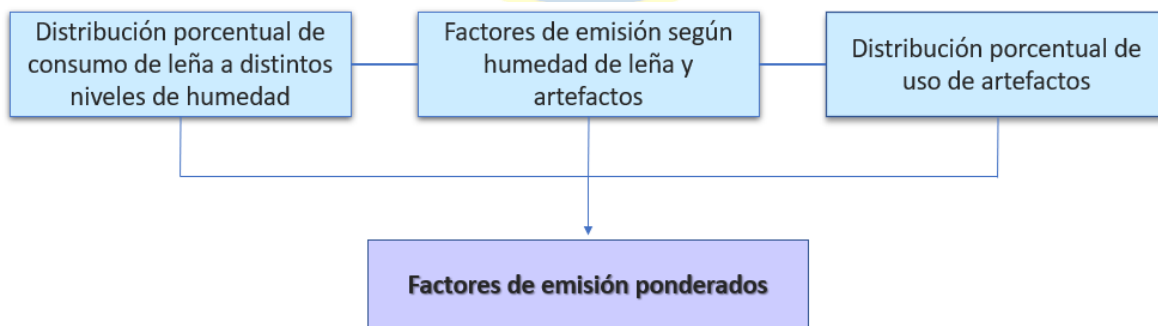


Figura 6: Esquema de proceso de obtención de factores de emisión ponderados.

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener los factores de emisión bibliográficos se consultaron sólo las últimas dos fuentes mencionadas anteriormente, debido a que el IPCC no se refiere al material particulado en sus informes. Cabe destacar que, el alcance de este proyecto es sólo el 1, según el protocolo GEI.

Cálculo emisiones totales en la zona

El cálculo de emisiones totales se realizó por separado para gases efecto invernadero y para el material particulado.

- a) Gases efecto invernadero: Las emisiones de gases efecto invernadero finales para la zona serán las que se emitirían por la leña que no se pudo reemplazar gracias al biogás, más las emisiones que se producirían al combustionar el biogás. Se expresan en la siguiente ecuación.

Ec 17:

$$Emisiones\ finales_i = Emisiones_{i,lnr} + Emisiones_{i,b}$$

Donde: i = Gas efecto invernadero i

lnr= leña no reemplazada

b= biogás

- b) Material Particulado: En este caso las emisiones de material particulado serán sólo las emitidas por la leña no reemplazada, debido a que el biogás no produce material particulado al combustionar, por lo que:

Ec 18:

$$Emisiones\ finales = Emisiones\ de\ leña\ no\ reemplazada$$

Cálculo huella de carbono

Se utilizó la metodología del protocolo de gases efecto invernadero. Los valores del potencial de calentamiento global se obtendrán del reporte del IPCC de 2007 “Physical and Science Basis”. Se utilizó la siguiente ecuación:

Ec 19:

$$\text{Huella de carbono}_i(\text{Kg CO}_2 \text{ eq}) = \text{Emisiones de gas}_i(\text{Kg GEI}) * PCC_{100,i}\left(\frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{Kg GEI}}\right)$$

Tabla 14: Potencial de calentamiento global de gases efecto invernadero en un horizonte de tiempo de 100 años.

Gas	PCG a 100 años (Kg CO ₂ eq/Kg gas)
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Fuente: IPCC (2007). “Climate Change 2007: Physical Science Basis”

Una vez calculada la huella de carbono para cada gas efecto invernadero en unidades de CO₂ equivalente, se procederá a sumar todas las emisiones para estimar la huella de carbono comunal, según la siguiente ecuación:

Ec 20:

$$\text{Huella de carbono final comunal}(\text{Kg CO}_2 \text{ eq}) = \sum \text{Huella carbono GEI } i (\text{Kg CO}_2 \text{ eq})$$

Impactos

Los impactos que tendrá la reducción de emisiones por leña en la comuna se pueden clasificar en impactos locales, producidos por la disminución de material particulado, e impactos globales, producidos por la disminución de gases efecto invernadero.

a) Impactos locales

Para determinar si los impactos locales asociados a la reducción de las emisiones de material particulado son suficientes para generar un cambio realmente positivo en la calidad del aire de la comuna, debemos responder la siguiente pregunta:

¿La reducción de emisiones calculada es suficiente para cumplir con los límites anuales de la Norma Primaria de Calidad del aire de MP_{2,5} y MP₁₀?

Para responderla se utilizará la metodología utilizada en el AGIES del PDA de los autores Noel de Never and J. Roger Norris, 1975.

Ec. 21:


$$FEC_p = \left(\frac{\partial C_p}{\partial E_p} \right)^{-1} \approx \frac{E_p}{C_p}$$

Dónde:

FEC_p = Factor emisión concentración contaminante p [(ton/año)/(μg/m³)]

C_p = Concentración ambiental del contaminante p (μg/m³)

E_p = Emisión del contaminante p (ton/año)

El FEC indica las toneladas necesarias de contaminante para aumentar en 1 μg/m³ el promedio anual de concentración de material particulado.

Ec. 22:

$$\frac{E_{pi}}{C_{pi}} = \frac{E_{pf}}{C_{pf}}$$

E_{pi} es la cantidad de emisiones de un contaminante p (en este caso el $MP_{2,5}$ y MP_{10}) sin reemplazo de leña, o sea las actuales en la comuna, que se calculan anteriormente.

C_{pi} es la concentración actual de material particulado en la comuna, o sea, sin reemplazo de leña. Este dato se obtendrá de la página del SINCA.

E_{pf} es la cantidad de emisiones de material particulado una vez reemplazada la leña por biogás, que se calculan anteriormente.

C_{pf} es la concentración de emisiones luego del reemplazo de leña por biogás.

El valor de C_{pf} se comparará con los valores de la Norma Primaria de calidad del aire para $MP_{2,5}$ y MP_{10} , para corroborar o descartar su cumplimiento y los impactos asociados a cada caso.

b) Impactos Globales

Para determinar los impactos globales de la reducción de gases efecto invernadero se revisa:

-El Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018.

Se compara la disminución de emisiones de GEI en la comuna con valores regionales de emisión y el respectivo aporte comunal de disminución.

-Acuerdo de París (2015) COP 21

En este acuerdo firmado se indica que Chile se compromete al 2030, a reducir sus emisiones de CO_2 por unidad de PIB en un 30% con respecto al nivel alcanzado en 2007, considerando un crecimiento económico futuro que le permita implementar las medidas adecuadas para alcanzar este compromiso.

Se analizó la magnitud de la disminución de gases efecto invernadero comparados con este compromiso, y cuál sería el aporte de la comuna para poder cumplirlo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización de la leña

4.1.1. Cantidad

Según la encuesta CASEN, la cantidad de hogares en la zona urbana de la comuna de Los Ángeles es de 56.013 (CASEN, 2017), mientras que el consumo promedio de leña por vivienda es de 1.869 kg leña/ año-hogar (CDT, 2015), con una penetración de leña en la zona urbana en la comuna de 85,8%. Esto aporta con una cantidad total de leña consumida de 89.822,6 ton/año (CDT, 2015)

4.1.2. Poder calorífico

Se considerará un poder calorífico inferior de la leña de 3500 kcal/kg (ACEE, s.f.).

4.1.3 Distribución consumo leña a distintos niveles de humedad

Tabla 15: Distribución de consumo de leña a distintos niveles de humedad.

Húmeda	Semihúmeda	Seca
10%	70%	20%

Fuente: PDA regionales.

A pesar de los esfuerzos por regularizar el mercado de la leña expuestos en el marco teórico, los valores de consumo de leña húmeda reflejan claramente que las medidas no han tenido los resultados esperados.

4.2. Producción de biogás

A partir de datos de generación anual de basura domiciliaria de los años 2016, 2017, 2018 y 2020 declarados en la ventanilla única del Registro de Transferencia de Contaminantes se obtuvo un promedio de generación de 62.827 ton/año de basura. Se consideró este dato debido a que se considera más representativo, ya que los datos declarados a lo largo de estos años no muestran una tendencia clara de aumento o disminución de residuos.

La siguiente figura muestra el proceso jerárquico de obtención de datos para la determinación de la producción de biogás.

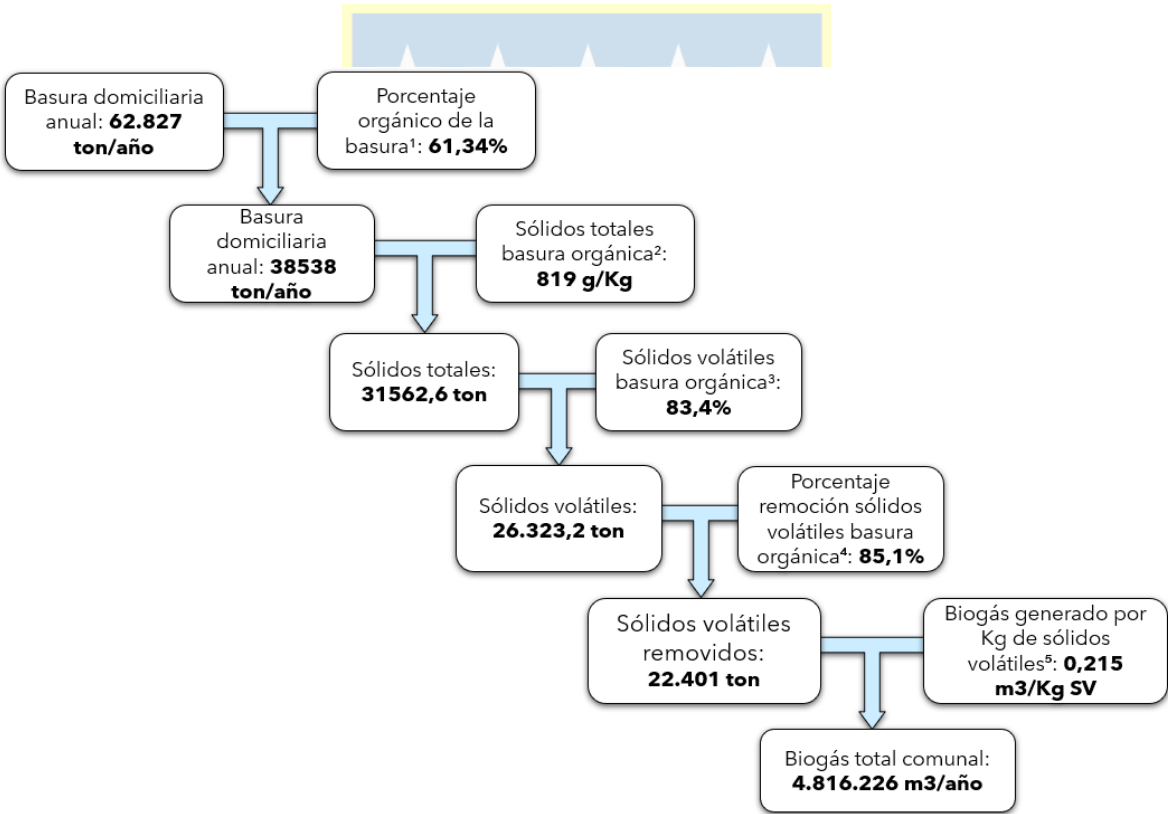


Figura 7: Diagrama cronológico de obtención de datos.

Fuente: Elaboración propia.

¹Amb. & Energía Industrial Ltda., 2009

²Forster, 2005

³Aparna & Monoj, 2015

⁴Fongsatitkul, Elefsiniotis & Wareham, 2010

⁵ Pavi et al. 2017

Para la obtención de biogás a partir de la basura orgánica de la comuna se consideraron los parámetros más relevantes e influyentes del proceso, tales como la cantidad de sólidos volátiles en la basura orgánica, o los sólidos removidos, que finalmente representa la cantidad de sólidos que fueron degradados en el proceso.

Las 38.535 ton/año de basura orgánica que se producen en Los Ángeles se pueden producir 4.816.226 m³ de biogás, es decir, por cada tonelada de basura orgánica se pueden producir 125 m³ de biogás.

4.3 Reemplazo de leña por biogás

4.3.1 Energía consumida de la leña

a) Eficiencia térmica de los artefactos

A continuación, se presenta la eficiencia térmica de los principales artefactos de combustión de leña.

Tabla 16: Eficiencia térmica de artefactos

Equipo	Eficiencia térmica
Cocina a leña	40%
Calefactor a leña con templador	70%
Calefactor a leña sin templador	60%

Fuente: Elaboración Propia.

La mayor eficiencia térmica la tienen los calefactores a leña con templadores, debido a que este aparato permite que se produzca una mejor combustión de los gases, aprovechando mejor el calor disponible. Las cocinas a leña y los calefactores a leña no son artefactos modernos, por lo que no cuentan con sistemas de combustión o abatimiento de emisiones tan eficientes.

b) Poder calorífico de los artefactos

Tabla 17: Calor útil de cada artefacto

Artefactos	Calor útil (Kcal/Kg)
Calefactor a leña con templador	2450
Calefactor a leña sin templador	2100
Cocina a leña	1400

Fuente: Elaboración propia.

c) Distribución uso de artefactos

Debido a que bibliográficamente no se encontró registro de la cantidad de cada tipo de artefacto en la comuna; pero sí se encontró la cantidad de leña consumida en la totalidad de cada tipo de artefacto, se formularon los siguientes supuestos:

- I. El consumo de leña por cada artefacto es proporcional a la cantidad de artefactos
- II. La cantidad de artefactos es 1 por hogar
- III. El consumo de cada hogar es el expuesto en el punto 5.1.1

Adicionalmente, debido a que la información obtenida bibliográficamente está desactualizada (año 2005), se planteó un cuarto supuesto, en donde toda la leña combustionada en salamandras o chimeneas actualmente se consume en calefactores a leñas modernos con templador, debido a que esos artefactos están quedando obsoletos y actualmente en el mercado se venden sólo calefactores con sistemas de combustión modernos. Por lo que la distribución de uso de artefactos queda de la siguiente manera:

Tabla 18: Consumo total de leña por artefacto en la comuna de Los Ángeles.

Tipo de artefacto	Consumo (ton)	Porcentaje
Cocina a leña	5.024	11,06%
Combustión lenta-calefactor a leña sin templador	4.139	9,11%
Combustión lenta-calefactor a leña con templador	36.267	79,83%
Total	45.430	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Universidad Católica de Temuco (2009)

d) Energía útil de la leña

Utilizando el poder calorífico de la leña, la eficiencia térmica de los artefactos y la distribución de éstos se obtuvo un poder calorífico ponderado de 2302 kcal/kg. Al multiplicar este valor por la cantidad de leña consumida en la comuna se obtiene una energía útil comunal de 206.771.530.400 Kcal/año o 865,5 TJ/año.

En el Inventario Nacional de gases efecto invernadero se estima un consumo energético de leña a nivel nacional de 201.644 TJ/año por lo que el consumo energético a nivel comunal representa un 0,43% del consumo a nivel país.

4.3.2 Energía producida por el biogás

a) Energía útil del biogás

Poder calorífico: 5.600 Kcal/m³

Eficiencia térmica calefactor a gas con templador: 70%

Energía útil: 3.920 kcal/m³

Energía útil total comunal del biogás = 18.880 Gcal/año o 79,26 TJ/año

4.3.3 Reemplazo de leña por biogás

A continuación, se presenta la disminución progresiva de leña según la producción de biogás

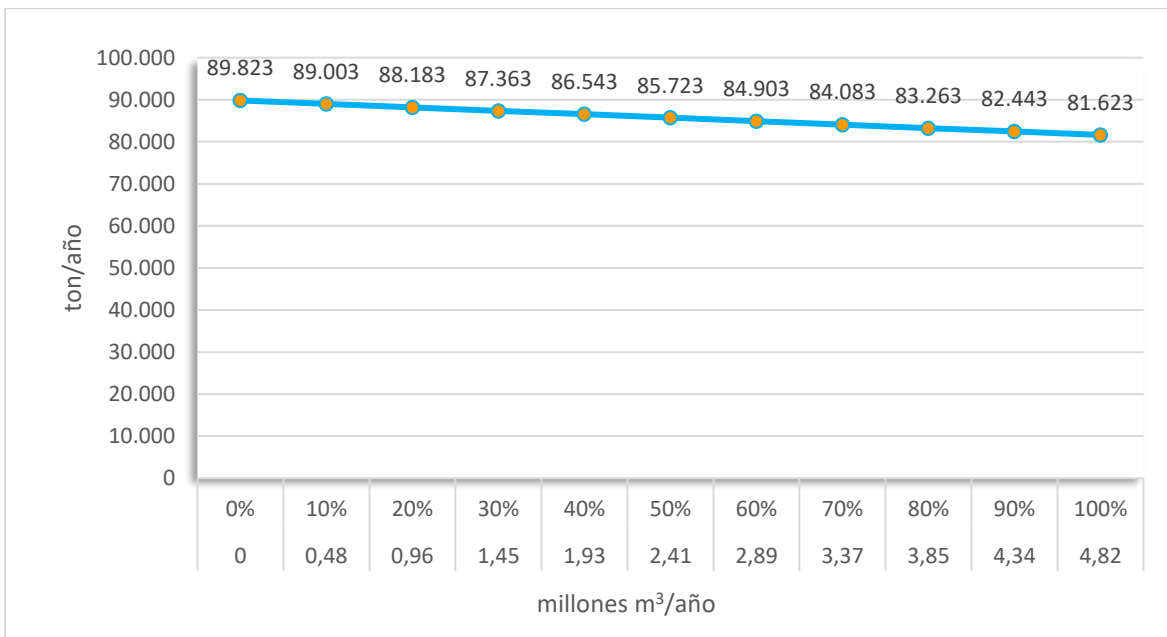


Figura 8: Disminución de leña según aumento en la producción de biogás.

La basura domiciliaria comunal tiene un potencial máximo de producción de biogás de 4,82 millones de m³ al año equivalentes a 79,026 TJ al año, es decir, el 9,13% de la energía útil comunal de la leña. En unidades másicas la energía del biogás equivale al reemplazo de 8.200 toneladas de leña, por lo que 1 m³ de biogás es equivalente a 1,7 kg de leña.

4.4. Emisiones evitadas

4.4.1 Emisiones de material particulado

a) Factores de Emisión

Tabla 19: Factores de emisión para MP₁₀ y MP_{2,5} según humedad y artefacto.

Artefacto	Contaminante	Factores de emisión SICAM		
		Leña seca	Leña semihúmeda	Leña húmeda
Cocina a leña	MP ₁₀	19,2	30,9	90,1
	MP _{2,5}	18,6	30,1	87,6
Calefactor a leña sin templador / Calefactor a leña con templador	MP ₁₀	15,0	24,2	72,0
	MP _{2,5}	14,6	23,5	69,9

Fuente: SICAM Ingeniería.

Como se muestra en la tabla 20, la influencia de la humedad de la leña en las emisiones no aumenta de manera lineal, sino que exponencial. Es evidente que la leña húmeda es muchísimo más contaminante que la leña seca, llegando a superarla hasta 4 veces.

Tabla 20: Factores de emisión de MP₁₀ y MP_{2,5} ponderados.

Contaminante	Factor de emisión ponderado
MP ₁₀	27,95
MP _{2,5}	27,21

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre los factores de emisión ponderados es bastante menor, debido a que cada factor de emisión es la influencia de la combinación de las distintas distribuciones de consumo de leña a distintos niveles de humedad.

c) Emisiones

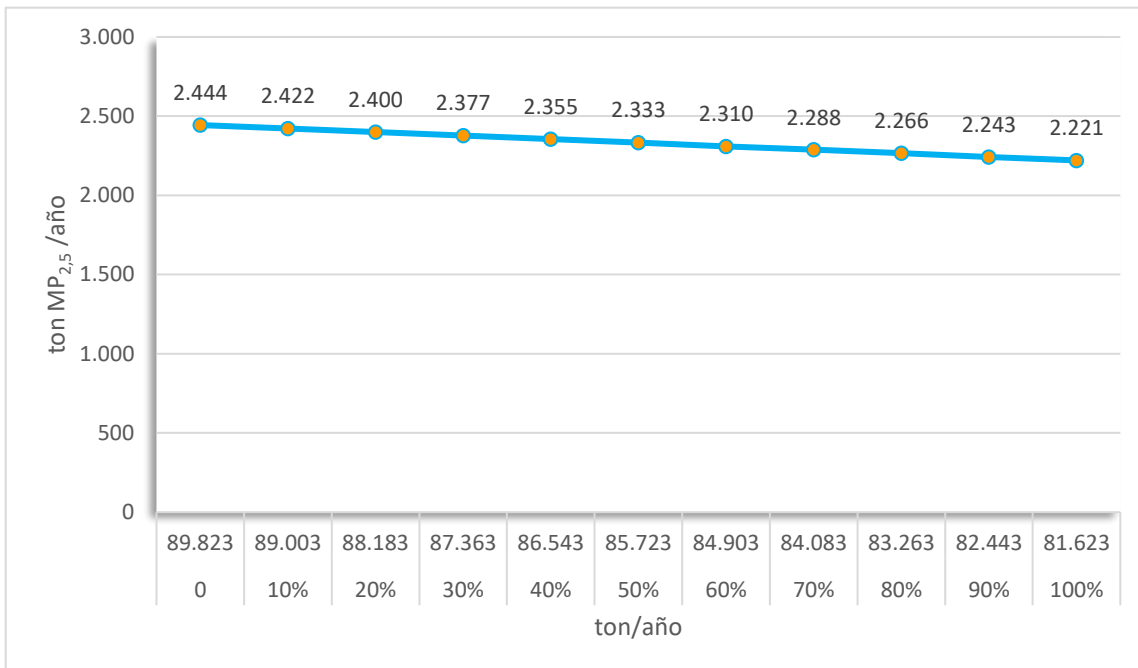


Figura 9: Disminución de emisiones de MP_{2.5} dada la disminución de leña.

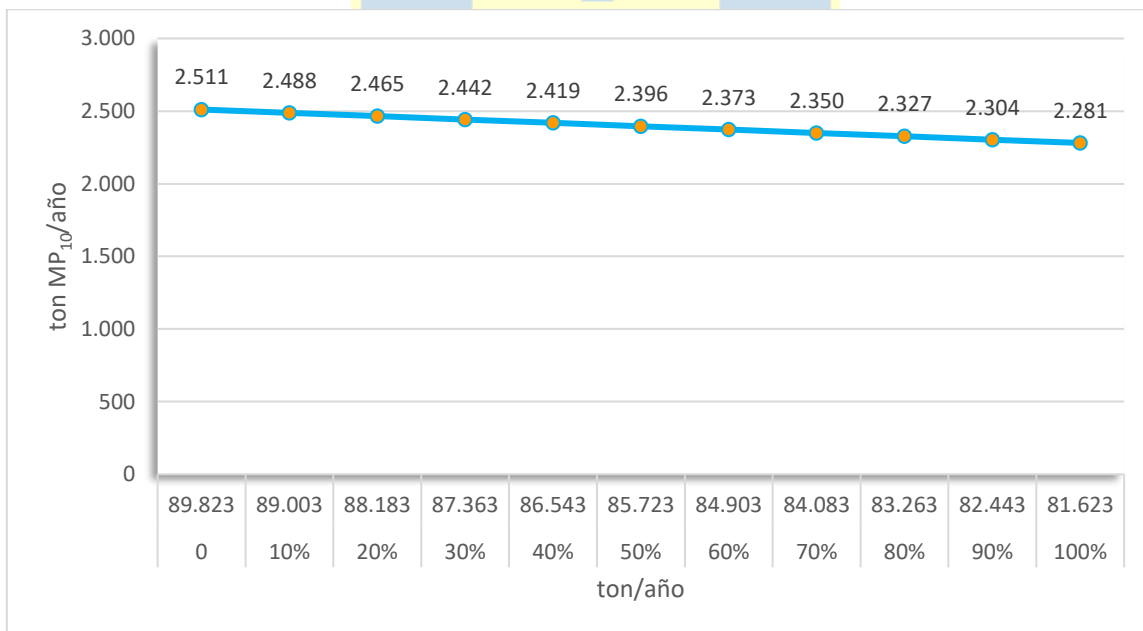


Figura 10: Disminución de emisiones de MP₁₀ dada la disminución de leña.

Las emisiones de $MP_{2,5}$ y MP_{10} se reducen en un 9% y un 4,7% considerando al 100 y 50% el potencial de reducción de leña, respectivamente. Existe una disminución de aproximadamente 22 a 23 ton/año de $MP_{2,5}$ por cada 10% en la disminución de leña, con un total de 223 ton/año disminuidas.

En el caso del MP_{10} , las emisiones se reducen en 230 ton/año. Las emisiones de MP_{10} son ligeramente mayores a las de $MP_{2,5}$ debido a sus factores de emisión.

c) Fiabilidad de resultados

La Unidad de Calidad del aire de la Universidad Católica de Temuco y SICAM Ingeniería también han calculado la cantidad de emisiones de la comuna con los siguientes resultados:

SICAM Ingeniería (2012):

MP_{10} : 4.032 ton/año; $MP_{2,5}$: 3.919 ton/año

Universidad Católica de Temuco (2015):

Escenario optimista:

MP_{10} : 1.638 ton/año; $MP_{2,5}$: 1593 ton/año

Escenario pesimista:

MP_{10} : 4.937 ton/año; $MP_{2,5}$: 4.800 ton/año

Este proyecto:

MP_{10} : 2.511 ton/año; $MP_{2,5}$: 2.444 ton/año

A pesar de la diferencia de resultados entre los tres proyectos, se consideran resultados dentro de una variabilidad normal. La cantidad de emisiones del estudio de SICAM Ingeniería son mayores a las de este proyecto; esto podría ser explicado debido al año en que se realizó el estudio, año en el cual no se aplicaba ninguna medida de mitigación de emisiones porque no existía el PDA, además de que el mercado de la leña era aún más irregular.

Por otro lado, el escenario pesimista del estudio de la Universidad Católica de Temuco considera un comportamiento en los patrones de consumo de la población de la comuna que se mantiene en el tiempo desde el año 2005 al 2015, sólo ajustado por el crecimiento poblacional, lo que podría explicar también los valores superiores de cantidad de emisiones respecto a este proyecto.

Por último, el escenario optimista del estudio de la universidad considera un uso de 100% de leña seca, lo que difiere del escenario actual en la comuna, lo que explicaría una menor cantidad de emisiones.

Por lo que se puede considerar que las cantidades de emisiones obtenidas en cada proyecto coinciden de manera lógica con sus planteamientos.

4.4.2 Emisiones de Gases Efecto Invernadero

a) Factores de Emisión

Se seleccionaron los factores de emisión dispuestos en las directrices del IPCC de gases efecto invernadero del año 2006, específicamente el capítulo 2: “Combustión Estacionaria” del Volumen 2: “Energía”. Los factores de emisión de presentan en la siguiente tabla:

Tabla 21: Factores de emisión de leña y biogás para gases efecto invernadero

Contaminante	Factores de emisión según combustible	
	Leña	Biogás
CO ₂	112.000	54.600
CH ₄	300	5
N ₂ O	4	0,1

Fuente: IPCC (2006).

b) Emisiones

A continuación, se presenta la reducción de emisiones dada la cantidad de leña disminuida, las emisiones de biogás dada la producción de éste y las emisiones finales.

Disminución de emisiones por leña:

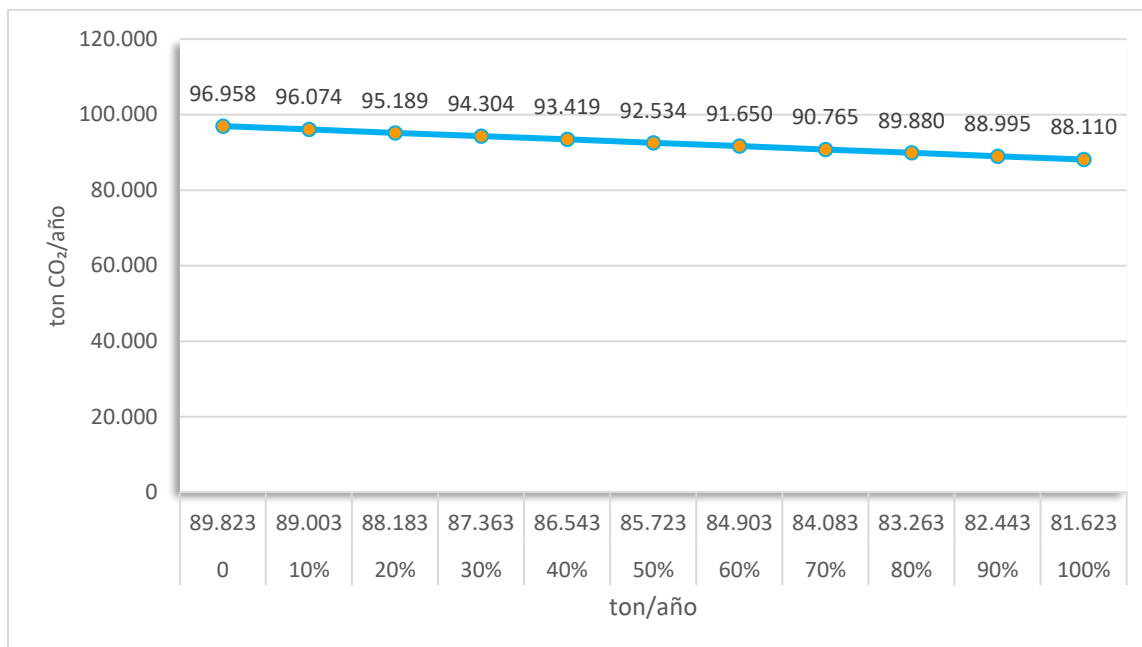


Figura 11: Disminución de emisiones de CO₂ dada la disminución de leña.

Las emisiones de CO₂ se reducen en aproximadamente 885 ton/año por cada 10% en la disminución de leña, con una reducción total de 8.848 ton y 4.424 ton para una disminución de leña de un 50%. La reducción total de emisiones respecto a las iniciales es de un 9,13%.

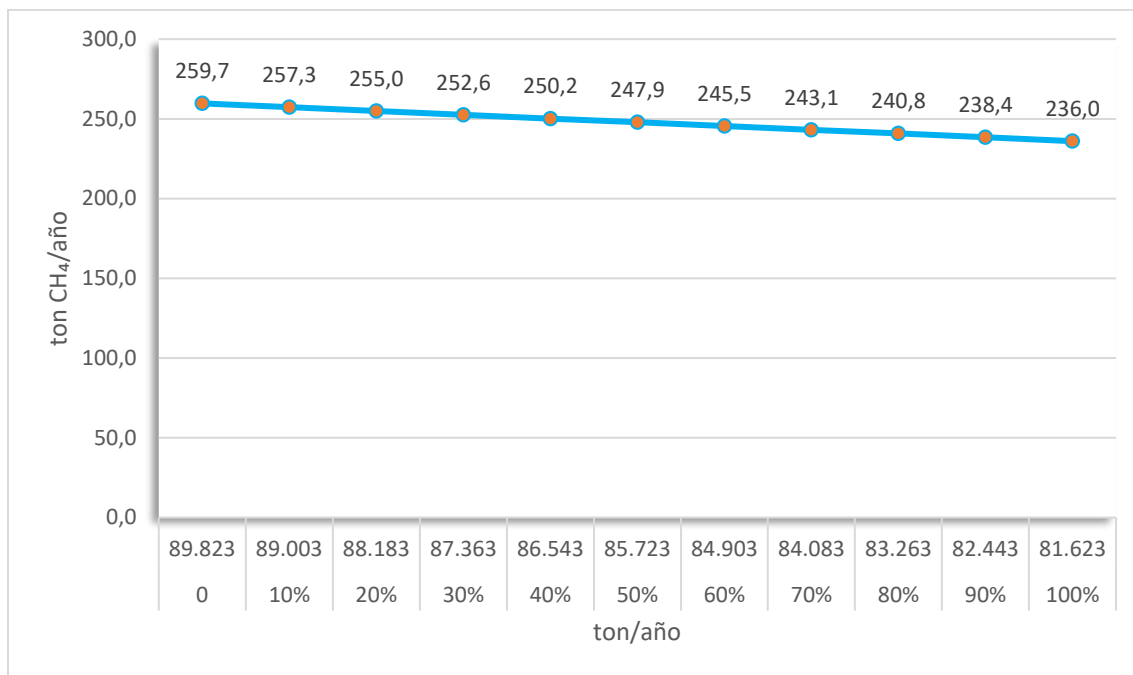


Figura 12: Disminución de emisiones de CH₄ dada la disminución de leña.

Las emisiones de CH₄ se reducen en aproximadamente 2,4 ton/año por cada 10% en la disminución de leña, con una reducción total de 23,7 ton, y 11,8 ton para una disminución de leña de un 50%. La reducción total de emisiones respecto a las iniciales es de un 9,13%.

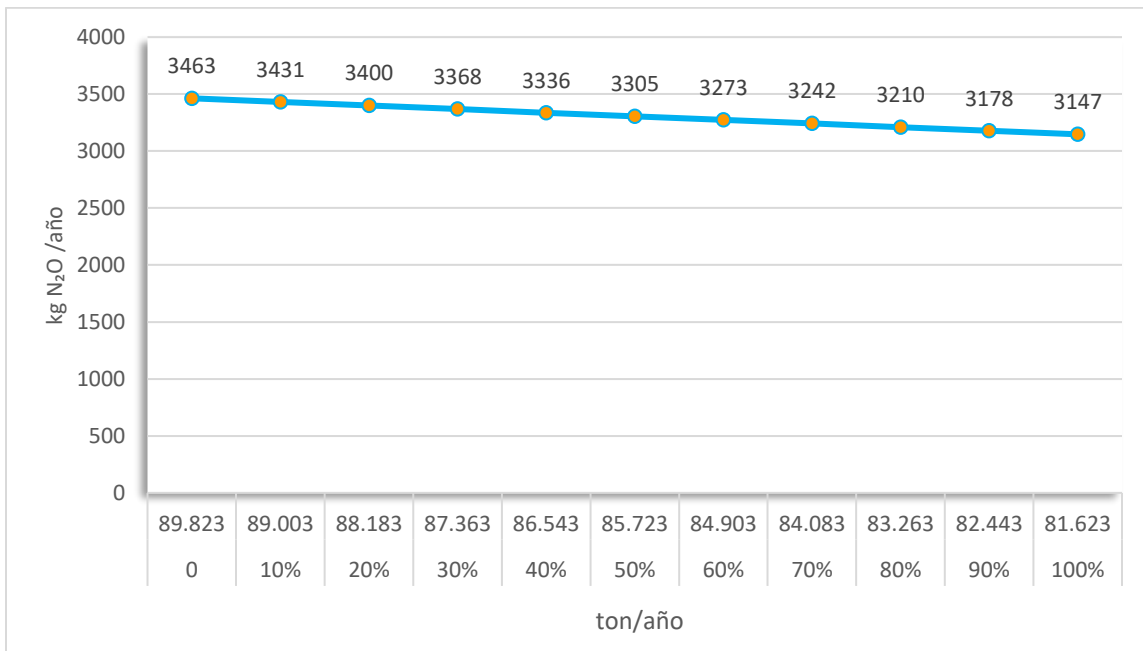


Figura 13: Disminución de emisiones de N₂O dada la disminución de leña.

Las emisiones de N₂O se reducen en aproximadamente 32 kg/año por cada 10% en la disminución de leña, con una reducción total de 316 kg y 158 kg para una disminución de leña de un 50%. La reducción total de emisiones respecto a las iniciales es de un 9,13%.

Emisiones por biogás:

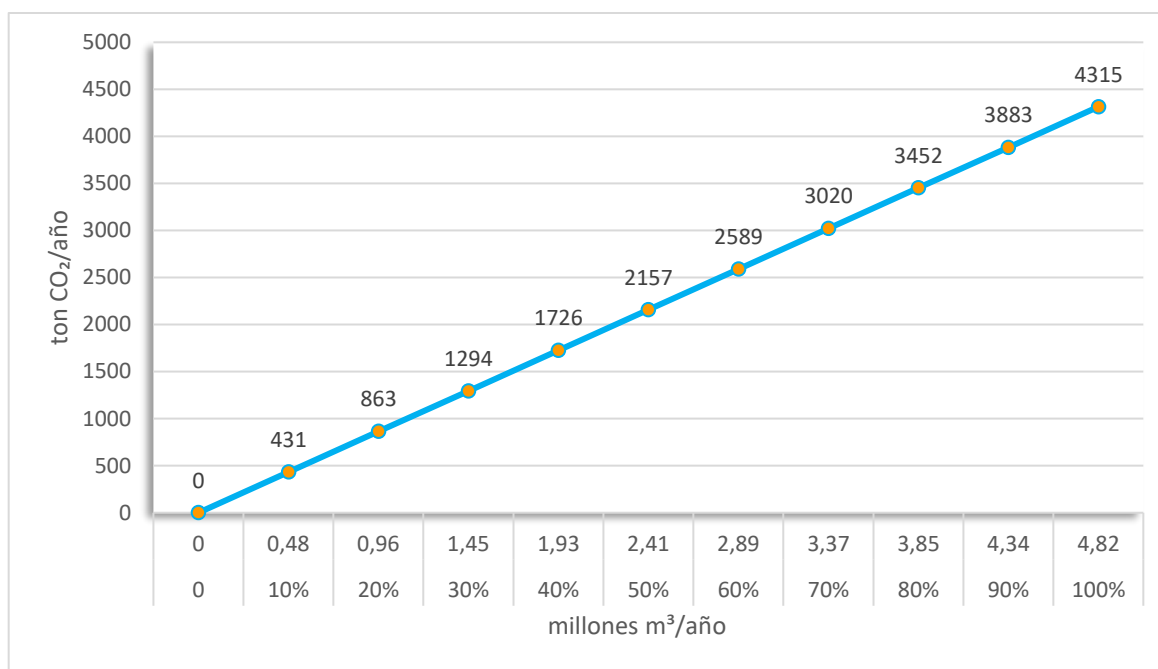


Figura 14: Emisiones de CO₂ dada la producción de biogás.

El aumento en las emisiones de CO₂ por biogás es de 431 ton/año por cada aumento en un 10% en la implementación de biogás, generando 2.157 ton/año al 50% del potencial y 4.315 ton/año al 100% del potencial.

El aumento de 4.315 tonCO₂/año generado por el biogás representa el 48,8% del total de emisiones evitadas gracias a la disminución de leña, por lo que, en este caso, el biogás representa un gran aporte de emisiones, disminuyendo a la mitad el potencial de disminución en la contaminación por CO₂ que se logra sólo por la disminución del consumo de leña.

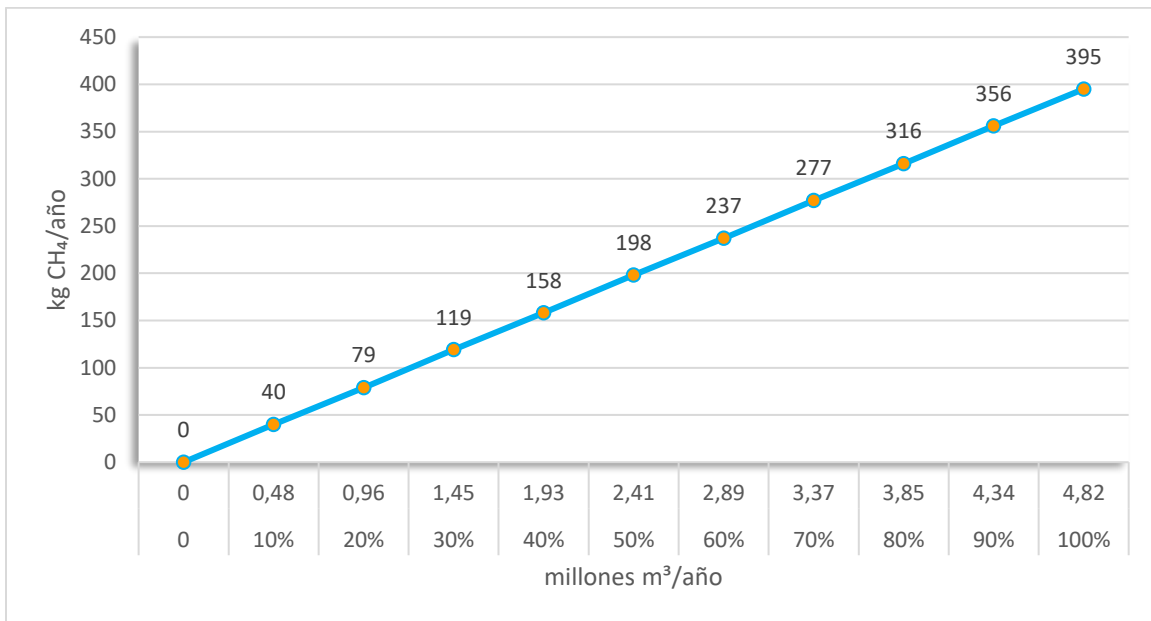


Figura 15: Emisiones de CH₄ dada la producción de biogás.

El aumento de emisiones de CH₄ por combustión de biogás es de 395 kg/año al 100% del potencial y 198 kg/año al 50% del potencial, con un aumento en 39 a 40 kg por año por cada 10% de aumento en la implementación de biogás.

Los 395 kg/año producidos representan un 1,7% de las emisiones evitadas gracias a la disminución de leña, por lo que a diferencia del CO₂, el CH₄ no representa un gran aporte de emisiones por la implementación de biogás.

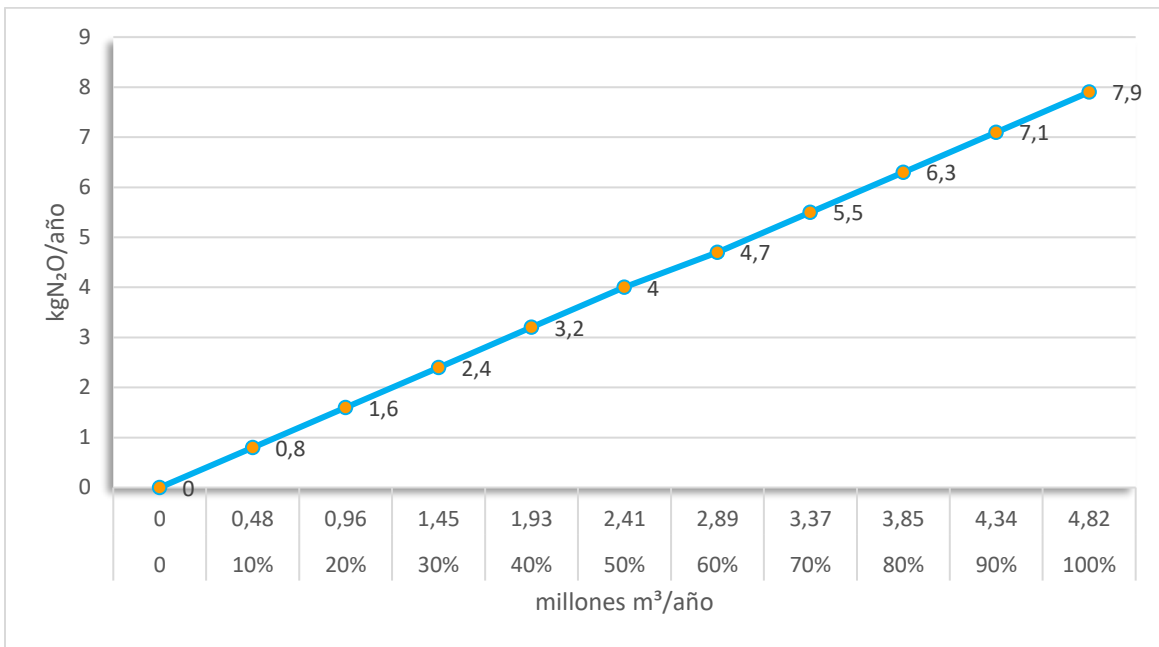


Figura 16: Emisiones de N_2O dada la producción de biogás.

Las emisiones totales al 100% de potencial de implementación de biogás son de 7,9 kg/año y de 4 kg/año al 50% del potencial, con un aumento de 0,7 a 0,8 kg por cada 10%.

Las emisiones de biogás representan un 2,5% de las emisiones evitadas gracias a la disminución de leña, por lo que al igual que el CH_4 , no representan un aporte significativo de emisiones contaminantes.

Emisiones totales:

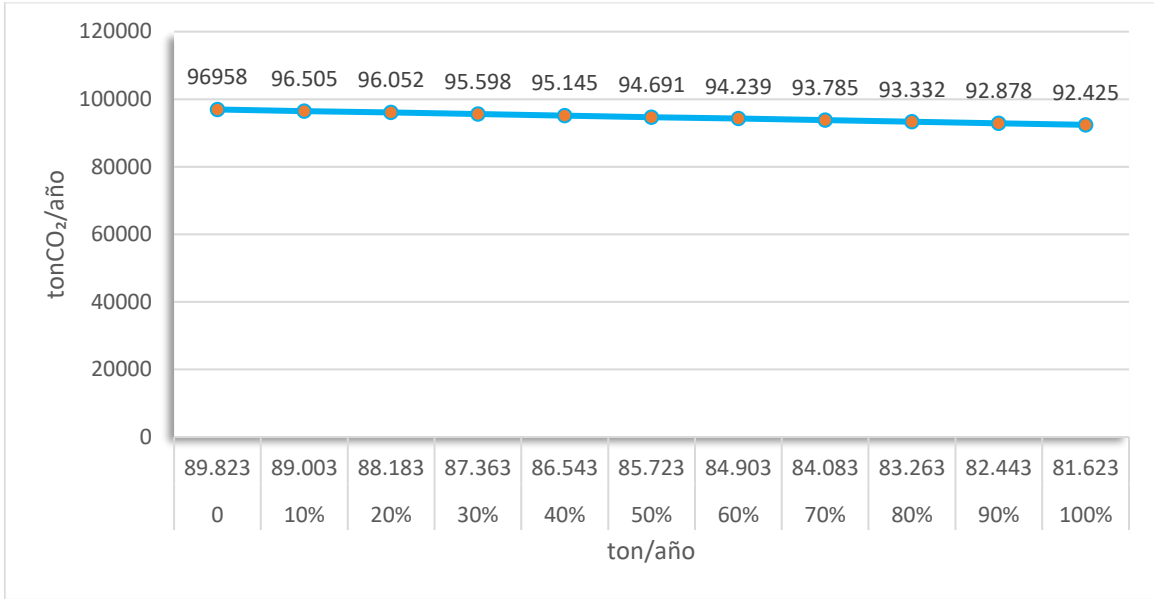


Figura 17: Disminución total de emisiones de CO₂.

La disminución de emisiones de CO₂ por disminución de leña, baja desde un 9,13% a un 4,7% gracias al aporte de emisiones por biogás debido a que su factor de emisión es bastante alto. La reducción total es de 4.533 ton/año.

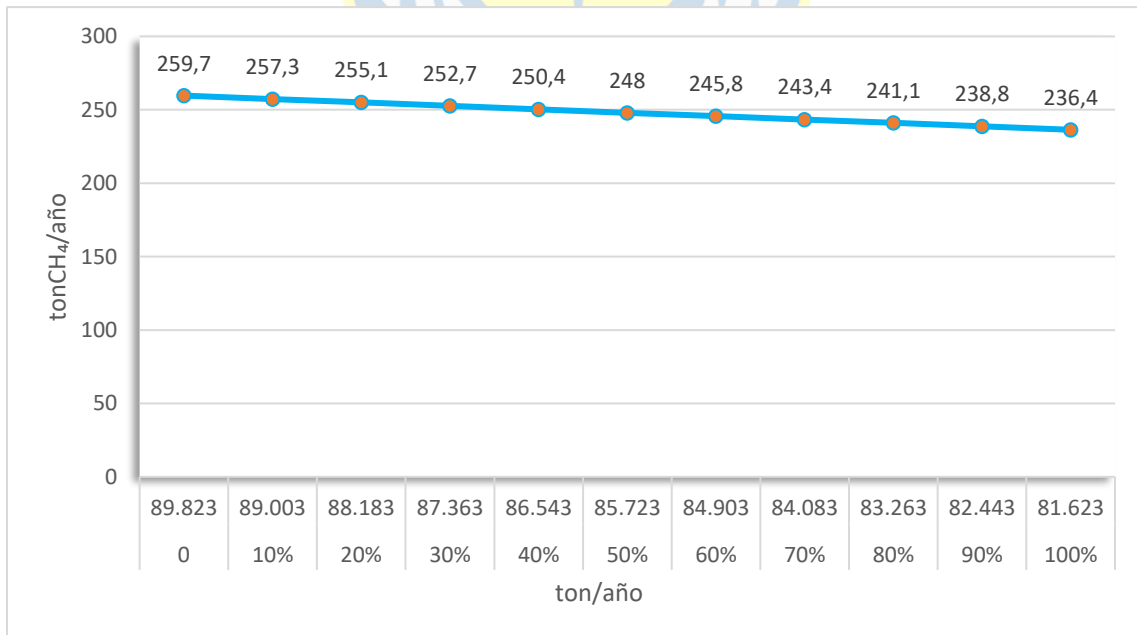


Figura 18: Disminución total de emisiones de CH₄.

La reducción total de emisiones de CO₂ es de un 8,97% equivalente a 23,3 ton/año, un poco menor que el 9,13% reducido sólo gracias a la leña, sin el aporte de biogás.

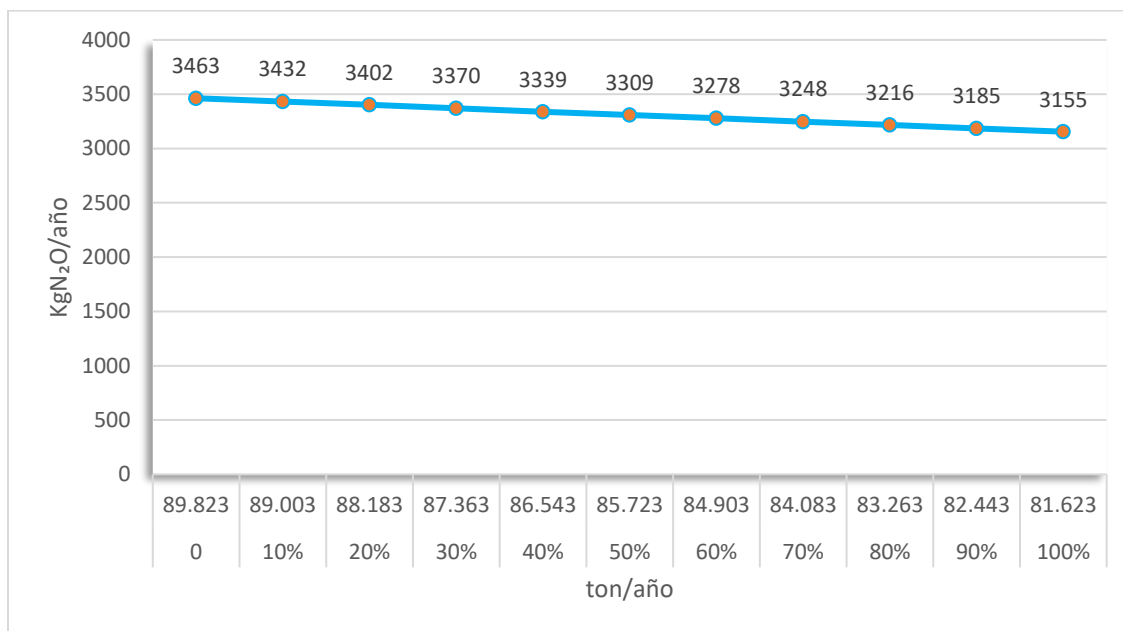


Figura 19: Disminución total de emisiones de N₂O.

La disminución total de emisiones de N₂O es de un 8,89%, equivalente a 308 kg/año, un poco menor que la disminución gracias sólo a la leña.

Las emisiones totales para cada contaminante considerando la disminución por reemplazo de leña y el aporte de la implementación de biogás son de 92.425 ton/año para CO₂, 236 ton/año para CH₄ y 3.155 kg/año para N₂O.

d) Huella de carbono

A continuación, se presenta la disminución final de la huella de carbono, considerando la disminución de emisiones por combustión de leña, más las emisiones producidas por la combustión de biogás.

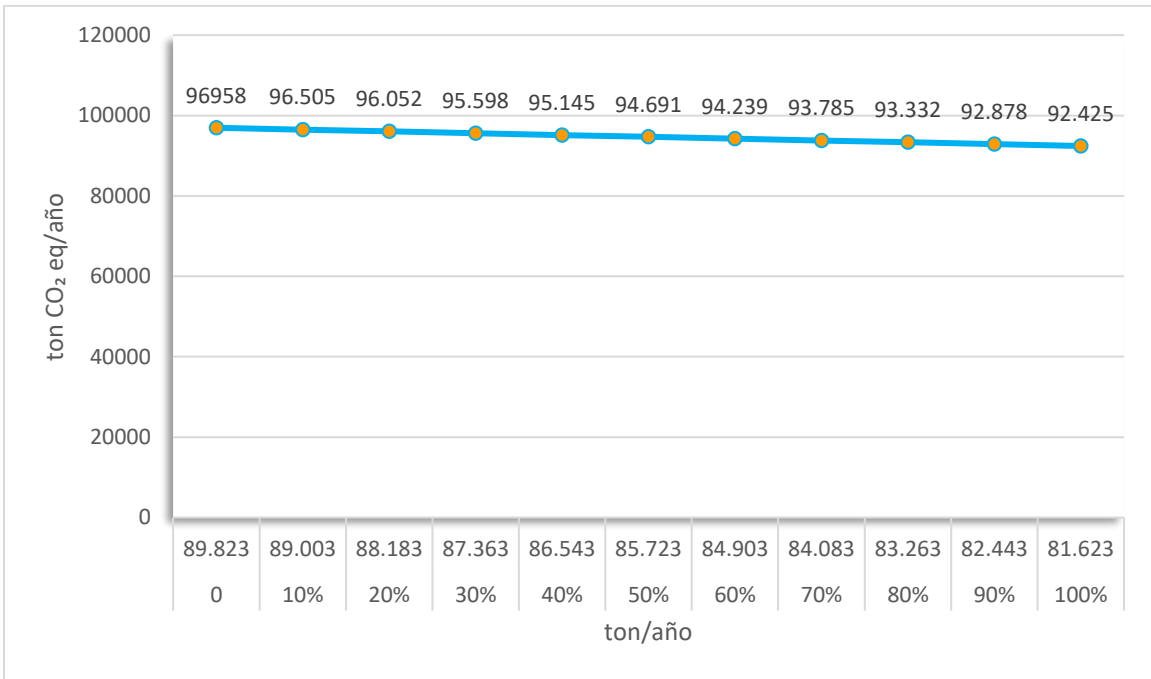


Figura 20: Disminución de la huella de carbono de CO₂ dada la disminución de leña y producción de biogás.

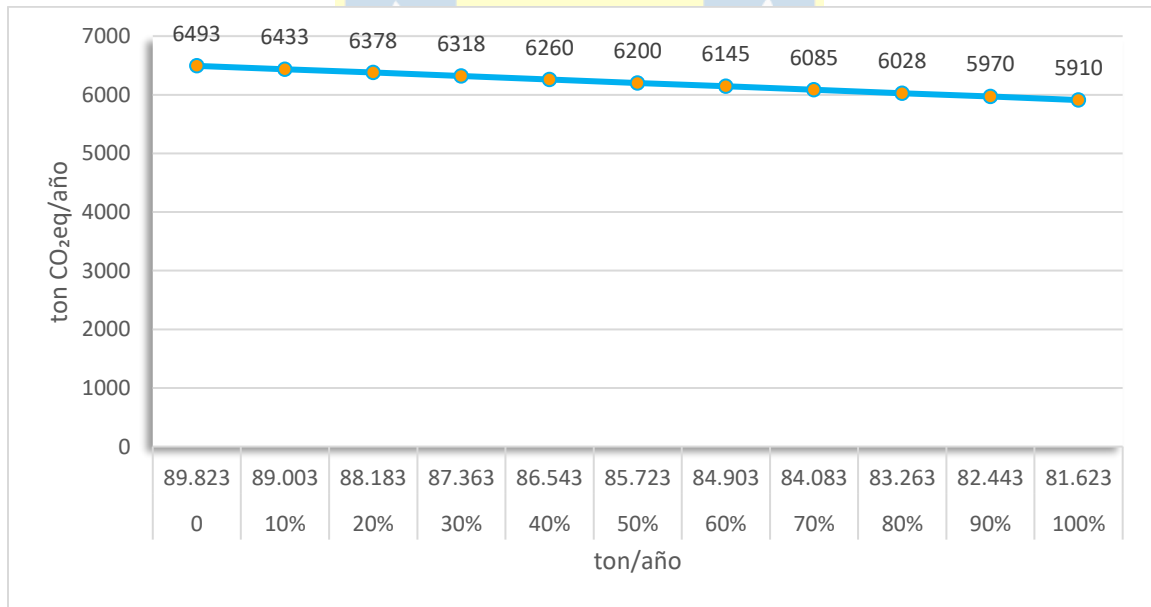


Figura 21: Disminución de la huella de carbono de CH₄ dada la disminución de leña y producción de biogás.

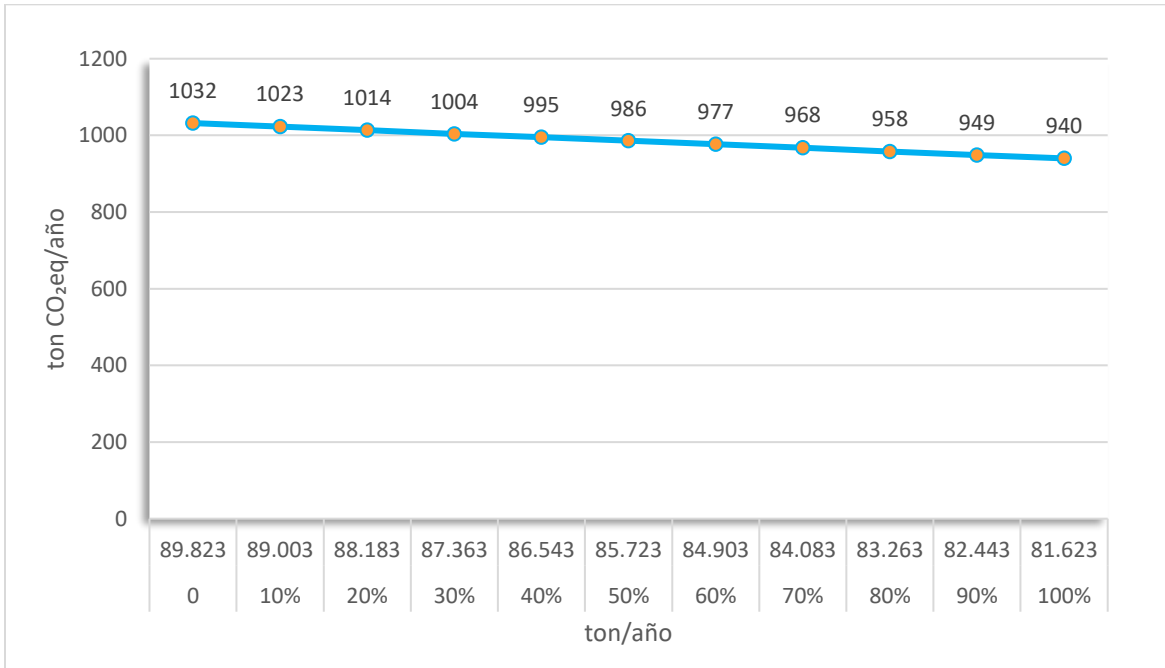


Figura 22: Disminución de la huella de carbono de N₂O dada la disminución de leña y producción de biogás.

La disminución de la huella de carbono, considerando las emisiones de biogás, son de un 4,68% para el CO₂, 8,98% para el CH₄ y 8,9% para el N₂O, equivalentes a 4.533, 583 y 940 ton/año, respectivamente.

La diferencia en porcentaje de disminución de huella de carbono respecto a la disminución de emisiones de 9,13% para cada contaminante se debe a su valor de potencial de calentamiento global. Además, la disminución en el caso del CO₂ es menor debido a que el factor de emisión del biogás para este contaminante es bastante mayor en comparación con el CH₄ y el N₂O.

d) Fiabilidad de los resultados

Actualmente existe poca información sobre las emisiones de gases efecto invernadero en la comuna de Los Ángeles, por lo que, a diferencia del material particulado, no se pueden hacer comparaciones para comprobar la veracidad de los resultados obtenidos en este proyecto.

El Sistema Nacional de Inventarios de Gases Efecto Invernadero cuenta con una base de datos de todo el país, la cual tiene información de las emisiones de GEI de cada región para cada categoría indicada por el IPCC, además de disponer de un Informe Nacional de Gases Efecto Invernadero. Sin embargo, este informe no especifica los aportes comunales.

4.5 Impactos de la reducción de emisiones

4.5.1 Impactos locales

Los impactos locales están condicionados por la concentración de material particulado, debido a que estos contaminantes tienden a concentrarse y mantenerse en la baja tropósfera de la zona donde son emitidos.

El material particulado es estudiado en unidades de concentración, por lo que se puede realizar un análisis de los impactos locales comparando las concentraciones antes y después del reemplazo de la leña. Las concentraciones de MP_{2,5} y MP₁₀ antes del reemplazo de leña por biogás se obtuvieron del SINCA, seleccionando la concentración promedio del año 2020, debido a que esta concentración ha sido influenciada y refleja las medidas aplicadas por el plan de descontaminación atmosférica de la comuna.

Las concentraciones para cada contaminante son las siguientes:

- Promedio concentración MP₁₀ año 2020: 43,81 µg/m³

- Promedio concentración MP_{2,5} año 2020: 27,48 µg/m³

A continuación, se presenta la disminución de concentración de MP_{2,5} y MP₁₀ dado el reemplazo de leña por biogás.

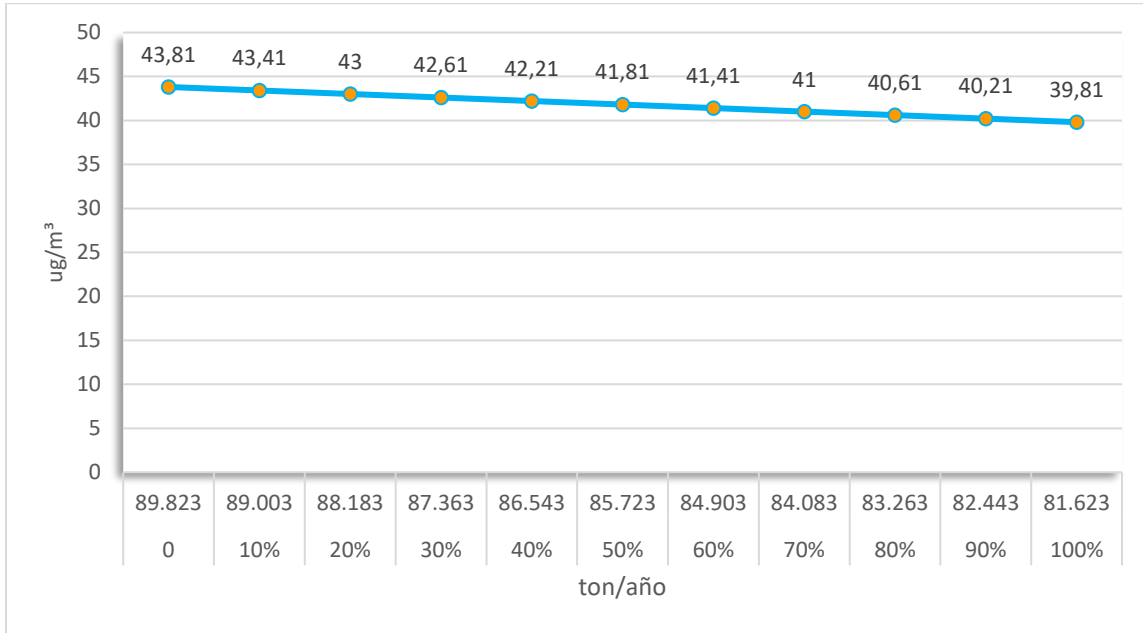


Figura 23: Disminución en la concentración de MP₁₀ dada disminución de leña.

La disminución en la concentración de MP₁₀ es de un 9,13% equivalente a 4 µg/m³ al 100% de potencial de disminución de leña, y de un 4,57% equivalente a 2 µg/m³ al 50% de potencial.

A pesar de que la concentración promedio anual del año 2020 está bajo del límite anual de la norma primaria de calidad ambiental de 50 µg/m³, se podría considerar como un aporte significativo la disminución en la concentración atmosférica de material particulado gracias al reemplazo de leña por biogás, incluso al 50% de potencial, debido a que será más difícil superar el límite de la norma en el caso de algún evento desfavorable que aumente la concentración anual, o que las medidas del PDA fallen o no sean efectivas con el paso del tiempo.

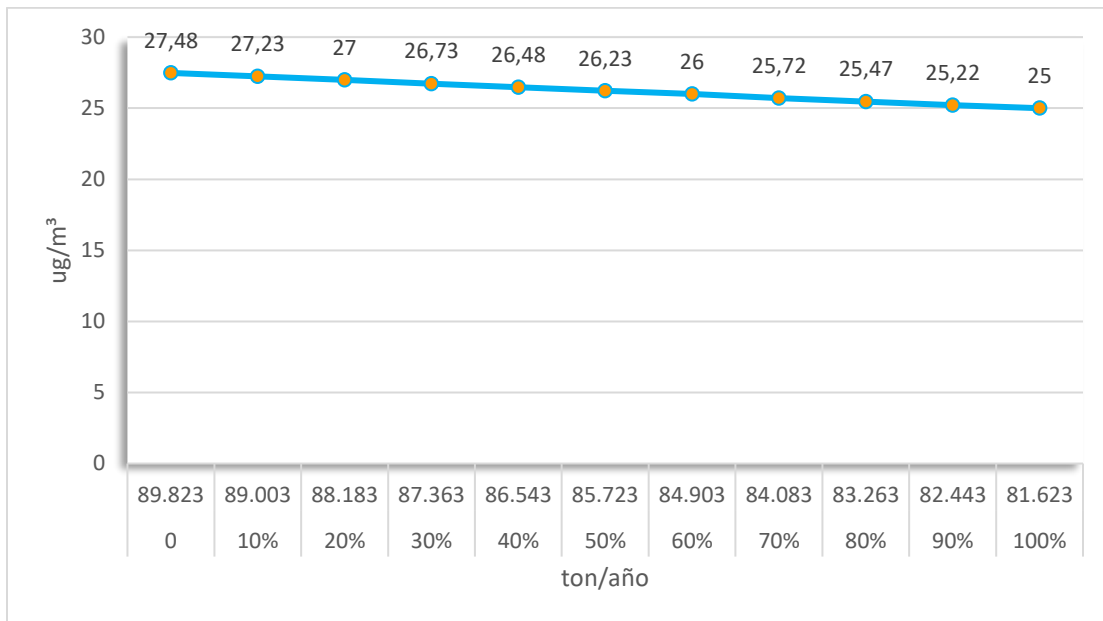


Figura 24: Disminución de la concentración de MP_{2,5} dada la disminución de leña.

La disminución en la concentración de MP_{2,5} es prácticamente igual que la de MP₁₀ con un 9% equivalente a 2,48 µg/m³ al 100% de potencial y un 4,55% equivalente a 1,25 µg/m³ al 50% de potencial de disminución de leña.

En este caso, el promedio anual de MP_{2,5} supera a la norma primaria de calidad del aire en 7,48 µg/m³. Esta concentración debe ser disminuida al 100% al año 2027, año en el que termina la vigencia del PDA de la comuna y en el que la concentración de MP_{2,5} debe ser menor a 20 µg/m³.

La concentración que se logra disminuir representa gran parte de este objetivo. De manera concreta, al reemplazar la leña por biogás, se aporta en un 33% la concentración que se debería disminuir para cumplir la norma al máximo potencial de disminución de leña, y un 16,7% al 50% de potencial. Se debe tener en cuenta que la concentración inicial de referencia es la concentración anual promedio del año 2020, debido a que este año es uno actual y representativo respecto a las medidas aplicadas en el PDA.

Beneficios para la salud

Un estudio de Wang et al. (2018) señala que un aumento en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración de $\text{MP}_{2,5}$ aumenta en un 0,87% los ingresos hospitalarios cardiovasculares, con una relación casi lineal.

Basados en este estudio, Remaggi, Mardones & Jiménez (2019) calcularon los aumentos en los casos de atenciones de urgencias respiratorias en la comuna de Los Ángeles por cada aumento en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} .

El aumento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ incrementa en 5.127 casos las atenciones de urgencia anualmente, mientras que el MP_{10} incrementa 3.890 casos. Cabe señalar que, no se debe evitar una doble contabilización de atenciones debido a que ambos contaminantes están estrechamente relacionados, por lo que, al considerar la influencia de ambos contaminantes a la vez, las atenciones aumentarían en 5546 casos.

A continuación, se presentan la cantidad de casos de atención respiratoria de urgencia evitados gracias a la disminución de las concentraciones de MP_{10} y $\text{MP}_{2,5}$ dado el reemplazo de leña por biogás.

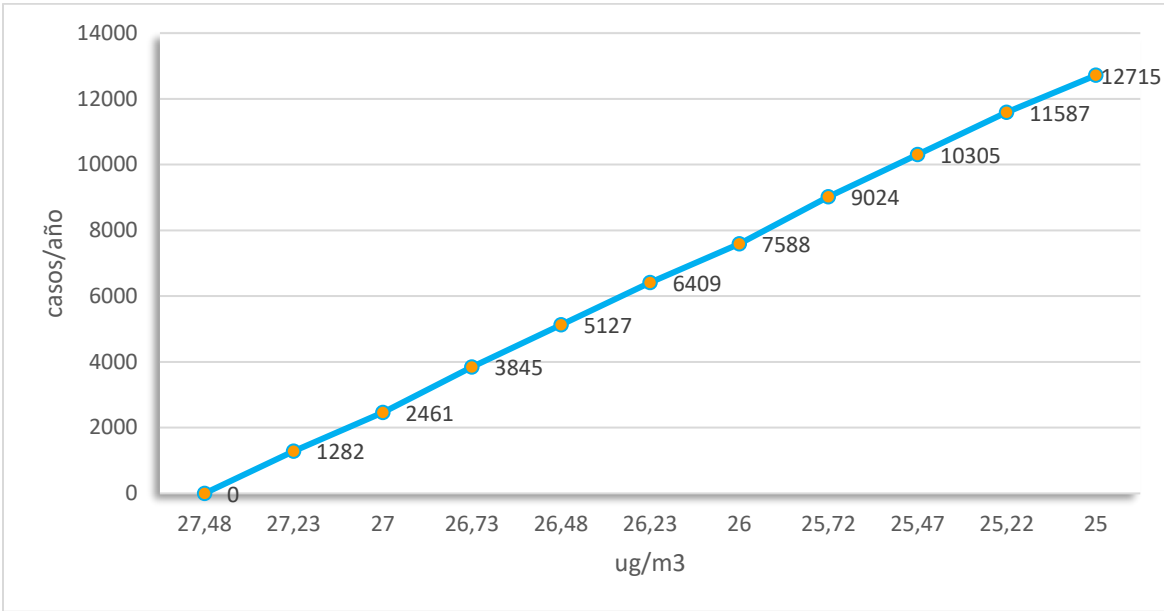


Figura 25: Aumento en la disminución de casos de urgencias respiratorias dada la disminución de MP_{2,5}.

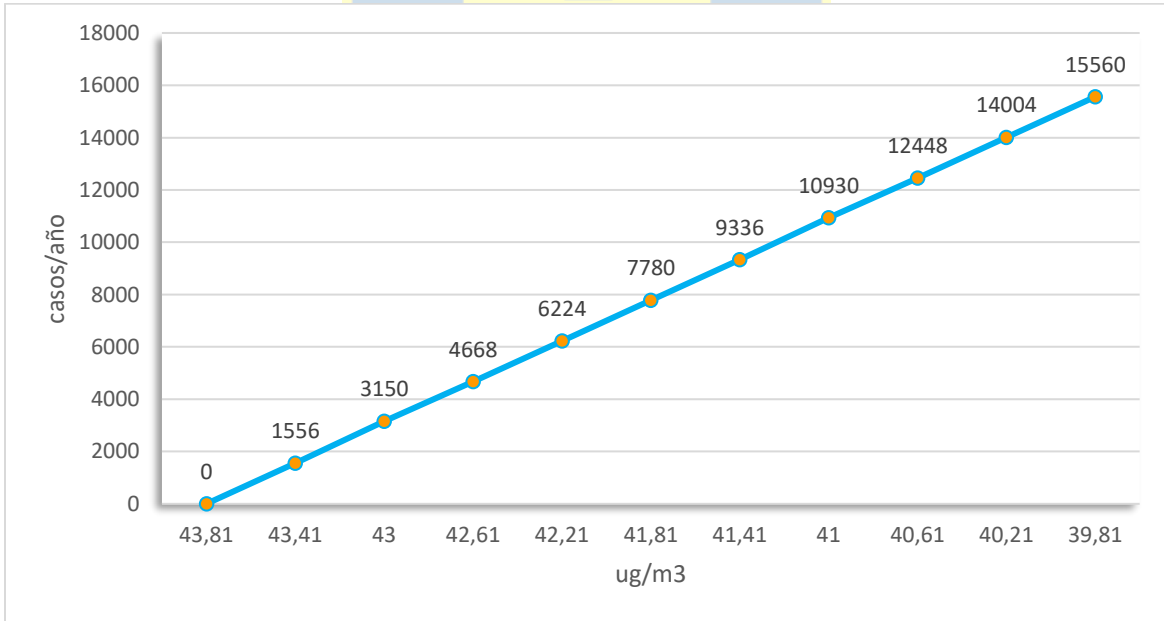


Figura 26: Aumento en la disminución de casos de urgencias respiratorias dada la disminución de MP₁₀.

4.5.2. Impactos globales

A diferencia del material particulado, los gases de efecto invernadero no tienen una relación cuantitativa definida entre la cantidad de emisiones y el daño concreto al medio ambiente que éstas pueden tener. Por otro lado, las consecuencias a nivel atmosférico de las emisiones de GEI no se analizan de manera local, sino que, de manera global, dado que las emisiones a nivel mundial contribuyen sinérgicamente al calentamiento global.

Actualmente se habla del presupuesto de carbono global, o sea el límite de cantidad de emisiones de carbono que se tiene permitido emitir para evitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C. Respecto a la temperatura media global del aire en superficie, la estimación del presupuesto de carbono es de 580 GtCO₂ para una probabilidad del 50 % de limitar el calentamiento a 1,5 °C, y de 420 GtCO₂ para una probabilidad del 66 % (nivel de confianza medio). En cambio, respecto a la temperatura media global en superficie, las estimaciones son de 770 y de 570 GtCO₂, para probabilidades del 50 % y del 66 % (IPCC, 2019).

En el contexto nacional, Chile se ha unido al acuerdo de París 2015 y se ha comprometido a la reducción de emisiones de CO₂eq en un 30% al año 2030, respecto al año base 2007. A continuación, se presenta la reducción en emisiones de CO₂eq gracias al reemplazo de leña por biogás.

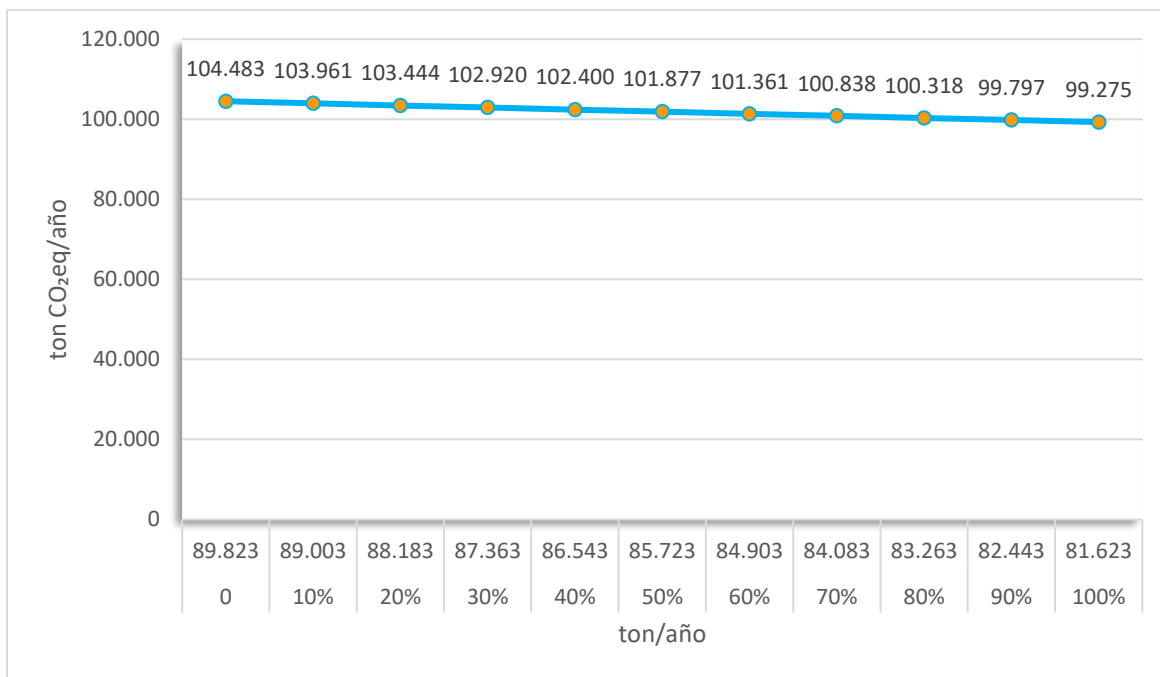


Figura 27: Huella de carbono inicial total y final total.

La huella de carbono final total representa las emisiones de totales de CO₂eq del CO₂, CH₄ y N₂O de la leña restante y el biogás luego del reemplazo. La disminución de la huella de carbono por leña residencial es de un 5%, equivalente a 5.208 ton/año de CO₂eq.

Debido a que no existe un inventario de gases efecto invernadero en la comuna, sólo es posible afirmar que existe un aporte para cumplir con el acuerdo de París; pero no se puede determinar cuantitativamente cuánto representa la disminución de la huella de carbono por disminución de leña respecto a la huella total comuna.

Sin embargo, acuerdo con un estudio realizado por CONAF (Terram, 2012), el eucalipto es capaz de capturar 29,9 ton/año CO₂ por hectárea y el siempre verde 17,1 ton/año. Por lo anterior, la disminución de la huella de carbono equivaldría a plantar una superficie de 174,17 hectáreas de eucalipto, lo que a su vez equivale a 3,87 veces la superficie de la Universidad de Concepción, en Concepción. También representaría una gran área de la zona urbana de la comuna de Los Ángeles, como se muestra a continuación:

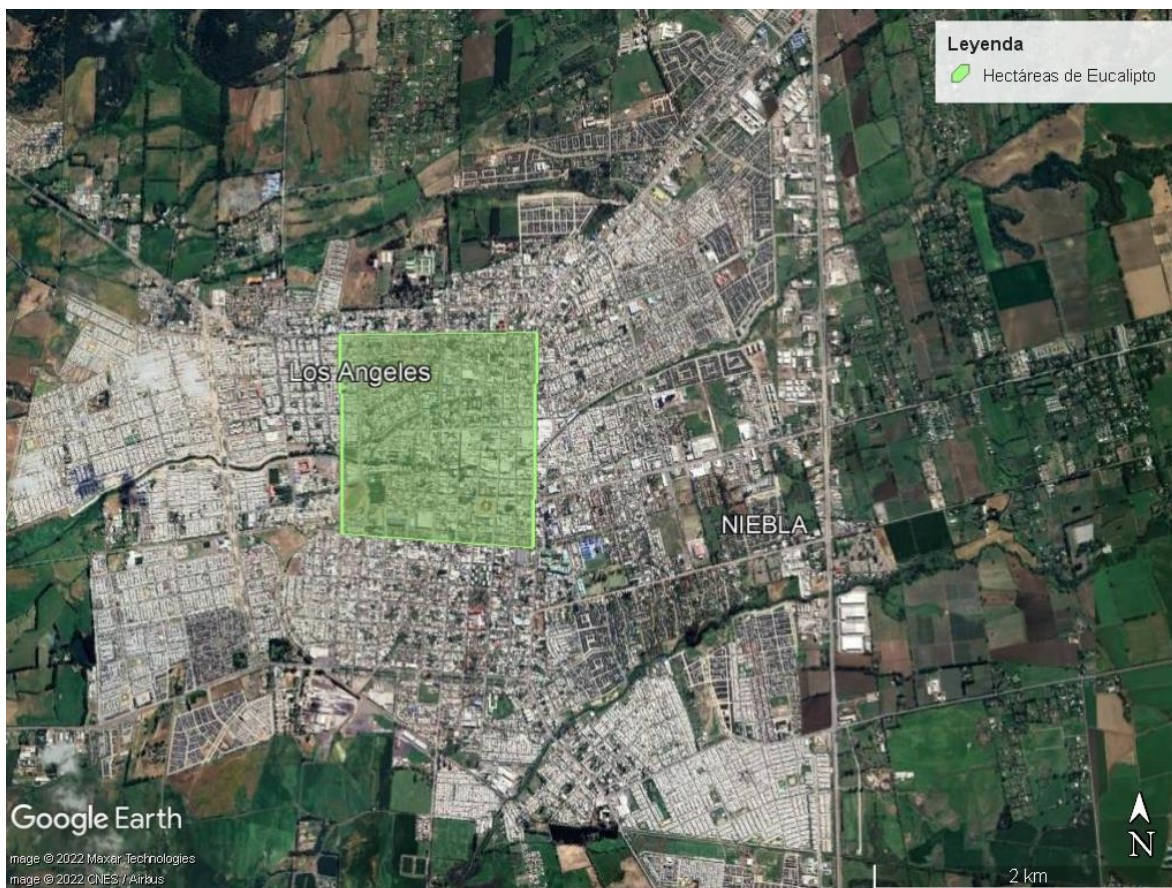


Figura 28: Mapa de representación de la zona equivalente a plantación de Eucalipto en la zona urbana de la comuna de Los Ángeles según la disminución de huella de carbono.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth Pro.

Por otro lado, de los 4.816.226 m³ al año producidos de biogás, 2.889.736 m³ corresponden a metano, por lo que al utilizar el biogás como combustible, se evitan emisiones de 47.464 tonCO₂eq/año producidas por la basura orgánica (teniendo en cuenta como supuesto que no exista ningún sistema de captación de emisiones).

Se estima que una vaca adulta produce 182,5 m³ o 120 kg de metano al año (Alfaro & Muñoz, 2012), por lo que la huella de carbono evitada anteriormente equivaldría a la huella anual de 15.821 vacas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ciudad de Los Ángeles registra un alto consumo de leña tal como se indicó en el marco teórico y como se corroboró en los resultados obtenidos de penetración de leña. Sin embargo, según los resultados de consumo de leña a distintos niveles de humedad, el consumo de leña seca está lejos del ideal de 100% siendo sólo un 20%, provocando así los altos niveles de contaminación atmosférica en la comuna.

La leña consumida por la población urbana corresponde a 89.823 ton/año mientras que el biogás producido corresponde a 4.816.226 m³/año (considerando un 100% de implementación de biogás), equivalente a 865,5 y 79 TJ/año respectivamente (energía útil), por lo que la energía producida gracias al biogás equivale a un 9,13% de la energía consumida por leña.

A pesar de que la energía útil producida por biogás es bastante menor, tiene un mejor rendimiento respecto a la de la leña. Esto es debido a su mayor poder calorífico y mayor eficiencia del artefacto destinado a la combustión del biogás.

Las emisiones de MP₁₀ y MP_{2,5} se reducen en un 9%. En el caso del MP₁₀ la concentración disminuye de 43,81 a 39,81 µg/m³. A pesar que ambos valores están por debajo de los límites establecidos por la norma primaria de calidad ambiental, la disminución de 4 µg/m³ asegura el cumplimiento de ésta, en el caso que la concentración aumente por algún evento crítico específico, el no funcionamiento de las medidas del PDA u otra causa.

Por otro lado, la disminución de emisiones de MP_{2,5} provocan una disminución en la concentración de este contaminante de 27,48 a 25 µg/m³, aportando en 1/3 respecto a la concentración que se debe disminuir para alcanzar el límite de la norma. Gracias a la disminución en la concentración de MP se pueden evitar de 12.000 a 16.000 casos de urgencias respiratorias, los cuales pueden llegar a transformarse en enfermedades graves o incluso provocar la muerte.

Respecto a los gases efecto invernadero, se logra disminuir las emisiones totales de CO₂ en un 4,7%, de CH₄ en un 8,97% y de N₂O en un 8,89%. Con una disminución total de la huella de carbono de un 5%, esto equivalente a 5.708 tonCO₂eq/año. El contaminante que más emisiones aporta es sin duda el CO₂, debido a que su factor de emisión en el biogás es bastante alto, con un valor aproximadamente de la mitad del factor de emisión de la leña, en contraste con los factores de emisión de CH₄ y el N₂O.

A pesar de lo anterior, la disminución de la huella de carbono equivale al aporte de 174,2 hectáreas de eucalipto, lo que podría traducirse en una superficie más grande de plantaciones de otras especies de árboles, debido a que el eucalipto es uno de los árboles que más CO₂ capta.

Dado que este proyecto persigue los mismos objetivos que el Plan de Descontaminación Atmosférica de la comuna y se desarrolla sobre muchos de sus datos, se recomienda en un proyecto futuro, evaluar los aportes del proyecto en paralelo con las medidas del PDA.

Por otro lado, debido a que los resultados de este estudio muestran sólo los valores totales anuales promedio, se recomienda calcular la disminución de emisiones y los impactos respectivos de una manera más específica y a mayor profundidad, considerando los diferentes patrones mensuales o estacionales de producción de basura o de consumo de leña y de esta manera obtener resultados más completos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Chilena de Eficiencia Energética (s.f). Capacidades Caloríficas de distintos combustibles y factores de conversión de Unidades. Recuperado de: <http://www.drto.cl/ACHEE/documentos/recursos/DireccionAnexo2.pdf>

Alberto Tama Franco (2009) Cocina de Inducción versus cocina a gas (GLP). Plan Nacional para el Buen Vivir. Link: https://www.researchgate.net/publication/324056283_COCINA_DE_INDUCCION_VERSUS_COCINA_A_GAS_GLP

Alfaro M. & Muñoz C. (2012) Ganadería y gases de efecto invernadero. Instituto de Investigaciones agropecuarias. Recuperado de: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcqlclefindmkaj/https://www.consorciolechero.cl/wp-content/uploads/2021/08/1-ganaderia-y-gases-de-efecto-invernadero.pdf>

ANGELIDAKI, I., AHRING, B., 1993. Anaerobic thermophilic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. Applied Microbiology and Biotechnology 38, 560 - 564.

Angelidaki, Y., Ahring, B.K. (1997a). Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future. III. Curso de Ingeniería Ambiental, Lleida, 336-342.

Asís, H., Dopazo, F. & Gianoglio Paulo. (s.f.). Producción de energía a partir de biogás obtenido a partir de residuos sólidos urbanos. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco, Grupo GISENER.

Bailis R., Ogle D., MacCarty N., & Still D. (2007). The Water Boiling Test (WBT). Household Energy and Health Programme, Shell Foundation. Recuperado de: [Microsoft Word - WBT Version 3.0.doc \(energypedia.info\)](#)

Bragança I., Sánchez S., Pantuzza G., Alves A. & Ratola N. (2020). Impurities in biogas: Analytical strategies, occurrence, effects and removal technologies. Biomass and Bioenergy. Volumen 143. Link: <https://www.sciencedirect->

com.ezpbibliotecas.udec.cl/science/article/pii/S0961953420304128?via%3Dihub#ib20

Bruun S., Stoumann L, Khanh V. & Sommer S. (2014). Digestores de biogás domésticos a pequeña escala: ¿Una opción para mitigar el calentamiento global o una potencial bomba climática? *Revisiones de energía renovable y sostenible*, Volumen 33. 736-741. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114001543?via%3Dihub>

Campos E., Illa J., Magrí A., Jordi P., Solé F. & Flotats X. (2004). Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. Agencia de residuos de Cataluña. Recuperado de: http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/dejeccions_ramaderes/guia_de_tractaments_de_les_dejeccions_ramaderes/guia_dejeccions_es.pdf

Cooperación de desarrollo tecnológico. (2015). Encuesta de consumo energético para calefacción y cocción en el sector residencial. Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado de: [Estudios utilizados para la elaboracion del PDA LA.pdf](http://Estudios_utilizados_para_la_elaboracion_del_PDA_LA.pdf) (mma.gob.cl)

Cortés A. & Ridley I. (2013). Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario. La ciudad de Temuco como caso de estudio. Revista INVI vol.28 no.78. Recuperado de: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-83582013000200008

Decreto N° 4 de 2017. [Con fuerza de ley]. Establece Plan de Descontaminación de la Comuna de Los Ángeles. 22 de febrero de 2017. D. N° 42263. Recuperado de: <https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/DN4-Establece-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-para-la-comuna-de-los-angeles.pdf>

Educar Chile. (s.f.). Leña. Aprende con energía. Recuperado de:

<https://www.aprendeconenergia.cl/lena/>

Escobedo J. (2011). Biogás como combustible alternativo para una estufa y un motor de un cilindro ciclo otto. [Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad San Carlos de Guatemala]. Biblioteca académica Universidad San Carlos de Guatemala. Recuperado de:

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0667_M.pdf

Esguerra, M. (1989). Experiencias prácticas con biodigestores de bajo costo para la generación de energía y el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo. Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Seminario FAO-CNRE: Tecnologías de producción de biogás, pág. 171-178. España.

Fundación Terram. (2012). Reportaje “Estudio establece las especies que más CO₂ capturan en Chile”. Recuperado de:

https://www.terram.cl/2012/11/estudio_establece_las_especies_que_mas_co2_capturan_en_chile/

Global Environment Facility, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2011). Recuperado de:

<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Hilbert J. (2016). Manual de producción de Biogás. Instituto Nacional de Energía Agropecuaria. Recuperado de: <https://documents.pub/document/manual-para-la-produccion-de-biogas-del-iirpdf.html>

IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R.

Mastrandrea, and L.L. White (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.

IPCC, 2018: Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].

Jelínek M., Mazancová J., Van Dung D., Phung L., Banout J. & Roubík H. (2021) Cuantificación del impacto del reemplazo parcial de combustibles tradicionales para cocinar por biogás en el calentamiento global: evidencia de Vietnam. *Revista de producción más limpia, Volumen 292*. Recuperado de: [https://www-sciencedirect-com.ezpbibliotecas.udec.cl/science/article/pii/S0959652621002274?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com.ezpbibliotecas.udec.cl/science/article/pii/S0959652621002274?via%3Dihub)

Lagrange, B. 1979. Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation. Vol.2 . Edisual / Energies Alternatives. 249pp.

Lorenzo Y. & Obaya M. (2005). La digestión anaeróbica, aspectos teóricos, parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. Observatorio Social (2017). Encuesta de caracterización socioeconómica nacional.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. Observatorio Social. (2017). Encuesta de caracterización socioeconómica nacional, resultados vivienda CASEN.

Moncayo G. (2017). ¿Qué es el biogás? Aqua Limpia Engineering. Recuperado de:

<https://s51d157330f7b08ca.jimcontent.com/download/version/1505441029/module/14489637722/name/QUE-ES-EL-BIOGAS.pdf>

García F., Yujato M. & Arenas A. (2017). Manual Estadística Energética.

Organización Latinoamericana de Energía. Recuperado de:

<http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0380.pdf>

PANSHIN, A. 1959. Productos Forestales, Salvat, Madrid. 605 p.

Pazera A., Slezak R., Krzystek L., Ledakowicz S., Bochmann G., Gabauer W., Helm S., Reitmeier S., Marley L., Gorga F., Farrant L., Suchan V. & Kara J. Biogas in Europe: Food and Beverage (FAB) Waste Potential for Biogas Production.

Energy Fuels 2015, 29, 7, 4011–4021. Recuperado de: <https://pubs-acsc-org.ezpbibliotecas.udec.cl/doi/10.1021/ef502812s>

Programa País Eficiencia Energética (PPEE). (2010). Manual de eficiencia energética para la industria gráfica. Recuperado de: http://old.acee.cl/576/articles-61928_doc_pdf.pdf

RedPE (2020). Caracterización del mercado de la leña y sus barreras para la transición energética. Santiago, Chile: Red de Pobreza Energética. Disponible en www.pobrezaenergetica.cl

Remaggi J., Mardones C. & Jiménez J. (2019). Impacto de la contaminación por material particulado sobre las atenciones de urgencias por causas respiratorias en Chillán, Concepción y Los Ángeles. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, Volumen 35 (3). Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-73482019000300181&script=sci_arttext_plus&lng=es

Resolución exenta N°236/2016. Resuelve consulta de pertinencia de ingreso al SEIA, proyecto: “Optimización sistema captación y quema de biogás relleno

sanitario Los Ángeles”, que modifica la RCA N°252/2002 del proyecto “Relleno Sanitario Los Ángeles”. Servicio de Evaluación Ambiental.

Shane A., Gheewala S. & Phiri S. (2017). Rural domestic biogas supply model for Zambia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volumen 78*. 683-697.

Recuperado de: <https://www-sciencedirect-com.ezpbibliotecas.udec.cl/science/article/pii/S1364032117306329?via%3Dihub>

SICAM Ingeniería (2014). Estudio Definición de cuenca atmosférica para la comuna de Los Ángeles. Seremi del Medio Ambiente Región del Biobío. Recuperado de: [Estudios utilizados para la elaboracion del PDA LA.pdf \(mma.gob.cl\)](#)

Smith, K.R., Rogers, J. y Cowlin, S.C. 2005. Household fuels and ill-health in developing countries: what improvements can be brought by LP gas (LPG)? *París, Francia, World LP Gas Association & Intermediate Technology Development Group*.

Tania Foster Carneiro. “Digestión anaeróbica termofílica seca de RSU; estudio de la variable del proceso de arranque y estabilización del bio-reactor”; Tesis Doctoral en Ingeniería Química, Universidad de Cádiz, Cádiz, España 47,107, (2005)

Tobares L. (2013). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. *Petrotecnia*. Recuperado de: http://www.petrotecnia.com.ar/1_2013/Petrotecnia/PdfsSinPublic/LaImportancia.pdf

Toruño L., Lira E., Casco D. & Reyes E. (2016). Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Recuperado de: <https://repositorio.unan.edu.ni/5547/1/17847.pdf>

Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile.