



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA PRODUCCIÓN DE FUENTES PROTEICAS DE
ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

PALOMA MICHELLE CONSTANZA DONOSO ARANCIBIA

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO OLIVERA NAPPA
ADRIANA LÓPEZ CASTRO

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL QUÍMICA
POR: PALOMA MICHELLE CONSTANZA DONOSO ARANCIBIA
FECHA: 2021
PROFESOR GUÍA: FELIPE DÍAZ ALVARADO

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA PRODUCCIÓN DE FUENTES PROTEICAS DE
ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL

En la actualidad, debido a la crisis climática y el aumento exponencial de la población mundial, es fundamental reorientar la producción de alimento y cambiar la dieta. Dado que la ganadería ha sido señalada como responsable de un importante porcentaje de las emisiones de carbono equivalente y de pérdida de biodiversidad, se propone mitigar el impacto ambiental de la alimentación, específicamente de la obtención de proteína, mediante el reemplazo entre productos nutricionalmente equivalentes, pero con distinto impacto ambiental. Para ello, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida, que usando el indicador Potencial de Calentamiento Global, cuantifica el impacto ambiental de producir la masa de proteína diaria recomendada para una persona promedio (de Chile), de cuatro fuentes: poroto, lenteja, pollo y cerdo. Adicionalmente, se calculó la huella ecológica de la elaboración de cada fuente de proteína, con el objetivo de complementar el resultado de emisiones de carbono equivalente con uno que incluya el uso de suelo; y por último, se evaluó el costo que implicaría un posible reemplazo de una proteína por otra.

El estudio ambiental de los sistemas de producción abarca desde que se prepara el suelo para el cultivo en el caso de las legumbres, y desde el primer día de vida de los animales, en el caso de la carne, hasta la cocción del producto. Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida en orden decreciente de PCG son: la carne de cerdo con 2,5 [$kgCO_2eq/MPD$], la carne de pollo broiler con 0,8 [$kgCO_2eq/MPD$], el poroto con 0,6 [$kgCO_2eq/MPD$] y por último la lenteja con 0,3 [$kgCO_2eq/MPD$]. Los resultados de la huella ecológica de las proteínas en orden decreciente es: la carne de cerdo con 13 [m^2yr/MPD], la carne de pollo broiler con 9,5 [m^2yr/MPD], la lenteja con 7,1 [m^2yr/MPD] y en último lugar el poroto con 4,7 [m^2yr/MPD]. Tanto en el ACV como en la huella ecológica el uso de cocina eléctrica arrojó valores de carbono equivalente y de superficie mayores a los reportados al cocinar con GLP.

En cuanto al análisis económico, se estudió el precio promedio de mercado de cada proteína. En orden decreciente de precio los resultados son: la carne de cerdo (\$2.325), la carne de pollo broiler (\$1.528), el poroto (\$704) y, la menos costosa, la lenteja (\$562). También, se calculó el costo de utilizar una cocina a gas o una eléctrica al cocer cada proteína. De acuerdo a los resultados, la cocina eléctrica es una opción más económica que emplear una cocina a gas licuado de petróleo.

En función de los resultados de los tres análisis y sus comparaciones, se concluye que reemplazar la proteína de origen animal por una de origen vegetal sí contribuye a reducir las emisiones GEI, la huella ecológica y el gasto diario derivado de la alimentación de una persona, en un 71%, 48% y 61%, respectivamente. Por otro lado, el uso de una cocina a gas tiene una menor huella ecológica y PCG, pero significa un costo ligeramente superior.

Como proyección, se sugiere calcular la huella de agua de los sistemas propuestos y promover la creación de nuevas fuentes de información a nivel nacional para repetir estos análisis ambientales y realizar otros, para que los consumidores puedan comprar informada y responsablemente.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que han estado en mi vida de alguna forma, no sólo a las y los que me ayudaron durante el transcurso de esta memoria. Principalmente, quiero agradecer a mis amigos, la familia que une elige, por estar en las buenas y en las malas y siempre enseñarme algo nuevo.

A mis amigas del colegio, por apoyarnos todos estos años, aunque sea a distancia; gracias por ser parte de mi vida y por permitirme verlas convertirse en las mujeres secas y luchadoras que son.

A Javier por siempre alegrarme el día, por los mundos de fantasía, por acompañarme en las noches de sueño cambiado y en los intentos de ser fitness.

A Diego A. por siempre animarme, aconsejarme y creer en mí. Gracias por ser una influencia tan positiva en mi vida.

A Diego N. por el pancito con tomate, los memes de animalitos, por estar en uno de mis años más complicados, por todo el cariño y ayuda desinteresada que te caracteriza.

A Tania y Edu por aceptarme en su hogar y su familia peluda, por brindarme un espacio seguro y lleno de amor, en el que me siento libre de ser quien soy.

A Felipe D. por la paciencia, por permitirme desarrollar una memoria en un tema que me apasionara. A Andrea R. por la entrega y las ganas de enseñar algo nuevo en cada bloque y sacarnos de la rutina universitaria. Gracias también al grupo de memoristas, son gente que admiro mucho y sé que serán un gran aporte como profesionales (ya lo son como personas).

A mi papá por desarrollar mi sentido de la curiosidad y a mi mamá por enseñarme el mundo de la literatura.

Gracias a todas las personas que hacen o hicieron mi día a día mejor como la gente de plan común, del IQBT, los y las funcionarias de la universidad, las y los músicos y autores y autoras de mis libros favoritos.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo general.....	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
2.	Metodología	4
3.	Antecedentes	5
3.1	Fuentes de proteína	5
3.1.1	Porotos (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	6
3.1.2	Lentejas (<i>Lens culinaris</i>).....	8
3.1.3	Carne de pollo	10
3.1.4	Carne de cerdo	12
3.2	Metodología Análisis de Ciclo de Vida	14
3.2.1	Objetivos y alcance	15
3.2.2	Análisis de inventario	15
3.2.3	Evaluación de impacto ambiental	16
3.2.4	Interpretación	16
3.3	Indicador Huella Ecológica.....	17
4.	Estado del arte.....	19
4.1	Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida.....	19
4.1.1	Aplicación en alimentos.....	19
4.1.2	Caso relacionado.....	24
5.	Análisis de Ciclo de Vida	26
5.1	Objetivo del estudio	26
5.2	Alcance del estudio	26
5.2.1	Sistemas	26
5.2.2	Unidad funcional.....	28
5.2.3	Límites del sistema	29
5.2.4	Calidad de los datos	30
5.2.5	Categorías de impacto.....	30
5.3	Análisis de inventario	32
5.3.1	Sistema de producción de porotos	33
5.3.2	Sistema de producción de lentejas	35
5.3.3	Sistema de producción de carne de broiler	36
5.3.4	Sistema de producción de carne de cerdo	40

5.4	Evaluación de impacto ambiental	42
5.4.1	Evaluación de impacto ambiental por sistema de producción	43
5.4.2	Comparación de resultados	45
6.	Huella ecológica.....	48
6.1	Análisis de datos	48
6.1.1	Sistema de producción de poroto	48
6.1.2	Sistema de producción de lenteja.....	50
6.1.3	Sistema de producción de carne de broiler	52
6.1.4	Sistema de producción de carne de cerdo	54
6.2	Resultados	58
6.2.1	Huella ecológica por sistema de producción	58
6.2.2	Comparación de resultados	62
7.	Alcance económico.....	65
7.1	Costo de mercado.....	65
7.2	Costo energético.....	67
7.3	Comparación de resultados	68
8.	Evaluación general.....	69
9.	Conclusiones	72
	Bibliografía	74
	Anexos	83
	Anexo A: Intensidad ponderada de emisión de CO ₂ por consumo energético	83
	Anexo B: Diagrama de distribución de etapas.....	84
	Anexo C: Cálculo de emisiones por tipo de cocina	85
	Anexo D: Cálculo de emisiones procedentes del transporte.....	86
	Anexo E: Potencial de Calentamiento Global de cada sistema de producción.....	90
	Anexo F: Ejemplo de cálculo ACV	91
	Anexo G: Ejemplo de cálculo de Huella Ecológica.....	92
	Anexo H: Huella ecológica de cada sistema de producción	97
	Anexo I: Análisis económico.....	98

Índice de tablas

Tabla 1. Gramos de proteína por cada 100 gramos de alimento cocido.....	6
Tabla 2. Gramos de proteína por cada 100 gramos de alimento crudo.....	6
Tabla 3. Factores de equivalencia para distintos tipos de suelo. Los valores son adimensionales y extraídos de bibliografía.....	18
Tabla 4. Recopilación de valores de PCG obtenidos en el <i>review</i>	22
Tabla 5. Límites de cada etapa del Ciclo de Vida.....	29
Tabla 6. Factor de potencial de calentamiento global en dos horizontes de tiempo.....	31
Tabla 7. Emisiones relacionadas al uso de urea como fertilizante en poroto.....	34
Tabla 8. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de porotos.....	34
Tabla 9. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de lentejas.....	36
Tabla 10. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de carne de broiler.....	39
Tabla 11. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de carne de cerdo.....	42
Tabla 12. Emisiones de GEI por proteína estudiada.....	46
Tabla 13. Potencial de Calentamiento Global con dos tipos de cocinas.....	47
Tabla 14. Potencial de Calentamiento Global promedio de la proteína vegetal y animal.....	47
Tabla 15. Emisión de CO ₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de poroto.....	49
Tabla 16. Superficies ocupadas por el sistema de producción de poroto en m ² por masa de producto.....	50
Tabla 17. Emisión de CO ₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de lenteja.....	51
Tabla 18. Superficies ocupadas por el sistema de producción de lenteja en m ² por masa de producto.....	52
Tabla 19. Entradas y salidas de la planta de engorde.....	52
Tabla 20. Entradas y salidas de la planta faenadora de broilers.....	53
Tabla 21. Emisión de CO ₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de carne de pollo.....	54
Tabla 22. Superficies ocupadas por el sistema de producción de pollo en m ² por masa de producto.....	54
Tabla 23. Entradas y salidas de la planta de alimento.....	55
Tabla 24. Entradas y salidas de la etapa de lactancia.....	55
Tabla 25. Entradas y salidas de la planta de engorde.....	55
Tabla 26. Entradas y salidas de la planta faenadora de cerdos.....	56
Tabla 27. Entradas y salidas de la planta de rendering.....	56
Tabla 28. Emisión de CO ₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de carne de cerdo.....	57
Tabla 29. Superficies ocupadas por el sistema de producción de cerdo en m ² por masa de producto.....	57
Tabla 30. Cuadro comparativo por etapa de cada sistema de producción de proteína.....	63
Tabla 31. Huella ecológica promedio de la proteína vegetal y animal.....	64
Tabla 32. Huella ecológica promedio de la proteína vegetal y animal.....	64
Tabla 33. Costo de consumir todo el requerimiento diario de proteína con los alimentos estudiados.....	65
Tabla 34. Comparación de precio para cumplir el requerimiento diario de proteína con distintos productos procesados.....	66

Tabla 35. Consumo de una cocina a gas y eléctrica para cada proteína.	67
Tabla 36. Costo de utilizar una cocina a gas o una eléctrica al cocer cada proteína.	67
Tabla 37. Costo derivado de la compra y cocción de las proteínas estudiadas.	68
Tabla 38. Costo promedio de la proteína vegetal y animal.....	68
Tabla 39. Precio de mercado promedio y costo de cocer la proteína en una cocina GLP o eléctrica.	70
Tabla 40. Comparación del análisis ambiental y económico de los 4 sistemas estudiados, usando dos tipos de cocinas: cocina GLP y cocina eléctrica.	71
Tabla A.1. Tecnologías que forman la matriz energética nacional y sus respectivas emisiones...	83
Tabla E.1. Resumen de resultados PCG por proteína estudiada.....	90
Tabla F.1. Valores de normalización para cada proteína.....	91
Tabla G.1. Emisión de CO ₂ , consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de poroto.	92
Tabla G.2. Emisión de CO ₂ , consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de carne de cerdo.	94
Tabla G.3. Emisión de CO ₂ , consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de lentejas.....	95
Tabla G.4. Emisión de CO ₂ , consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de pollo broiler.....	96
Tabla H.1. Resumen de resultados huella ecológica por proteína estudiada.	97
Tabla I.1. Precios encontrados en el mercado para cada proteína.	98
Tabla I.2. Proteína contenida en cada producto.....	99
Tabla I.3. Costo para cumplir con el requerimiento diario de proteína por producto.....	100

Índice de figuras

Figura 1. Vaina afectada por antracnosis a la izquierda, a la derecha una hoja atacada por roya. . .	8
Figura 2. Composición de un sistema en estudio, sus entradas, salidas y posibles impactos ambientales.	16
Figura 3. Entradas, salidas y límites del sistema impuestos en el <i>review</i>	21
Figura 4. Etapas del ciclo de vida de la producción de legumbres consideradas para el estudio. .	27
Figura 5. Etapas del ciclo de vida de la elaboración de la carne de pollo analizadas en el estudio.	27
Figura 6. Etapas del ciclo de vida de la producción de carne de cerdo consideradas en este estudio.	28
Figura 7. Fuentes y límites de las emisiones GEI de una ciudad.	32
Figura B.1. Diagrama de las actividades que componen cada etapa en los ciclos productivos.	84

Índice de gráficos

Gráfico 1. Consumo y producción total de carne en Chile el año 2018. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadísticas.	12
Gráfico 2. Emisiones del sistema de producción de poroto por actividad.	43
Gráfico 3. Emisiones del sistema de producción de lenteja por actividad.	43
Gráfico 4. Emisiones del sistema de producción de carne de broiler por actividad.	44
Gráfico 5. Emisiones del sistema de producción de carne de cerdo por actividad.	44
Gráfico 6. Contribución de cada emisión al Potencial de Calentamiento Global de las proteínas, por etapa.	45
Gráfico 7. Contribución de cada etapa al total del PCG por proteína.	46
Gráfico 8. Huella ecológica poroto por etapa, en una cocina a gas (a) o una eléctrica (b).	58
Gráfico 9. Huella ecológica del poroto por tipo de impacto ambiental.	59
Gráfico 10. Huella ecológica lenteja por etapa, en una cocina a gas o una eléctrica.	59
Gráfico 11. Huella ecológica de la lenteja por tipo de impacto ambiental.	60
Gráfico 12. Huella ecológica carne de pollo por etapa, en una cocina a gas o una eléctrica.	60
Gráfico 13. Huella ecológica de la carne de pollo por tipo de impacto ambiental.	61
Gráfico 14. Huella ecológica carne de cerdo por etapa, en una cocina a gas o una eléctrica.	61
Gráfico 15. Huella ecológica de la carne de cerdo por tipo de impacto ambiental.	62
Gráfico 16. Contribución de cada factor a la huella ecológica de las proteínas, por etapa.	63
Gráfico 17. Análisis ambiental de cada proteína usando una cocina GLP o eléctrica.	70

1. Introducción

En la actualidad, la crisis climática y el aumento exponencial de la población mundial están promoviendo cambios en la producción de alimentos y en los patrones de consumo de las personas [1][2][3]. En la Encuesta Nacional de Medio Ambiente año 2018 un 94% de los encuestados se declaró omnívoro, es decir, que además de plantas, incluyen en su alimentación carne de vacuno, cerdo, pollo o animales marítimos [4]. En Chile, el consumo per cápita de ave y cerdo crece a una tasa anual de un 1,9%, debido a que los avances tecnológicos de la industria permiten comercializar estos productos a un precio más atractivo para el público nacional; la carne bovina, en cambio, ha mantenido constante su consumo [5]. De la misma encuesta, se deduce que existe un 6% de los encuestados que forma parte de un creciente grupo de personas que no incluye animales en su alimentación, ya sea por razones éticas o porque se ha vinculado el consumo y la producción de alimentos de origen animal con efectos negativos en la salud personal y en el medio ambiente [4].

En relación a lo anterior, estudios señalan que una dieta que contiene alimentos derivados de animales provoca distintos efectos en el medio ambiente y en la salud de las personas, en comparación a una dieta que no los incluye [1][2][3]. En el área de la salud, por ejemplo, se ha descubierto que el consumo diario de carnes rojas y procesadas incrementa el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2 y cáncer [6]. Por el contrario, vegetarianos y veganos en general poseen menos riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares, debido a que en promedio tienen un Índice de Masa Corporal menor y valores disminuidos de colesterol total [7].

Por otro lado, entre los efectos medioambientales de la elaboración de alimento, si se piensa por ejemplo en una persona que consume un plato de arroz con chuleta, esa carne proviene de un cerdo, cuyo alimento es cultivado en un terreno que originalmente poseía flora nativa y que fue intervenido. Es importante destacar que una hectárea de pastizal no fija tanto CO₂ como una hectárea de bosque, por lo que cambiar el uso de suelo afecta la absorción de gases de efecto invernadero (o por sus siglas: GEI). Por otro lado, mientras ese cerdo se encuentra en desarrollo, su actividad gástrica libera metano (un GEI) y estiércol, el que a su vez emite metano, óxido nitroso y amoniaco, todos perjudiciales para el medioambiente. Además, existe un gasto energético asociado a la automatización en el faenamiento del animal y la refrigeración de la carne desde que se corta hasta que es cocida por la persona. Teniendo en consideración los efectos anteriores, se podría creer que una dieta equivalente al ejemplo, pero basada estrictamente en vegetales, tendría menores emisiones. Ahora bien, ¿es eso cierto? Y de ser así, ¿cuánto menores serían tales emisiones? Estas preguntas motivan este trabajo de título.

En concreto la producción ganadera utiliza, aproximadamente, un 80% de la tierra agrícola mundial, por lo que es uno de los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad [8]. Se estima que el sector ganadero es responsable del 15% de las emisiones de GEI provocadas por el ser humano [9], siendo la mayor fuente antropogénica de metano, que posee un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el dióxido de carbono [10].

Entonces, ante dicha problemática, se propone sustituir el consumo ganadero con otro producto. Desde una perspectiva nutricional el principal valor que tiene la carne es su contenido proteico, que vería entre un 18 y 20% de masa cruda de proteína. Bajo ese criterio, se podría reemplazar su ingesta con leguminosas, cuyo contenido proteico es de 15 a 20% de la masa cruda total [11].

Siguiendo con el ejemplo, una persona que consume un plato de arroz con porotos, para obtener los porotos necesitaría sólo la superficie de terreno para sembrar la legumbre y disponer de energía durante el proceso de cultivo. Por consiguiente, el uso de suelo y las emisiones son diferentes que en el caso de la chuleta. Una forma de determinar y comparar los respectivos impactos de estos procesos es con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ya que permite cuantificar las cargas ambientales desde la fabricación de las materias primas, hasta la disposición final del producto. Asimismo, es posible utilizar la huella ecológica como indicador, ya que valora en área (metro cuadrado por año) el terreno requerido para producir la proteína y para absorber las emisiones de GEI liberadas en el ciclo. Adicionalmente, este indicador es conveniente porque permite diferenciar entre tipos de suelo (pastizales, bosques, edificaciones, entre otras).

Investigaciones de ACV internacionales señalan que si un gran porcentaje de la población disminuye su consumo de carne (de vacuno, cerdo, pollo y pescado), reemplazándola por granos y legumbres, se podrían reducir drásticamente las emisiones de efecto invernadero [8]. En Chile no se ha hecho un estudio integrado de impactos de esta industria, y dado que el escenario nacional difiere de los internacionales en matriz energética, tecnología, tipo de transporte y volumen de producción; no se tiene claro si los resultados serán iguales a los internacionales, ni la magnitud de diferencia.

Por lo tanto, se aplicará un ACV con el objetivo de comparar cuantitativamente los efectos ambientales de la obtención de proteína, considerando la cadena completa: desde su producción hasta la ingesta del consumidor. Se complementará el análisis con el indicador huella ecológica. Para que la comparación sea justa, el análisis se medirá en metros cuadrados de impacto ambiental por gramos de proteína de origen animal (cerdo y pollo) o vegetal (porotos y lentejas).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

1. Evaluar comparativamente, mediante un Análisis del Ciclo de Vida, fuentes proteicas vegetales y animales, considerando impactos ambientales y económicos.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Definir el alcance, la unidad funcional y el límite del Análisis de Ciclo de Vida.
2. Cuantificar entradas y salidas de cada sistema, considerando la calidad de los datos.
3. Calcular el impacto ambiental mediante la categoría Potencial de Calentamiento Global.
4. Analizar la congruencia de los resultados entregados por el Análisis de Ciclo de Vida de cada fuente proteica.
5. Calcular el indicador *huella ecológica*.
6. Comparar los resultados obtenidos del análisis.
7. Abordar el aspecto económico en el que se encuentra el consumidor al momento de elegir una u otra proteína.

2. Metodología

El presente trabajo se divide en cuatro partes. Primero, se realiza una revisión del marco teórico y los antecedentes técnicos necesarios para desarrollar el estudio. Luego, se llevan a cabo las cuatro fases del Análisis de Ciclo de Vida. Posteriormente, se calcula la huella ecológica de cada proteína. Por último, se comparan económicamente las alternativas desde la perspectiva del consumidor.

Más específicamente, en la etapa de marco teórico y antecedentes técnicos se busca bibliografía sobre:

- Procesos productivos actuales de porotos, lentejas, carne de cerdo y de pollo en Chile.
- Herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, normas internacionales que debe cumplir, y la descripción de sus fases: objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto ambiental e interpretación de resultados.
- Estado del arte de estudios en alimentos que hayan utilizado Análisis de Ciclo de Vida en Chile y en el extranjero.
- El indicador huella ecológica, su aplicación y forma de cálculo.

La metodología central del trabajo consiste en la propia del Análisis de Ciclo de Vida, definida por las normas ISO. Ésta se comienza definiendo el **objetivo, el alcance** (a quién se encuentra dirigido el estudio), los límites y la unidad funcional del sistema, a partir de la información estudiada en la etapa anterior, de tal forma que se cumplan los objetivos propuestos. En una segunda fase, llamada **análisis de inventario**, se cuantifican entradas y salidas de los subsistemas mediante la recopilación de datos nacionales que haya publicado alguna entidad del gobierno o empresas privadas. Posteriormente, se realiza la **evaluación del impacto ambiental**, se normalizan los datos encontrados por la unidad funcional y se calculan los indicadores de impacto para cada proteína. En la cuarta fase de **interpretación**, se compara el impacto ambiental de las cuatro fuentes proteicas obtenido a partir de los resultados.

El procedimiento de la huella ecológica es similar al de ACV, y se compartirán la unidad funcional y los límites establecidos en el análisis, con el objetivo de poder comparar ambos resultados. Primero se declaran ecuaciones y supuestos en un análisis de datos, para luego normalizar por la unidad funcional y aplicar la fórmula de cálculo de la huella ecológica. En último lugar, se presentan los resultados individuales de cada proteína y después se comparan entre ellos.

Finalmente, se desea abordar el aspecto económico al que se enfrenta un consumidor al momento de decidir qué proteína comprar en el mercado. Para esto, se estudiarán precios de mercado para cada proteína cruda y se examinará la relación precio-masa de proteína diaria, en su formato cocido, que se recomienda consumir. Esto debido a que al cocer el alimento, ocurren reacciones dentro de él que cambian su contenido de nutrientes. Adicionalmente, se calculará el costo de cocer las distintas proteínas en dos cocinas con diferentes fuentes de energía. Ambos análisis se realizan para determinar si el reemplazo de proteína implica un costo adicional para el consumidor.

3. Antecedentes

3.1 Fuentes de proteína

Las proteínas son fundamentales para la vida humana, ya que forman y reparan tejidos de órganos, músculos, piel, entre otros. Además de su función estructural, las proteínas participan en la producción de enzimas, hormonas y anticuerpos necesarios para que el cuerpo se desempeñe correctamente [12].

Las células se encargan de crear las proteínas a partir de unos compuestos orgánicos llamados aminoácidos. Existen 20 tipos de aminoácidos que se combinan, en distintas proporciones, para formar las proteínas. Once de ellos son producidos por el cuerpo humano, y se conocen como aminoácidos no esenciales. Los otros nueve se denominan aminoácidos esenciales y para obtenerlos deben ser aportados por la dieta [13]. Se cree que el valor biológico de una proteína está determinado por su capacidad de contribuir con una masa suficiente de aminoácidos esenciales. Es por esto que la proteína animal, que contiene todos estos aminoácidos, se dice que es de alto valor biológico. En contraste, el valor biológico de la proteína vegetal ha sido tema de debate, ya que se supuso erróneamente que algunos alimentos de origen vegetal carecían de uno o más de estos aminoácidos y que por ello se deben complementar leguminosas con cereales o semillas [14]. Sin embargo, luego de realizar estudios, se demostró que las fuentes vegetales sí poseen todos los aminoácidos esenciales, pero unos se encuentran en una mayor concentración que otros, y se dice que son “limitantes” en ese aminoácido. Dado que la dieta habitual de países en vías de desarrollo o desarrollados contiene más calorías de las requeridas, se concluyó que manteniendo una dieta variada, es decir, en donde se aporta proteína de diversos alimentos de origen vegetal, se obtienen todos los aminoácidos necesarios por día [15][16]. Adicionalmente, se comprobó que el cuerpo tiene una reserva de aminoácidos en el hígado, que puede ser utilizada cuando haya un consumo deficiente de algún aminoácido y necesite elaborar proteínas [17].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) recomiendan, para una persona adulta sedentaria, un consumo diario de 0,8 [g] de proteína por kilogramo de peso corporal [18][19]. Por ejemplo, una persona con una masa de 80 [kg] debe consumir 64 [g] de proteína diariamente.

Volviendo al ejemplo de la introducción, en el caso del plato de arroz con porotos y en el plato de arroz con chuleta se estarían consumiendo todos los aminoácidos esenciales, por lo que son nutricionalmente equivalentes. Lo que diferencia a estos platos es la masa de alimento necesaria para aportar la misma masa de proteína, ya que el porcentaje de este nutriente contenido en la carne o en las legumbres ya cocinadas es diferente. En la Tabla 1 se muestra la masa de proteína de los alimentos elegidos para el estudio luego de ser sometidos a un tratamiento térmico.

Tabla 1. Gramos de proteína por cada 100 gramos de alimento cocido [20][21][22][23].

Alimento (cocido)	Gramos de proteína en 100 [g] de alimento
Porotos	9,7
Lentejas	9,0
Pollo (pechuga)	21,4
Cerdo	22,6

En la Tabla 2 se puede ver la masa de proteína de los alimentos elegidos en formato crudo.

Tabla 2. Gramos de proteína por cada 100 gramos de alimento crudo.

Alimento (crudo)	Gramos de proteína en 100 [g] de alimento
Porotos	23,4
Lentejas	24,6
Pollo (pechuga)	17,4
Cerdo	13,9

En la siguiente sección se explican las razones de la elección de los alimentos para el Análisis de Ciclo de Vida, los antecedentes económicos y el proceso productivo de cada uno.

3.1.1 Porotos (*Phaseolus vulgaris*)

En Chile, un 70% de la superficie ocupada para el cultivo de leguminosas de consumo humano se destina a la siembra de porotos y, acorde a la información entregada por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), el consumo de poroto por habitante es de 1,8 [kg] por año, ubicándolo como la legumbre de mayor uso culinario [24][25]. Debido a lo anterior, es que se decide estudiar su ciclo de vida. Es importante mencionar que la variedad de poroto más consumida en el país es el tipo tórtola, por lo que los datos considerados en el análisis se basan en el cultivo de este poroto [26].

En los siguientes apartados se detalla más información del cultivo de poroto y antecedentes de producción nacional.

3.1.1.1 Antecedentes de la producción de poroto

El poroto es una planta anual cuyo periodo vegetativo es de 90 a 130 días, dependiendo de la variedad. Sus frutos son vainas que contienen varias semillas ovaladas comestibles. Esta leguminosa es cultivada desde la región de Valparaíso hasta la región de los Lagos, en zonas con clima templado a cálido y con suelos permeables, ya que son sensibles a la acumulación de agua [27].

El rendimiento mundial promedio de la producción de poroto, durante los últimos 11 años, se ha mantenido superior a los 1,5 toneladas por hectárea (t/ha). Sobresale en esta categoría Irlanda, Irak y Bélgica con rendimientos mayores a las 3 [t/ha]. Chile, por su parte, posee un rendimiento promedio de 1,6 [t/ha] [28]. Esto se explica por uso de agroquímicos y porque el cultivo se encuentra mecanizado, es decir, se cuenta con un moderno nivel tecnológico en siembra y cosecha.

Pese a que hay potencial para competir mundialmente en producción de poroto, desde el año 2012 la superficie de siembra de porotos se ha mantenido bajo las 15.000 hectáreas, produciendo menos de 19.000 toneladas al año, muy lejos de los tres millones de toneladas anuales que produce Brasil, por ejemplo. Es por esto que se deben importar cerca de 5.200 toneladas de porotos anualmente, para satisfacer la demanda nacional [29].

3.1.1.2 Proceso productivo

La variedad más sembrada y consumida es *Zorzal-INIA*, su nombre comercial es poroto tórtola [30]. Este poroto alcanza la madurez de cosecha a los 108 días, destaca por su tolerancia al virus del Mosaico Común y generalmente se siembra la primera semana del mes noviembre, porque es un cultivo sensible a las heladas [31].

El cultivo de poroto comienza con la preparación de suelo, cuyo objetivo principal es acondicionar la tierra de modo que se encuentre mullida, permeable, nutrida y libre de malezas. Para ello, se realiza un análisis que indique los nutrientes contenidos en la tierra, lo que permite determinar la concentración de fertilizante y herbicida a aplicar, se trazan los canales de riego y se emplean equipos en la labranza. Comúnmente, se incorpora un herbicida que tenga trifluralina como su ingrediente activo, ya que inhibe el crecimiento de malezas de hoja ancha y gramíneas [32]. En conjunto al herbicida anterior, se aplica el fertilizante superfosfato triple, porque su uso genera mayores rendimientos [33].

La preparación de suelo se divide en una labor primaria o aradura y una secundaria o rastraje, ambas son realizadas en su totalidad en forma convencional mecanizada [34]. En la labranza primaria se atraviesa el campo con una herramienta de arado cincel una vez, para romper el suelo, descompactar y airear la tierra. Posteriormente, en la labranza secundaria se hacen tres rastrajes usando una rastra de discos: el primero para nivelar el suelo, arrancar malezas y formar surcos de riego; un segundo rastraje con el fin de mullir la tierra y agregar fertilizante y herbicida; por último, se riega y se pasa un tercer rastraje que aprovecha la humedad para distribuir el herbicida [35][36][37].

Luego, en los meses de octubre a noviembre, se siembra. Se pueden distribuir las semillas con una máquina sembradora para porotos o maíz. La producción de porotos habitualmente disminuye la proporción de nitrógeno del suelo, pese a que en su sistema se desarrollan bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico. Es por eso que se recomienda aplicar nitrógeno como fertilizante máximo un día después de la siembra, el más utilizado por los productores es la urea [34]. Asimismo, con el objetivo de añadir nutrientes al suelo arado, se agregan las llamadas “enmiendas orgánicas”, que suelen ser cama de broiler o guano de cerdo [38].

Durante el crecimiento de la planta es necesario mantener vigilado el cultivo, para evitar pérdidas de humedad, aparición de plagas, enfermedades o malezas que puedan afectar el rendimiento del poroto. Entre las enfermedades más frecuentes en el poroto está la antracnosis y la roya, ocasionadas por los hongos *Colletotrichum lindemuthianum* y *Uromyces phaseoli*, respectivamente, ambos debilitan la planta limitando su rendimiento (Figura 1). Su aparición se evita con el fungicida Cadilac 80 WP [39].



Figura 1. Vaina afectada por antracnosis a la izquierda, a la derecha una hoja atacada por roya [40].

Transcurridos 125 días aproximadamente, cuando las vainas ya están amarillas y algo secas, se inicia la cosecha. En las primeras horas del día, de forma manual o mecánica (usando una máquina de hilerado), se arranca la planta con las raíces hacia arriba, para acelerar su secado. Cuando todas las vainas están secas, la cosechadora, que es similar a una trilladora semi-automática, separa el grano de la planta. Se debe tener precaución en que no se partan los porotos o que queden vainas sin desgranar.

Dependiendo de la empresa los porotos pueden ser envasados, en bolsas plásticas de 1 [kg], directamente en el lugar donde son cosechados; de no ser así, los granos se almacenan en sacos de 25 kilogramos [27]. Los sacos pueden ser distribuidos en camiones al punto de venta, en donde son comercializados a granel. También, existen empresas envasadoras de legumbres, que reciben los sacos de 25 [kg] y los empaquetan en bolsas plásticas de 1 [kg], que luego son transportadas en camiones a una bodega o al punto de venta. Los camiones usados no tienen requerimientos especiales para trasladar los porotos. Una vez en el punto de venta, se coloca el paquete de porotos en una góndola, sin necesidad de controlar su temperatura.

3.1.2 Lentejas (*Lens culinaris*)

De la superficie destinada para el cultivo de leguminosas de consumo humano, la lenteja ocupa el segundo lugar abarcando un 17% de las hectáreas totales [24]. Por otro lado, de acuerdo con la información publicada por el Departamento de Nutrición del Ministerio de Salud, los chilenos y chilenas consumen en promedio 1 [kg] de lentejas anualmente [26]. Por lo tanto, la lenteja se sitúa como la segunda leguminosa más consumida y cultivada en Chile, y se decide estudiar su ciclo de vida en esta memoria.

A continuación, se entrega información detallada del cultivo de lenteja y antecedentes de producción nacional.

3.1.2.1 Antecedentes de la producción de lenteja

La lenteja es una planta anual que, dependiendo de la variedad, tiene un periodo de crecimiento de 106 s 220 días. Sus frutos son vainas amarillas que contienen hasta tres semillas comestibles de color pardo. La lenteja chilena destaca por su bajo tiempo de cocción y su alto calibre (su tamaño supera los 7 [mm]) [29]. Esta leguminosa se cultiva en invierno, desde la región de O'Higgins hasta la región de la Araucanía, en zonas con pendientes moderadas de manera que, en caso de lluvias, el agua no absorbida por la tierra se deslice, previniendo que se acumule [41].

En la última década, en países como Croacia, Egipto y Canadá, se produjo un cambio tecnológico que permitió mejorar los rendimientos hasta las 2,8 [t/ha], incentivando el aumento de la superficie sembrada. Este incremento en la oferta, contrario a lo que se podría prever, no ocasionó una caída del precio de la lenteja, lo que se explica por el aumento en el consumo del producto, principalmente en países asiáticos. Debido al crecimiento poblacional de ese sector, se estima que la demanda seguirá subiendo en el futuro.

En Chile, en promedio, se siembran 1.079 hectáreas al año y se producen 734 toneladas anuales, por lo que el rendimiento es aproximadamente 0,7 [t/ha]. Este bajo nivel de productividad se debe a que el cultivo lo realizan pequeños agricultores, cuyo bajo nivel adquisitivo limita su capacidad para adquirir semillas certificadas, conocimiento sobre prácticas agronómicas modernas y maquinaria [29].

Lo anterior conlleva a que no se logre satisfacer la demanda nacional, por lo que se importan en promedio 15.769 toneladas de lentejas por año especialmente de Canadá (un 96%), país que lidera la exportación de lentejas, abarcando el 69% del mercado. Desde la década de 1.980, gracias al desarrollo de programas financiados por entidades públicas y privadas, Canadá ha aumentado sus zonas de cultivo de lentejas como una forma provechosa de rotar cultivo con cereales, ya que enriquece el suelo (por la fijación natural de nitrógeno del aire), ayuda en el control de malezas, enfermedades y plagas e incrementa el empleo en territorios rurales.

3.1.2.2 Proceso productivo

La variedad a analizar será la lenteja obtenida de la semilla *Súper Araucana INIA* porque posee una buena adaptación a diferentes tipos de suelos, por lo que puede utilizarse en varias localidades a lo largo de Chile, a diferencia de las otras semillas. Súper Araucana INIA se siembra en invierno y alcanza la madurez a los 220 días [42].

En el país existen dos sistemas de producción de lentejas: el sistema cero labranza y el tradicional. El sistema cero labranza es una técnica de cultivo en la que se siembra directamente en el suelo, sin realizar un arado previo, por lo que se conserva la materia orgánica y sus nutrientes en la tierra. Desde el año 2001, el gobierno inició proyectos que buscan cambiar el sistema tradicional a este sistema puesto que al disminuir la erosión y labranza en el suelo, se detiene e incluso revierte la degradación del suelo, aumenta la retención de dióxido de carbono por biomasa, se obtienen rendimientos superiores y se reducen los costos y emisiones asociadas a equipos de preparación de suelo. Pese a los beneficios mencionados, el sistema de cero labranza no se ha logrado masificar en el país y sigue en etapa de adaptación y estudio, por ese motivo en esta memoria se analizará el método de labranza tradicional [43][44][45].

El crecimiento de la planta de lenteja es lento, lo que la vuelve una mala competidora frente a malezas, por ello la preparación del suelo antes del cultivo es muy importante y se lleva a cabo transcurridas las primeras lluvias, entre los meses de mayo a junio [46]. En la preparación se modifica el pH de la tierra (hasta que se encuentre entre 5,8 y 7), se agregan fertilizantes y herbicidas y se trazan canales de riego [47]. En la fertilización de la lenteja se usan fosfatos, ya que el requerimiento de nitrógeno es cubierto por la acción de bacterias del

género *Rhizobium*, las que al colonizar las raíces de la planta son capaces de transformar el nitrógeno atmosférico en nitrógeno mineral provechoso para la lenteja [48]. Además, se incorporan enmiendas orgánicas para aumentar la reserva de nutrientes del suelo después del arado [38].

La preparación de suelo de la lenteja sigue el mismo procedimiento que en el cultivo de poroto. En la labor primaria se rotura la tierra pasando una vez el arado cincel. A continuación, se hace un primer rastraje para formar surcos, remover malezas y nivelar el suelo; luego, el segundo rastraje se aprovecha para agregar trifluralina como herbicida y un fertilizante llamado superosfato triple y, por último, con un tercer rastraje se eliminan terrones en la tierra y se distribuye el herbicida y fertilizante [36][49].

La siembra se puede realizar entre mayo y julio, generalmente se utiliza una máquina sembradora de cereales. Inmediatamente después de sembrar se aplica el herbicida Simazina 50, que impide el crecimiento de malezas de hoja ancha y gramíneas [50]. Durante el crecimiento de la planta se controla constantemente si existe exceso de humedad o presencia de plagas, malezas y enfermedades que perjudiquen el rendimiento de la lenteja. Las principales enfermedades que afectan al cultivo son la roya y la antracnosis, causadas por los hongos *Uromyces fabae* y *Ascochyta lentis* respectivamente. El control de estas enfermedades es de tipo preventivo y se logra usando dos fungicidas: Benomyl y Manzate 200 [51][52].

Cuando se observa un cambio de color en las vainas inferiores de verde claro a amarillo, significa que los granos han madurado y se da inicio a la cosecha mecanizada de la lenteja. El primer paso es cortar con una hileradora las plantas. Luego de cuatro a ocho días, cuando la planta ya está seca, se recoge y trilla usando una automotriz con barra recolectora de granos de lenteja [53]. El rendimiento de este tipo de lenteja es de 0,86 [t/ha] [28].

Al igual que en el caso anterior del poroto, las lentejas pueden ser envasadas en bolsas plásticas de 1 [kg], en un lugar próximo a donde son cosechadas, o de lo contrario se almacenan en sacos de 25 kilogramos [41]. Existen empresas envasadoras de legumbres, que reciben los sacos de 25 [kg] y los empaquetan en bolsas plásticas de 1 [kg], que luego son transportadas en camiones a una bodega o al punto de venta. Además, los sacos pueden ser distribuidos en camiones al local comercial, en donde son vendidos a granel. Los camiones usados no tienen requerimientos especiales para trasladar las lentejas.

3.1.3 Carne de pollo

Se decide incluir la carne de pollo en el análisis debido a que, de acuerdo con la información publicada por el Instituto Nacional de Estadísticas, el 2018 el consumo de pollo fue de 34,3 kilogramos por persona, abarcando un 43% de las preferencias. Además, la carne de *pollo broiler* representó un 44% de la producción total de carnes elaboradas en el país con 669.014 [t/vara], por lo que los datos considerados en el análisis se basan en el pollo broiler [54].

En los siguientes apartados se detalla más información de la producción de carne de pollo y antecedentes de producción nacional.

3.1.3.1 Antecedentes de la producción de carne de pollo

El pollo broiler es una variedad de ave desarrollada para la obtención de carne industrial, sus principales características son su rápido crecimiento muscular y la formación de redondeadas pechugas y extremidades. Actualmente, en galpones cerrados durante 45 días, las aves alcanzan una masa en promedio de 2,6 [kg] [55]. Las plantas productoras de estas aves se ubican en el norte (región de Arica y Parinacota y región de Coquimbo) y principalmente en la zona central del país (región Metropolitana y región de O'Higgins).

Desde el año 2015, en promedio, la producción nacional de broilers ha aumentado un 4% anual [56]. Este crecimiento, además de suplir la demanda interna, se orienta en elaborar productos para satisfacer el mercado avícola internacional. En 2018, Chile llegó al número 12 en el ranking de exportación mundial de aves, al enviar al extranjero un 24% de la producción nacional (159.924 [t/vara] de carne de pollo), en su mayor parte a Estados Unidos (39%) y la Unión Europea (29%) [57].

3.1.3.2 Proceso productivo

El proceso de crianza de pollos se inicia con los huevos obtenidos de las gallinas ponedoras, los que son seleccionados por peso y las características de su cáscara. Luego, viene una etapa de incubación de los huevos, en la que se crea el ambiente necesario para el desarrollo de las crías. Transcurridos 21 días en la incubadora, ocurre el nacimiento de los pollos. Ese mismo día, se separa a los pollos en primera y segunda selección; los de primera son enviados inmediatamente a criaderos de engorde y los de segunda son comercializados.

El engorde de crías se hace en ciclos. Cada ciclo dura 65 días aproximadamente, que se dividen en 45 días de crianza de aves y 20 días de limpieza y mantención de pabellones. La crianza finaliza cuando las aves alcanzan un peso promedio de 2,4 [kg] para las hembras y 2,8 [kg] para los machos. Los parámetros importantes a controlar durante la crianza son: alimentación, agua, temperatura y ventilación.

La alimentación incluye tres dietas, según la edad de las aves. En promedio, consumen 4,7 [kg] de alimento y 25 litros de agua por ave durante el tiempo completo de crianza. Por otro lado, la temperatura ambiental de los pollos debe ser lo más estable posible, ya que durante los primeros 20 días de vida estas aves no poseen un sistema de termorregulación desarrollado. En consecuencia, es fundamental el uso de calefacción para resguardar su salud y propiciar el crecimiento muscular. La temperatura ideal para la primera semana de crianza es 24 [°C] y se baja un grado cada semana hasta llegar los 20 [°C] [58]. Finalmente, la ventilación tiene como objetivo expulsar partículas de polvo y gases tóxicos emanados por los pollos, eliminar el exceso de humedad y suministrar oxígeno. La ventilación se regula mediante el uso de cortinas y/o ventiladores dependiendo del tamaño del plantel.

Posteriormente, las aves son trasladadas en camiones del sitio de crianza hasta una faenadora, en donde se producen 1,9 [kg] de carne a partir de cada broiler, aproximadamente [59][60]. Al llegar, los pollos son aturridos con un sistema de insensibilizado eléctrico o con un sistema de atmósfera controlada de CO₂, con el objetivo de facilitar el colgado del ave y así evitar lesiones. Después, se corta la arteria carótida del cuello del ave, provocando su muerte

por desangrado. La sangre se recolecta en un tanque de acero inoxidable, que se lleva a la planta de *rendering*, en donde se elaboran subproductos con los desechos animales. Luego, los pollos se sumergen en agua caliente (lo que se denomina “escaldado”) para soltar las plumas y facilitar el trabajo de la máquina desplumadora. Terminada esta última etapa, aquellas aves que se encuentran en mal estado (con sangre) se trasladan a la planta de *rendering*.

Las aves desplumadas son seccionadas y deshuesadas mecánicamente para obtener los distintos cortes de carne. Los huesos resultantes son enviados a la planta de *Rendering*, y el producto es dispuesto en enfriadores o congeladores. Después, la carne se envasa y se guarda en cámaras de fresco o congelado dependiendo de su destino. Por último, el despacho del producto se hace en camiones refrigerados que mantienen a una temperatura y humedad adecuada la carne [61]. Al llegar al punto de venta, se debe mantener siempre la carne de pollo a una baja temperatura (cercana o menor a 4 [°C]) para evitar su descomposición.

3.1.4 Carne de cerdo

Un informe publicado por el Instituto Nacional de Estadísticas indica que en el año 2018 el consumo de carne de cerdo fue de 16,8 kilos por persona, ubicándose en el tercer lugar de las preferencias, después de la carne de bovino [54]. El mismo informe señala que la carne de cerdo fue la segunda más elaborada, representando un 35% de la producción total de carnes elaboradas en el país con 534.024 [t/vara], como se observa en el Gráfico 1.

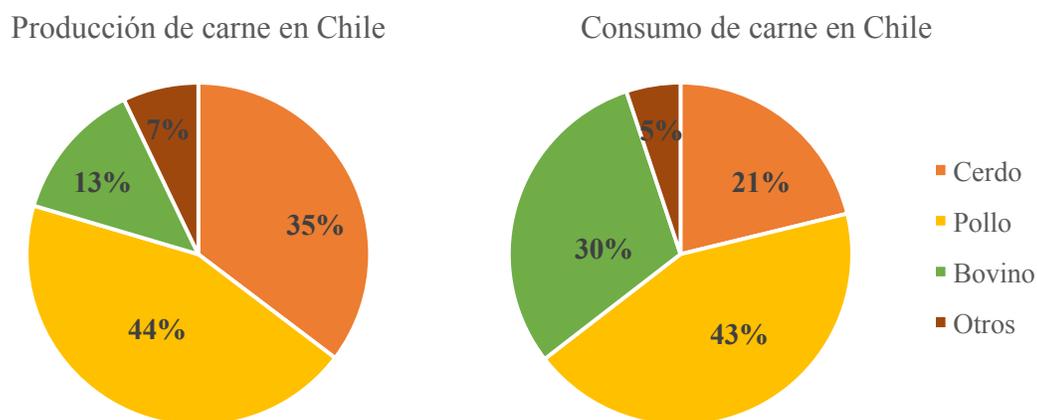


Gráfico 1. Consumo y producción total de carne en Chile el año 2018. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadísticas [54].

Por otro lado, se proyecta que el consumo de carne de cerdo para el año 2030 se incrementará en un 32% [62]. Mientras que la demanda de carne de vacuno se espera que crezca un 6% en países desarrollados y 17% en las regiones en desarrollo a 2026 [63]. Así, al proyectar el consumo de esta carne para el año 2030 no se encuentra una diferencia significativa.

En cuanto a la producción, estima que al año 2030 existirá un aumento del 79% en el número de porcinos, y por el contrario, se proyecta una caída de un 7% en el número de bovinos destinados a la industria de la carne [64]. Si bien un gran porcentaje de la producción interna

de carne de cerdo se destina a exportación, ésta genera un impacto ambiental local, como por ejemplo emisiones GEI, que de acuerdo a la metodología establecida por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, deben ser contabilizadas en la sumatoria total de emisiones del país. Quedan fuera de la sumatoria las emisiones GEI asociadas al uso de combustible durante el transporte internacional del producto [65].

Entonces, dado que la producción de carne, actual y futura, de cerdo es superior a la bovina y que esta memoria estudia impacto ambiental de procesos de producción y venta en Chile, se decide analizar el ciclo de vida de la carne de cerdo.

En los siguientes apartados se detallan más antecedentes de producción nacional e información de la fabricación de carne de cerdo.

3.1.4.1 Antecedentes de la producción de carne de cerdo

El sistema de producción intensivo (en el que los animales se mantienen en corrales o jaulas, existe un importante uso de tecnología y se tiene un estricto nivel de bioseguridad) es el más usado en el país. Para lograr rentabilidad, la industria nacional mantiene un modelo de integración vertical, esto es que la elaboración de la carne, producción de alimentos de los animales, distribución, entre otros procesos, son realizados por los mismos productores. Las plantas productoras se encuentran en las regiones del Maule, Valparaíso, Bío-Bío, La Araucanía y, concentrando un 70% de la actividad productiva, en la región Metropolitana y de O'Higgins [57].

En Chile se trabaja con diferentes razas de cerdos, debido a que existe una amplia gama de productos (cortes como lomo, chuleta, costillas, entre otros) y subproductos (embutidos como jamón, tocino, longanizas, etcétera). Estas razas se han optimizado para tener una mayor conversión de alimento en crecimiento muscular del cerdo. En la actualidad, en seis meses, se obtienen cerdos con una masa de 120 [kg] [66].

Desde el año 2002, en promedio, la producción nacional de carne de cerdo ha aumentado un 3% anual [54]. Este incremento se orienta principalmente en la elaboración de productos para satisfacer el mercado internacional. En 2018, Chile llegó al número 5 en el ranking de exportación mundial de cerdo, al enviar al extranjero un 63% de la producción nacional (336.329 [t/vara] de esta carne), en su mayor parte a Japón (27%) y Corea del Sur (23%) [57].

3.1.4.2 Proceso productivo

El proceso inicia con la inseminación artificial de hembras, de mínimo 230 días de vida. Luego de 112 días de gestación nacen los cerdos. Tanto las madres (llamadas chanchillas) como las crías son trasladadas a un pabellón de lactancia con lámparas calefactoras que mantienen la temperatura de 28 a 30 [°C] y bajo cuidados intensivos. Después de 21 días se realiza el destete de las crías, en donde se separan de sus madres, y se comienzan a engordar los cerdos. Las madres guardan reposo durante cuatro días, y en el quinto vuelven a ser inseminadas, comenzando un nuevo ciclo [67].

El alimento que recibe el animal de engorde se aumenta a medida que gana peso, llegando a los 3,5 [kg] de comida. En promedio, consumen 2,1 [kg] de alimento diario. Durante todo el proceso se mantienen aireados los pabellones, mediante el uso de ventiladores y extractores de aire, para así remover gases perjudiciales y regular la temperatura. Transcurridos 159 días en engorde, los cerdos alcanzan 120 [kg] y son transportados a la planta faenadora, en donde se obtienen 94,4 [kg] de carne de cada cerdo, es decir, un 79% de la masa del cerdo vivo se convierte en alimento para humanos [68].

Al llegar a la planta faenadora, los cerdos son insensibilizados mediante pistolas neumáticas, corriente eléctrica o con un sistema de atmósfera controlada de CO₂ y son colgados de sus patas traseras. El método de insensibilizado con CO₂ es el más utilizado, ya que no altera el sistema circulatorio permitiendo que se realice de mejor manera la etapa siguiente, que es el desangrado, en donde se le provoca la muerte al animal mediante un corte en el cuello, por el que se elimina el 80% de su sangre durante 6 minutos. La sangre es recolectada y sólo puede ser aprovechada (y enviada a una planta de Rendering) cuando no se contamina con otros fluidos del cerdo, en el caso contrario se debe desechar [69].

Posteriormente, se realiza el escaldado, que consiste en usar atomizadores para esparcir vapor sobre la piel del cerdo, ablandando el pelo y uñas, facilitando la tarea de la depiladora. Luego, con el objetivo de eliminar microorganismos y pelo residual, se hace un flameado (a una temperatura de 900 a 1.000 [°C]) con un soplete de gas licuado. Después, se lava completamente al animal usando rociadores de agua. Una vez limpio se extraen las vísceras abdominales y torácicas, lo que se conoce como evisceración. A continuación, se extrae el contenido del tubo digestivo, se descabeza y divide en dos partes iguales al cerdo (que a partir de ahora se denomina “canal”). Se hace un último lavado, en el que se libera el 20% restante de sangre acumulada entre los músculos e interiores. En seguida, se coloca la canal en refrigeración (con una temperatura entre -1 y 3 [°C]) por 24 horas hasta que alcanza los 4 [°C]. Por último, se secciona el cerdo en distintos cortes de carne y se almacena en una cámara de frío o se traslada al punto de venta en camiones a baja temperatura en donde, para evitar que pierda sus características, al llegar se debe colocar en refrigeración [70].

3.2 Metodología Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (a partir de ahora, ACV) de un producto, abarca todos los efectos ambientales derivados desde el proceso de manufactura del producto hasta su consumo o deposición final como residuo.

La Organización Internacional de Estandarización (ISO en sus siglas en inglés) establece la normativa que se debe seguir al realizar un ACV [71]:

- ISO 14.040: Detalla el marco general, principios y necesidades mínimas para llevar a cabo un ACV.
- ISO 14.041: Especifica el procedimiento para definir los objetivos, el alcance del estudio y para realizar, interpretar y elaborar el análisis del inventario del ACV.
- ISO 14.042: Se precisan los requerimientos de la estructura general de la fase de análisis de impacto (AICV), y se relaciona con otras fases.

- ISO 14.043: Proporciona sugerencias para la fase de interpretación del ACV.

La metodología planteada por la normativa ISO divide el estudio en cuatro fases: objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación. Éstas se explican a continuación [72].

3.2.1 Objetivos y alcance

El objetivo contiene una definición general del tema a analizar, la aplicación prevista, a quién se dirige el estudio y los motivos que incentivan su realización. Por otra parte, en el alcance del estudio se define el sistema o los escenarios a analizar, se establece la unidad funcional y los límites del sistema [73].

El sistema o escenario se describe como el conjunto de etapas que se evaluarán del ciclo de vida del producto, de acuerdo a los objetivos planteados. La unidad funcional es una descripción cuantitativa de lo que se desea estudiar en el sistema. Se utiliza para establecer un punto de comparación entre los resultados del ACV de dos sistemas, ya que otorga una referencia respecto a la cual entradas y salidas pueden normalizarse. Por ejemplo, en la producción agrícola, se utiliza un kilogramo de producto fresco como unidad funcional, debido a que lo primordial es la elaboración de alimentos; en el caso de una planta de tratamiento de agua la unidad funcional podría definirse como $1 m^3$ de agua tratada; en el análisis de la producción de una taza café la unidad funcional puede ser $7 [g]$ de café envasado, que es la masa de café en polvo utilizada en una taza estándar.

En los límites del sistema se determina el inicio y final de los procesos unitarios que deben incluirse en el ACV. Dentro de esta etapa se deben identificar y justificar las entradas y salidas que se van a considerar en el sistema.

3.2.2 Análisis de inventario

En esta fase se miden todas las entradas y salidas del estudio. Para ello, se adquieren los datos y procedimientos de cálculo que serán empleados para identificar y cuantificar los efectos ambientales adversos, asociados a la unidad funcional. Se incluye en esta categoría el ingreso de materias primas y energía, y el uso del suelo; y la salida de productos, residuos, emisiones a la atmósfera y vertidos al suelo y al agua.

Es importante validar los datos recopilados mediante cálculos, estimaciones o comparaciones, para obtener resultados fidedignos. Además, se debe considerar su procedencia geográfica y hace cuánto tiempo y con qué tecnología se realizó la medición del parámetro. En este trabajo se usarán datos proporcionados por páginas del Estado y de empresas privadas.

Se destaca que, a partir de los datos recabados, puede ser necesario eliminar o agregar un proceso unitario, por lo que los límites del sistema se encuentran en constante modificación.

3.2.3 Evaluación de impacto ambiental

Cada entrada y salida, cuantificada en el análisis de inventario, puede originar variadas cargas ambientales (Figura 2). En esta fase de evaluación, se relaciona una categoría de impacto con los datos obtenidos en el inventario, con el fin de observar cuán significativas son estas cargas.

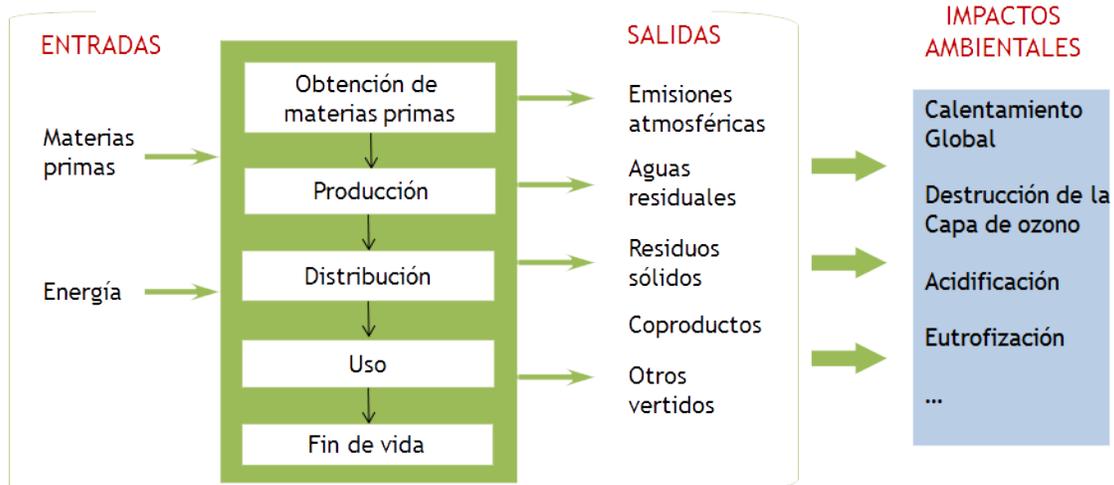


Figura 2. Composición de un sistema en estudio, sus entradas, salidas y posibles impactos ambientales [74].

La evaluación consta de tres elementos obligatorios y optativos:

- Elementos obligatorios:
 - Selección de categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de caracterización (se recomienda elegir aquellos que estén aceptados internacionalmente).
 - Clasificación: asignación de resultados del Impacto del Ciclo de Vida.
 - Caracterización: cálculo de resultados del indicador de la categoría.
- Elementos optativos:
 - Normalización: cuantificación del valor de los resultados del indicador de la categoría con respecto a la información de referencia.
 - Agrupación.
 - Ponderación.

En la relevancia ambiental del indicador o categoría se debe definir claramente el área, escala y duración o tiempo de residencia del impacto.

3.2.4 Interpretación

La interpretación se lleva a cabo combinando los resultados del análisis de inventario y de la evaluación de impacto. Se espera que los resultados permitan determinar las fases del ciclo de un producto que generan la mayor contribución de cargas ambientales, y por lo tanto en la que se podrían realizar modificaciones o innovaciones; o si la finalidad consistía en comparar casos, determinar cuál de ellos genera el menor impacto. Los resultados deben ser coherentes con el objetivo y alcance del estudio.

El objetivo de esta etapa es elaborar conclusiones, identificar limitaciones, estudiar la sensibilidad de los resultados y desarrollar recomendaciones dirigidas al público definido del ACV.

3.3 Indicador Huella ecológica

La huella ecológica de un producto se define como la representación en superficie de tierra y agua biológicamente productivas, para generar las materias primas empleadas en su elaboración, y para absorber parte de los residuos o emisiones que provoca su consumo o disposición. Sin embargo, el flujo de agua dulce no es contabilizado en la huella ecológica, porque pese a ser un recurso natural relacionado a servicios y confección de bienes, no es en sí mismo un material hecho por un área biológicamente productiva o un desecho. En consecuencia, no se puede calcular una superficie mediante valores de rendimiento, sólo se podría estimar un área de captación de determinados litros que son consumidos durante el ciclo. No obstante, esa área no se puede agregar a la sumatoria de superficies terrestres, ya que se contaría dos veces. Por ejemplo, para la fabricación de madera se utilizan los árboles y agua de un bosque; sumando los valores de ambos, se haría un conteo doble de la superficie de bosque disponible [75].

Como resultado de lo anterior, en el análisis de esta memoria no se incluye el consumo de agua. Se abarcarán las emisiones de dióxido de carbono, impactos relacionados al consumo energético y ocupación de suelo, los tres principales recursos que se ven afectados por la producción alimenticia de proteínas. Además, en el presente estudio se usará el indicador huella ecológica como una manera de cuantificar el impacto ambiental de la producción alimenticia, de la manera más amplia posible, respecto a los datos disponibles y la duración de la memoria.

En el contexto de un ACV, la huella ecológica (EF) se define como la suma del uso directo e indirecto de tierra, que se relaciona a la absorción de emisiones de CO_2 y al uso de energía eléctrica o combustibles fósiles, como se muestra en la Ecuación 1 [76]. Su unidad de medida es la hectárea global (gha) y metro cuadrado en un año (m^2yr) [77]. En el análisis se utiliza la última para que el resultado sea más evidente y perceptible para el lector.

$$EF = EF_{directo} + EF_{CO_2} + EF_{energía\ eléctrica} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$EF_{directo}$ corresponde al área utilizada directamente, ya sea por una edificación, un bosque, tierras de cultivo o pastizal. Se calcula de la siguiente forma:

$$EF_{directo} = \sum_a A_a \cdot EqF_a \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la ecuación anterior, a es el tipo de suelo (edificación, un bosque, tierras de cultivo o pastizal), A_a es el área ocupada por el tipo de suelo a en metros cuadrados por año (m^2yr) y EqF_a representa un *factor de equivalencia* de ese suelo, creado para poder comparar superficies con distintos valores biológicos. Por ejemplo, es distinto construir un condominio en una hectárea desértica a hacerlo en una hectárea de bosque, debido a que el bosque es tierra fértil, de él se puede obtener alimento, agua dulce y es un captador de CO_2 . De manera

que, para contrastar el efecto que tendría la construcción en ambos lugares, se convierten tierras de diferente tipo en un equivalente global mediante estos factores adimensionales. Así, las tierras de alta productividad (como la tierra de cultivo) tienen un factor de equivalencia más alto que aquellas con baja productividad (como un pastizal) [78]. En la Tabla 3 se pueden observar los valores que poseen los suelos mencionados.

Tabla 3. Factores de equivalencia para distintos tipos de suelo. Los valores son adimensionales y extraídos de bibliografía [76].

Parámetro	Símbolo	Valor
Factor de equivalencia de bosque	EqF_f	1,4
Factor de equivalencia de construcción	EqF_b	2,2
Factor de equivalencia de tierra de cultivo	EqF_c	2,2
Factor de equivalencia de pastizal	EqF_p	0,5

Continuando con la Ecuación 1, la huella ecológica de dióxido de carbono, de símbolo EF_{CO_2} , es el área biológicamente productiva requerida para captar el CO_2 atmosférico liberado en el transporte de alimentos, en la fabricación de producto y en la respiración animal. Esta área se obtiene de la Ecuación 3:

$$EF_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot \frac{1-F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f \quad (\text{Ecuación 3})$$

M_{CO_2} es la masa total de CO_2 emitida directamente durante el ciclo de vida del producto (menos la emisión asociada a la matriz energética), S_{CO_2} es la tasa de fijación de CO_2 por parte de biomasa, cuyo valor es 0,4 [$kgCO_2/m^2 \cdot yr$], y F_{CO_2} es un adimensional, corresponde a la fracción de dióxido de carbono que absorbe el océano, tiene un valor de 0,3 [76]. Las emisiones asociadas a la generación de energía eléctrica no se incluyen en la huella ecológica de dióxido de carbono, ya que tiene un factor separado (explicado en el párrafo siguiente), y se estaría duplicando el recuento.

Finalmente, $EF_{energía\ eléctrica}$ es aquella superficie ocupada indirectamente para producir la energía necesaria consumida en el ciclo. Se calcula como se muestra a continuación:

$$EF_{energía\ eléctrica} = E_{cons} \cdot I_{CO_2} \cdot \frac{1-F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f \quad (\text{Ecuación 4})$$

En la ecuación anterior, E_{cons} consiste en el consumo directo de energía eléctrica en [MJ] e I_{CO_2} es la intensidad ponderada de emisión de CO_2 por consumo eléctrico, tiene un valor de 0,12 [$kgCO_2eq/MJ$] y depende de la matriz energética del país, los demás coeficientes son análogos a los definidos en EF_{CO_2} . En el Anexo A se detalla el cálculo de I_{CO_2} .

4. Estado del arte

A continuación se presenta una visión general de estudios realizados con la metodología de ACV. Primero, se hace un seguimiento histórico al proceso de diseño del Análisis de Ciclo de Vida en el mundo. Luego, se especifica la aplicación de ACV en alimentos a nivel mundial y local. Finalmente, se muestran los resultados de un caso de referencia cuyos objetivos son similares al estudio de esta memoria.

4.1 Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) tuvo sus inicios en la década de 1960, como consecuencia de la creciente preocupación por el agotamiento de materias primas, en particular de combustibles fósiles utilizados para producir energía. En una primera fase, el estudio se limitaba a un análisis de consumo energético, pero rápidamente se amplió para incluir emisiones y residuos generados. En 1969, The Coca-Cola Company efectuó uno de los primeros ACV, con la finalidad de comparar las cargas ambientales derivadas del proceso de fabricación de distintos envases de bebidas [79].

Durante la década de 1970 a 1990 se realizaron numerosos ACV, sin embargo, dado que no se contaba con una metodología internacional estándar a seguir, ni con criterios de selección de datos, dos ACV con el mismo objetivo podían tener resultados diferentes, por lo que esta herramienta aún no se consolidaba como un método confiable de cuantificación de impacto ambiental. En años posteriores, reconocidas entidades internacionales diseñaron una metodología para desarrollar un ACV y, paralelamente, se crearon bases de datos de alta calidad, que cubren todos los sectores industriales; entre ellas, Ecoinvent [80].

En Chile se implementa esta metodología hace aproximadamente 5 años. Su desarrollo se ha vinculado en mayor parte a investigaciones en universidades, aunque también el análisis es realizado por empresas privadas que lo ofrecen como servicio de evaluación ambiental de productos.

4.1.1 Aplicación en alimentos

4.1.1.1 Escenario internacional

El Análisis de Ciclo de Vida se ha aplicado en alimentos desde los años 90, debido a la creciente preocupación por disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG por sus siglas en inglés), y por utilizar los recursos ambientales eficientemente.

A partir de la lectura de cinco *review* sobre ACV en agricultura y ganadería, de distintos países, se encontró que los objetivos más frecuentes para realizar este estudio son [81][82][83][84][85]:

- Hacer un perfil de la carga ambiental del alimento y su proceso de producción, sin intención de generalizar, sino que se trata como un caso de estudio particular.
- Identificar aquellas etapas en la cadena productiva que provocan el mayor impacto

negativo.

- Dar sugerencias después de evaluar el proceso, planteando estrategias que puedan mejorar el desempeño ambiental.
- Comparar la carga ambiental de distintos productos alimenticios en base a una unidad de masa o nutriente.
- Comparar la carga ambiental provocada por las distintas formas de producción de un mismo alimento. Por ejemplo, elaboración de tomates mediante agricultura convencional frente a la orgánica.
- Comparar indicadores de análisis medioambiental, como por ejemplo potencial de calentamiento ambiental, huella ecológica, huella de agua, etcétera.

Pese a que en general el objetivo de determinar la carga ambiental está presente en todos los análisis, los estudios se enfocan principalmente en comparaciones, ya sea de los impactos ambientales entre ciertos productos o etapas de un proceso productivo, o la forma de calcular los resultados.

La unidad funcional más utilizada es la masa de producto final (en kilogramo o tonelada). Sin embargo, como esta unidad no incorpora una medición de la calidad que posee el producto, conviene incorporar un porcentaje de descarte de productos que no cumplen con los estándares establecidos, para así tener un valor en masa final más cercano al real. En segundo lugar, se encontraron análisis cuya unidad funcional era el uso de tierra (en metros cuadrados o hectáreas por año), que se define como la superficie de suelo dedicada directamente a producción (por cultivo o edificación) más el área requerida para elaborar las materias primas.

Aunque la evaluación del ciclo de vida debería abarcar “desde la cuna a la tumba”, la mayoría de los estudios definieron sus límites del sistema desde la cuna hasta la puerta de salida de la granja, en el caso de los animales, y hasta la cosecha, en vegetales. Esto porque en estudios anteriores se reconoce que el período de alimentación del ganado y el período de crecimiento de los cultivos son los que generan mayores cargas ambientales. En particular, un *review* que analiza 52 ACV en fuentes de proteína, concluyó que el envasado (o “*packaging*”) de carne de cerdo en envase plástico, contribuía sólo en un 4% a la huella de carbono total; por otro lado, el transporte de carne de pollo y cerdo correspondía, en promedio, a un 10% de la huella de carbono total. Los procesos posteriores a la producción, como el almacenamiento en punto de venta y cocción del alimento, han sido escasamente abordados y podrían arrojar diferencias significativas entre cada proteína, debido principalmente a la refrigeración requerida en el caso de la carne [82].

Por otro lado, las categorías de impacto más observadas en los estudios son potencial de cambio climático, eutrofización, acidificación, uso energético, impacto en uso del suelo. Se destaca que uno de los problemas de realizar ACV en productos vegetales o animales es que los efectos ambientales son a menudo locales y difíciles de cuantificar (como la degradación del suelo, fragmentación del hábitat natural o el agotamiento de aguas subterráneas). Además, se debe tener en consideración las características propias de los sistemas biológicos, como la variabilidad y poca predictibilidad de éstos. Por lo anterior, es importante dejar explícito si

los datos utilizados corresponden a un promedio, proyecciones o suposiciones, para luego discutir sobre la calidad de ellos.

En cuanto a resultados obtenidos, un *review* de ACV realizados en diversas localidades (principalmente en Europa, Estados Unidos y Australia), entre los años 2.000 y 2.015, recopiló valores de la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global (PCG) de diferentes alimentos. En la mayoría de los estudios se produjeron múltiples valores de PCG, ya que el ACV es usado comúnmente con el objetivo de comparar diferentes regiones de cultivo, métodos o tecnologías de producción. Entonces, para permitir la comparación, todos los ACV se posicionaron dentro de los límites señalados en la Figura 3 [86].

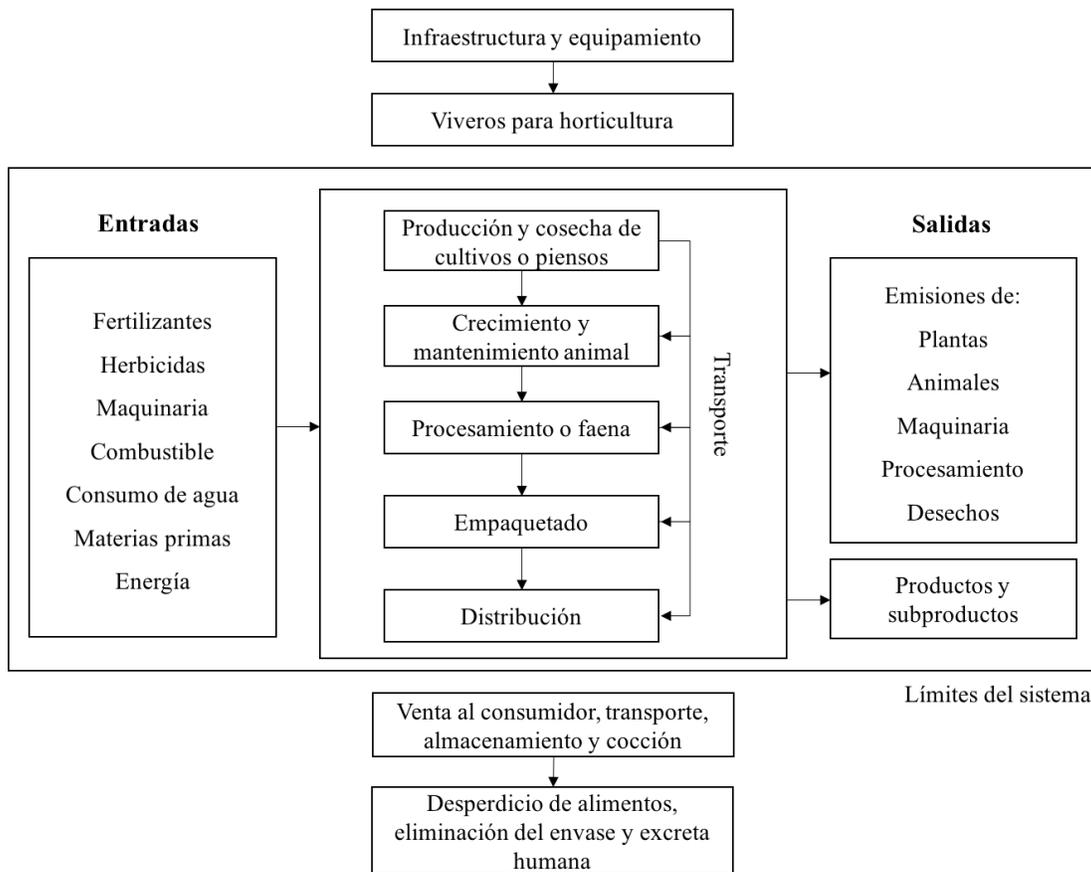


Figura 3. Entradas, salidas y límites del sistema impuestos en el *review* [86].

El resumen de resultados de algunos alimentos y las proteínas de interés se encuentra en la Tabla 4. En el *review* se concluye que las legumbres, cereales y vegetales poseen los menores valores de PCG, siendo el arroz el cultivo con mayor impacto ambiental. Los animales no rumiantes (como peces, pollo y cerdo) tuvieron valores intermedios, mientras que los rumiantes alcanzaron las cifras más altas de PCG. Es importante mencionar que se debe tener precaución al comparar Análisis de Ciclo de Vida, debido a las variaciones en las actividades consideradas dentro de los límites, las unidades funcionales y diferencias temporales y regionales. A pesar de ello, se incluyen para tener una idea del orden de magnitud del impacto ambiental en producción de proteínas registrada en otros países.

Tabla 4. Recopilación de valores de PCG obtenidos en el *review* [86].

Proteína	Promedio [kgCO ₂ eq/kg]	Mediana [kgCO ₂ eq/kg]	PCG min [kgCO ₂ eq/kg]	PCG max [kgCO ₂ eq/kg]	Nº de ACV	Nº de PCG calculados
Hortalizas	0,37	0,47	0,04	2,54	33	140
Porotos	0,43	0,62	0,22	1,55	11	22
Cereales	0,50	0,53	0,11	1,38	31	90
Lentejas	1,03	1,03	1,0	1,06	2	2
Pescado	3,49	4,41	0,78	20,86	47	148
Pollo	3,65	4,12	1,06	9,98	29	95
Cerdo	5,77	5,85	3,2	11,86	38	130
Vacuno	26,61	28,73	10,74	109,5	49	165

Otro estudio, realizado por la publicación en línea “OurWorldInData” [87], recopiló datos de emisiones de gases de efecto invernadero, en 119 países, de 29 productos alimenticios, entre los que se encuentra la carne de pollo y cerdo, y la arveja como única legumbre. Los resultados se dividen en las siete etapas de la cadena de suministro consideradas:

- Cambio de uso de suelo: Cambios en la superficie por deforestación y cambios más profundos en la concentración de carbono del suelo.
- Etapa agrícola: Emisiones de metano y dióxido de carbono de animales, emisiones de fertilizantes, estiércol y maquinaria agrícola.
- Alimento animal: Emisiones de la producción de cultivos y su procesamiento para elaborar alimento de ganado.
- Procesamiento: Emisiones del consumo energético requerido para convertir las materias primas en productos aptos para el consumo humano.
- Transporte: Emisiones del uso de energía durante el transporte de los alimentos.
- Venta al cliente: Emisiones de la energía que demanda la refrigeración del producto u otro proceso necesario para el producto.
- Envasado: Emisiones de la producción del empaque, transporte de materiales y disposición final de éste.

Los resultados nuevamente indican que los alimentos de origen animal tienen un impacto superior que los de origen vegetal. La carne de pollo y cerdo tuvieron emisiones seis y siete veces mayores que las arvejas, respectivamente. Además, del estudio se concluye que el CO₂ es el gas de efecto invernadero más importante, pero no el único: la agricultura es una gran fuente emisora de metano y óxido nitroso. En la mayoría de los alimentos las emisiones GEI de los procesos de la etapa agrícola, que incluye la aplicación de fertilizantes y la fermentación entérica del ganado, fueron predominantes. Particularmente, en la carne también son significativas las emisiones de la etapa de alimentación y cambio de uso de suelo. Los procesos en la cadena de suministro después de que el alimento sale de la granja (procesamiento, transporte, venta al cliente y envasado) representan un reducido porcentaje de las emisiones [87].

A partir de los numerosos estudios internacionales hechos a la producción de carne, se puede afirmar que hay un consenso en que las mayores cargas ambientales provienen de la etapa de crecimiento del animal, producto de la elaboración de alimento, la gestión del estiércol y la emanación intestinal de gases de efecto invernadero de los animales. Independiente de la

unidad funcional, los ACV en general tuvieron como resultado, en orden creciente de impacto ambiental: pollo, cerdo y vacuno. En el caso de las legumbres, los ACV disponibles señalan que la actividad con emisiones más significativas es el uso de maquinaria agrícola y la fabricación y aplicación de fertilizantes.

Se advierte que existe un exiguo número de ACV en legumbres, en comparación a los estudios en carnes. Esto porque en general se reconoce que la producción de carne es un problema, y se intentan crear tecnologías, alimentos u otras formas de reducir los impactos de sus procesos. Sin embargo, independiente de las optimizaciones planteadas a los procesos productivos de los alimentos derivados de animales, su impacto continúa resultando mayor a aquellos que provienen de cultivos (Tabla 4). Debido a esto, en esta memoria se propone un cambio de dieta: reemplazar la proteína animal por un equivalente nutricional en base a plantas. Adicionalmente, se desarrolla el análisis desde la perspectiva del consumidor o consumidora, incorporando la etapa de cocción en el ACV, cuyo impacto ambiental es escasamente abordado.

4.1.1.2 Escenario chileno

En el sector agroalimentario nacional los Análisis de Ciclo de Vida son reducidos. El estado del arte que se encuentra disponible públicamente consiste, en su mayoría, en estudios realizados en el contexto universitario. A continuación, se presentan tres investigaciones que incluyen ACV.

En el año 2012 la planta de producción porcina intensiva de la empresa Agrosuper, ubicada en el valle de Huasco, fue clausurada por la generación de malos olores. A raíz de esto, se emplea la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en el proceso de producción porcina, con el objetivo de crear bases técnicas y procedimientos que cuantifiquen el impacto ambiental, y así generar herramientas para detectar emisiones perjudiciales durante el proceso productivo. A partir de estimaciones se descubrió que la planta de tratamiento de lodos se encontraba procesando un 53% más de la capacidad para la que fue diseñada. Del modelo creado, se concluye que el mayor impacto ambiental de la planta fue la eutrofización, derivada del tratamiento de residuos industriales líquidos (RILes), a causa de las altas cargas orgánicas emitidas por la planta de lodos activados [88].

Un segundo trabajo, patrocinado por la Fundación Chile, utilizó el ACV con la finalidad de determinar medidas costo-eficientes que permitieran reducir el impacto ambiental de la empresa productora de lechugas Hidropónicos La Cruz. Como resultado se obtuvo que más del 80% de las cargas ambientales se encuentran en la extracción y distribución de materias primas y el almacenamiento de producto terminado, debido al transporte (proviene de Holanda) y a la energía usada en refrigeración, respectivamente. Por lo tanto, las recomendaciones dadas consistían en cambiar de proveedores a unos más cercanos, comprar vehículos de transporte menos contaminantes e instalar paneles fotovoltaicos para proveer energía durante el almacenamiento [89].

Por último, con el propósito de conocer los efectos ambientales de su producción, la empresa Concha y Toro realiza un ACV en su producto más vendido: la botella de *Cabernet Sauvignon* de 750 [cc]. Los resultados muestran que el 42% de las cargas ambientales

proviene del proceso de cultivo, un 29% del embotellado, un 18% de la distribución de producto y un 11% de la producción. Además, las categorías de impacto más importantes son cambio climático (con un 51%) y uso de agua (con un 23%) [90].

A partir de los estudios nacionales revisados se observa que los ACV en alimentos se enfocan en proponer mejoras a un proceso específico por empresa, sin comparaciones entre distintos productos y sin abarcar etapas posteriores al envasado en planta. Por lo tanto, esta memoria entrega un aporte importante sobre el análisis de la producción de proteína en territorio nacional, más allá de los límites de una fábrica, a través de una equivalencia nutricional que haga justa la comparación.

4.1.2 Caso relacionado

4.1.2.1 Análisis de impacto ambiental de la dieta promedio chilena

Este estudio fue seleccionado como caso relacionado a esta memoria porque también busca levantar información sobre el impacto que posee la alimentación en Chile, usando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

El objetivo general del estudio, realizado en 2017, es medir el impacto ambiental mediante un Análisis de Ciclo de Vida, usando las huellas de carbono, de agua y energía de los principales alimentos incluidos en la dieta de un chileno y una chilena promedio, para luego proponer políticas públicas (impuestos, subsidios, aplicación de nuevas tecnologías, entre otras) que reduzcan el impacto ambiental calculado [91].

Se expuso el impacto ambiental de los principales alimentos consumidos en Chile disponibles en Ecobase, y a partir de ellos se configuró la dieta promedio. Los límites del sistema eran distintos para cada producto, pero en su mayoría se considera toda la cadena de producción, desde el cultivo hasta el transporte. Los datos de las huellas de carbono, de agua y de energía fueron extraídos de una base de datos de Países Bajos, por lo que pueden no representar la realidad chilena, y queda propuesto generar los datos necesarios para repetir el estudio con referencias nacionales.

Se hicieron seis optimizaciones a la dieta chilena promedio para personas entre 31 a 50 años, puesto que la edad promedio en Chile es de 35 años. Por otro lado, como un 80% de la población es sedentaria, se seleccionó ese estilo de vida como el más representativo. La estrategia fue minimizar la huella de carbono (enfocándose en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero) y/o reducir el índice ReCiPe haciendo cambios leves en la dieta de las personas. Así, se configuraron seis casos:

- Caso 1: Hombre 31-50 años, inactivo, minimizando la huella de carbono (HC) un 10%.
- Caso 2: Mujer 31-50 años, inactiva, minimizando HC un 10%.
- Caso 3: Hombre 31-50 años, inactivo, minimizando HC un 20%.
- Caso 4: Mujer 31-50 años, inactiva, minimizando HC un 20%.
- Caso 5: Hombre 31-50 años, inactivo, minimizando índice ReCiPe y HC un 20%.
- Caso 6: Mujer 31-50 años, inactiva, minimizando índice ReCiPe y HC un 20%.

Los resultados obtenidos sugieren un aumento en el consumo de agua, té herbal, vegetales, hortalizas y legumbres y una disminución de la ingesta de bebidas cola, café instantáneo, cerveza, lácteos y carne (este último hasta un 70%). Además, se plantea prudente reemplazar las carnes rojas por carne de pollo.

Dado lo anterior, algunas de las políticas públicas que se propusieron fueron:

- Etiquetas ecológicas: Corresponde a una herramienta que sirve para satisfacer la demanda de información ambiental sobre un producto por parte de los compradores. Funciona de la misma forma que los sellos en la ley de etiquetados. Se recomienda especialmente, ya que también estimula a las empresas a adoptar procesos productivos más comprometidos con el medio ambiente, para darle valor agregado a sus productos.
- Campaña “Lunes sin Carne”: El objetivo es que las personas conozcan platos preparados sin carne, para derribar mitos y prejuicios. En Chile se puede implementar esta campaña en colegios públicos (e incentivar la adhesión de colegios privados) ofreciendo un menú vegetariano o vegano los días lunes. De manera que los niños y las niñas se familiaricen con este estilo de alimentación a una edad temprana, generando hábitos saludables y conciencia ambiental.
- Restricciones a la publicidad: Consiste en añadir un factor ambiental a la ya existente restricción publicitaria de los alimentos con contenido superior de azúcar, grasas saturadas o sodio a los límites establecidos por el MINSAL. Adicionalmente, se propone evitar un posible Greenwashing (presentar un producto de forma tal que parezca que posee virtudes ecológicas, cuando no las tiene) definiendo bajo qué certificaciones se pueden usar términos como “ecológico” o “sustentable” en la publicidad.

Finalmente, se concluye que las personas pueden disminuir el impacto ambiental al reemplazar ciertos alimentos de su dieta que generan mayores cargas ambientales, y que es muy importante que se eduque a la población, para que aumenten los consumidores informados y responsables que, a su vez, exijan (al gobierno o a las mismas empresas) cambiar los procesos productivos de las industrias a unos sustentables.

Las investigaciones existentes, tanto nacionales como internacionales, casi en su totalidad se centran sólo en el proceso de producción, por lo que resulta interesante estudiar, por ejemplo, cuánto influye la cadena de frío que sucede a la salida de la planta o si tiene relevancia el tipo de energía que se use al cocer la proteína; todo desde una comparación nutricional, para que la medición sea justa.

5. Análisis de Ciclo de Vida

En el siguiente capítulo se desarrollaran las etapas del ACV, siguiendo la metodología descrita en secciones anteriores.

5.1 Objetivo del estudio

En la presente memoria se estudian cuatro sistemas de obtención de proteínas nutricionalmente equivalentes, dos de origen vegetal y dos de origen animal. Los sistemas analizados comprenden desde el crecimiento hasta el consumo del producto. Las plantas productivas y terrenos de cultivo se situaron en la ciudad Rengo perteneciente a la región de O'Higgins, ya que en esta región se producen las cuatro proteínas estudiadas; el punto de venta y lugar de consumo se ubica en la comuna con mayor población de Chile: Puente Alto, en la región Metropolitana.

Actualmente existe una tendencia a preferir alimentos con mejor valor nutricional y orientados a la sustentabilidad [92]. Esta preocupación por disminuir el impacto ambiental personal contrasta, sin embargo, con la escasa disponibilidad de información sobre los procesos productivos o las certificaciones de productos en el mercado; incluso a nivel de gobierno se han percatado de este problema, y han formulado proyectos para levantar información fidedigna y clara a la que pueda acceder la población [93][94].

El análisis se realiza con el objetivo de cubrir la necesidad de información del consumidor sobre el impacto ambiental del ciclo productivo de cuatro proteínas, de manera que éste lo pueda incluir como un factor a considerar en su decisión de compra. Para ello, se van a cuantificar las cargas ambientales, desde la producción hasta la cocción, de lentejas, porotos, carne de cerdo y de pollo. A partir de esos resultados se van a comparar sus efectos ambientales y se espera que el consumidor cambie sus patrones alimenticios por la opción que genere el menor impacto ambiental.

5.2 Alcance del estudio

5.2.1 Sistemas

Los primeros dos sistemas consisten en el ciclo de vida de la elaboración de las leguminosas poroto y lenteja, abarca desde que se recibe la semilla hasta la legumbre cocida. Las etapas intermedias se muestran en la Figura 4. El "Cultivo" incluye cuatro procesos: la preparación del suelo, la siembra, el crecimiento y cosecha de los granos; también se suman las emisiones GEI derivadas de la producción de energía y de la "Producción de agroquímicos", es decir, la fabricación de fertilizantes, insecticidas, herbicidas y fungicidas. La "Recolección de materia orgánica" se refiere al acopio de los residuos de las legumbres, que consisten en la planta completa menos la semilla comestible. Los residuos son retirados por productores ganaderos ya que, por su alto contenido proteico, pueden ser incluidos como forraje fresco en la dieta de animales rumiantes. El "Transporte" y "Almacenamiento" constan de una operación unitaria, y el "Envasado" de cuatro. Finalmente, la "Cocción" de la legumbre se evaluará en una cocina a gas y en una eléctrica, debido a que en un informe de caracterización

residencial del Ministerio de energía, año 2018, las tres cocinas más usadas en la zona térmica 3 (que incluye a la región Metropolitana) son la cocina con gas licuado de petróleo (30%), gas natural (10%) y eléctrica o encimera (1,4%) [95].

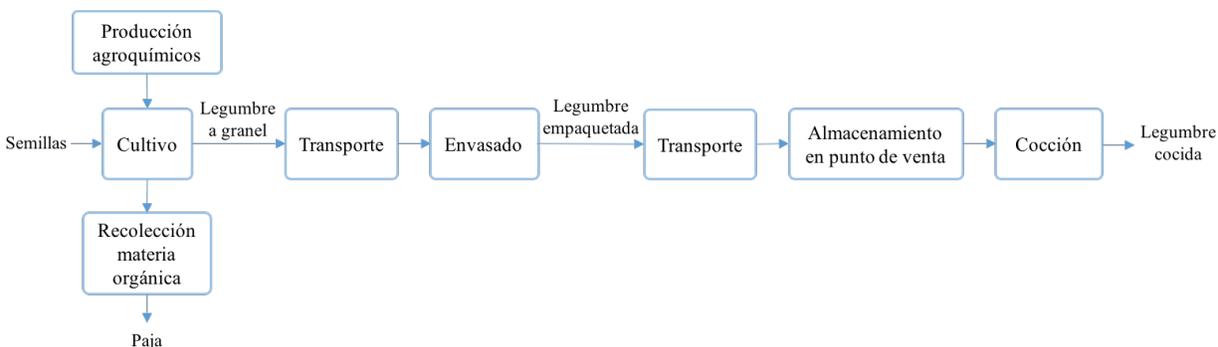


Figura 4. Etapas del ciclo de vida de la producción de legumbres consideradas para el estudio.

El tercer sistema representa el ciclo de vida de la producción de carne de pollo broiler. El ciclo inicia cuando se reciben los animales de un día de vida en la planta de engorde. En la etapa nombrada “Crecimiento del animal”, en la Figura 5, el animal es engordado por 45 días, dejando en el suelo una capa de viruta, restos de alimento y estiércol, lo que se denomina *cama de broiler*, subproducto vendido a productoras agrícolas y ganaderas. Posteriormente, el animal es trasladado a la planta faenadora, para la etapa de “Procesamiento”, que consta de ocho operaciones unitarias. Como consecuencia se producen desechos animales, con los que se puede elaborar harina, y residuos sin valor que son tratados y separados; los residuos líquidos se eliminan por el sistema de alcantarillado y los sólidos son despachados al relleno sanitario. Continuando con el sistema, la carne envasada se transporta bajo refrigeración al punto de venta, en donde es comprada por un consumidor para prepararla usando una cocina a gas o eléctrica.

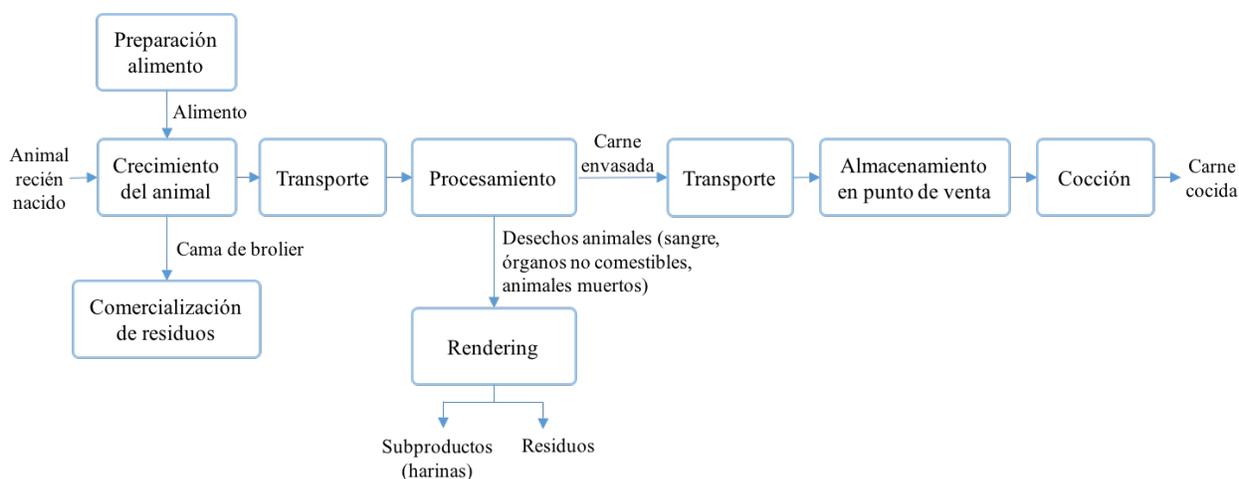


Figura 5. Etapas del ciclo de vida de la elaboración de la carne de pollo analizadas en el estudio.

El cuarto sistema representa el ciclo de vida analizado para la carne de cerdo. Como se señala en la Figura 6, este sistema comienza cuando el animal recién nacido entra en la etapa de “Crecimiento”, que involucra los procesos de lactancia (21 días) y engorde (159 días). En ambos se produce agua de lavado y purines que deben ser derivados a una planta de

tratamiento, de la que se obtienen lodos deshidratados, que son compostados, y agua tratada, una parte de ella se utiliza para riego agrícola y el resto es evacuado por la red de alcantarillado. Luego, se transporta el animal a la planta faenadora, donde ocurre la etapa de “Procesamiento”, con nueve operaciones unitarias, de las que se obtiene carne envasada a 4 [°C]. Los desechos generados se envían a la planta de Rendering. Allí se valoran algunos residuos, elaborando subproductos como harinas y grasas, y aquellos sin uso son tratados junto a los residuos de la planta faenadora en una planta de tratamiento de agua. A continuación, se efectúa el transporte refrigerado de la carne envasada al punto de venta, en donde permanece hasta que un cliente compra el producto y lo prepara en una cocina a gas o eléctrica.

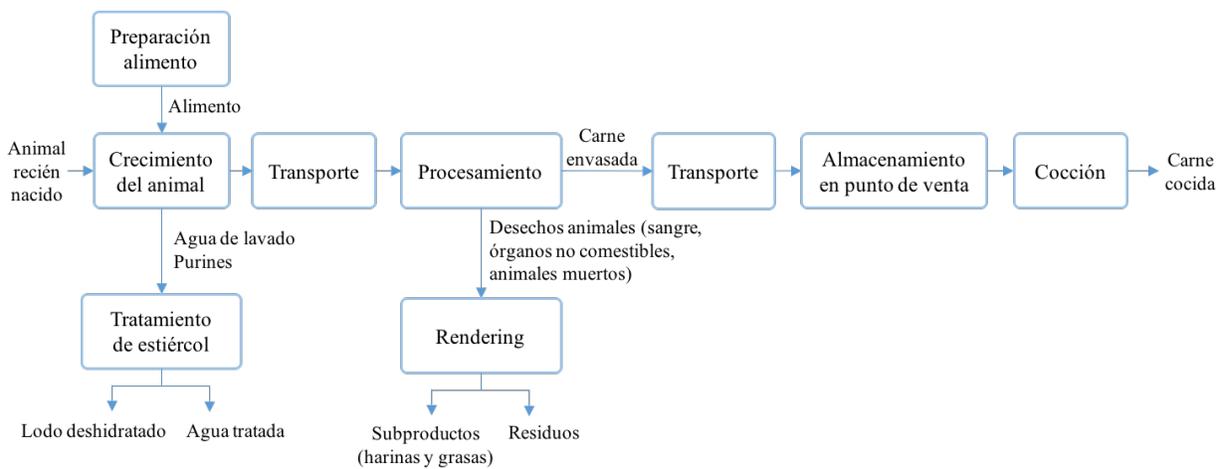


Figura 6. Etapas del ciclo de vida de la producción de carne de cerdo consideradas en este estudio.

Para comparar los resultados del análisis de estos distintos sistemas, se van a clasificar las etapas en cuatro grupos: producción, transporte, almacenamiento y cocción. En producción se incluirán todas las etapas hasta la obtención de carne o legumbre envasada, menos “Transporte” que se integra al grupo de su mismo nombre. En el Anexo B se presenta un diagrama que muestra claramente la distribución de etapas.

5.2.2 Unidad funcional

La unidad funcional es una medida referencial usada para normalizar los flujos de entrada y salida de insumos, emisiones, residuos, energía, entre otros. Normalmente se define por la finalidad del sistema analizado. Entonces, dado que la principal función de los alimentos estudiados es su aporte proteico a la dieta, la unidad funcional se determinará como la masa mínima recomendada de proteína a consumir por una persona durante el día.

En Chile, la edad promedio de la población es de 36 años y predomina el estilo de vida sedentario [96]. Además, una persona chilena promedio tiene una masa corporal de 74 [kg] [97]. Por otro lado, tal como se mencionó en el capítulo de Antecedentes, para una persona adulta sedentaria la OMS y la FAO sugieren un consumo diario de 0,8 [g] de proteína por kilogramo de peso corporal, por lo que la demanda nacional promedio es de 59 [g] de proteína diaria. A raíz de lo anterior, se define la unidad funcional como 0,059 [kg] de proteína y se abrevia con la sigla MPD (Masa de Proteína Diaria).

Puesto que la medición de masa es sencilla y fiable, la normalización de flujos se realiza usando la masa del producto en cada etapa, para luego ponderarla por su contenido proteico correspondiente y así obtener el flujo en base a la unidad funcional.

5.2.3 Límites del sistema

En primer lugar, en la Tabla 5 se muestra el hito que marca el inicio y el fin de cada fase del Ciclo de Vida de las proteínas del estudio. Entre el almacenamiento y la cocción de la proteína, se consideró que el consumidor se ubica cerca del punto de venta, por lo que puede llegar caminando.

Tabla 5. Límites de cada etapa del Ciclo de Vida.

Etapas del Ciclo de Vida	Inicia	Finaliza
Producción	Los insumos llegan al lugar de crecimiento. Sólo se incluirá la fabricación de alimento para animales y preparación de agroquímicos para el cultivo.	El producto envasado sale de la fábrica. Los residuos y subproductos son retirados, es decir, no se incluye el transporte al destino.
Transporte	La proteína se carga en el camión y deja el lugar de cultivo o crecimiento o la fábrica.	El producto es descargado del camión en su destino (fábrica o punto de venta).
Almacenamiento	El producto se ubica en la góndola o refrigerador del lugar de venta.	Se retira el alimento del punto de venta.
Cocción	Al encender la cocina y depositar el envase en los residuos.	Cuando la proteína queda completamente cocida y se apaga la cocina.

El análisis sólo incluye la fase operativa de las etapas. Es decir, no se contabilizan los impactos de la construcción y desmantelamiento de equipos, ni edificación y demolición de estructuras, debido a la extensa y variable vida útil de éstos.

En los sistemas de producción se identifican como entradas el agua, el combustible diésel y la energía eléctrica. En cuanto al agua, ésta se extrae de pozos y se distribuye usando bombas conectadas a la energía eléctrica. De igual forma, para la energía eléctrica, se consideraron las emisiones GEI de su producción de acuerdo a la matriz energética del país. Por último, se incorporaron sólo las emisiones GEI ocasionadas por el uso directo de combustible diésel en transporte, no su extracción ni purificación. En particular, en las proteínas animales se tiene además el ingreso de alimento para el animal (pellet), para lo cual se estimó el área de cultivo y la energía eléctrica empleada en la planta de fabricación de pellet. También, se supuso que la materia prima del alimento era cultivada en las cercanías de la planta de engorde, por lo que su transporte no posee un impacto ambiental asociado. Por otro lado, en las proteínas de origen vegetal se observa la entrada al sistema de fertilizantes y agroquímicos, los que son administrados usando equipos que se anclan a tractores diésel. De acuerdo a la información hallada, se integró la energía eléctrica y/o emisiones GEI provocadas por la elaboración de los químicos.

Las salidas del sistema son residuos, subproductos, emisiones GEI y agua tratada. Para los residuos y subproductos se toma en cuenta el impacto ambiental hasta su proceso de fabricación, debido a que el servicio de transporte al relleno sanitario es subcontratado, por lo que se desconoce el tipo de vehículo usado, su capacidad y rendimiento y la distancia recorrida. Lo mismo ocurre con los subproductos, la cama de broiler, por ejemplo, se indica que se reparte entre sus clientes desde la región de Atacama a la región de Los Lagos, pero sin entregar detalles del tipo de transporte utilizado, ni la proporción de subproducto que llega a cada región. El agua tratada es eliminada por la red de alcantarillado, y en particular para el sistema de producción de carne de cerdo y pollo, una fracción es usada como agua de riego. Es preciso mencionar que para la disposición final del empaque plástico del producto se supuso que éste no era reciclado sino enviado a relleno sanitario, debido a que un número considerable de ellos son de un tipo de plástico difícil de reciclar, y también porque actualmente sólo un 8% del plástico consumido se recicla.

5.2.4 Calidad de los datos

La selección de información se realizó dando prioridad a instituciones estatales como el Instituto Nacional de Estadísticas, el Ministerio de Energía, el Servicio Agrícola y Ganadero, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, entre otros, y de empresas que representaran ampliamente el sector en estudio. Se dio preferencia a los datos nacionales más actuales y que apliquen al contexto analizado.

Los balances de masa de las plantas de faena se realizaron con datos de informes entregados por las empresas al Servicio de Evaluación Ambiental, porque estos proyectos deben presentar una Evaluación de Impacto Ambiental. Los proyectos correspondían a fábricas que ya se encontraban en funcionamiento y necesitaban una ampliación o plantas nuevas. El área directa usada por las construcciones, los requerimientos energéticos y emanaciones gaseosas también se obtuvieron de esos informes y se complementó con informes de la empresa Agrosuper S.A., ya que es la que posee una mayor participación en el mercado de carne nacional. Además, se compararon los valores entregados por las empresas con cálculos teóricos o con datos declarados por fábricas internacionales y se verificó que se encontraban en el mismo orden de magnitud.

5.2.5 Categorías de impacto

En la elaboración de fuentes proteicas se utiliza combustible diésel y energía térmica o eléctrica para movilizar camiones y maquinaria agrícola, mantener en funcionamiento plantas productivas, conservar la cadena de frío de los alimentos, entre otras operaciones, generando importantes emisiones GEI. En particular, en Chile los sectores transporte y energía reúnen un 78% de las emisiones totales de GEI [98]. Por otro lado, las emisiones GEI del ganado y el manejo de su estiércol, el uso de fertilizantes inorgánicos en los cultivos, entre otros, hacen que el sector de la agricultura sea el segundo con mayores emisiones GEI, representando un 10,6% del total nacional [98]. Adicionalmente, en la producción de alimentos para el ganado y las personas se debe tener en cuenta el preocupante efecto de la pérdida de biodiversidad, desencadenada por los cambios de uso de suelo para cultivos [8].

De acuerdo con los objetivos propuestos en el ACV, la categoría de impacto que abarca las cargas ambientales que conciernen a esta memoria, aludidas en el párrafo anterior, es el Potencial de Calentamiento Global

La categoría Potencial de Calentamiento Global (PCG), también llamada cambio climático o emisión de gases de efecto invernadero, mide el impacto de la absorción de la radiación térmica promovida por emisiones gaseosas antropogénicas, que al captar esa radiación generan un aumento de temperatura gradual en la superficie de la corteza terrestre, fenómeno conocido como efecto invernadero. Por lo tanto, este indicador depende del poder de radiación del gas y de su tiempo de permanencia en la atmósfera, como se muestra en la Tabla 6 [99]. Su unidad de referencia es masa de dióxido de carbono equivalente, que se describe como la contribución a la absorción de calor provocada por la emisión de 1 [kg] de un gas, en comparación a la liberación de igual masa de dióxido de carbono a lo largo del tiempo [100]. En este estudio se cuantificarán las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso.

Tabla 6. Factor de potencial de calentamiento global en dos horizontes de tiempo [101][99].

GEI	Fórmula química	Factor PCG ₂₀	Factor PCG ₁₀₀
Dióxido de carbono	CO ₂	1	1
Metano	CH ₄	84	28
Óxido nitroso	N ₂ O	264	265

El indicador PCG fue introducido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (o por sus siglas en inglés: IPCC) y luego adaptado por La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático para un horizonte temporal de 100 años, métrica usada ampliamente en la actualidad. La fórmula fundamental para estimar el indicador PCG_{Total} es [102]:

$$PCG_{Total} [kgCO_2eq] = \sum_{i=1}^n PCG_i \cdot (AD \cdot EF)_i \quad (\text{Ecuación 5})$$

En la ecuación anterior, PCG_i es el potencial de calentamiento global del GEI cuantificado, su valor se encuentra en la Tabla 6; AD corresponde a los datos de actividad, éstos son una medida cuantitativa de alguna actividad humana, en un área específica y un tiempo determinado, que da lugar a emisiones GEI, por ejemplo, litros de combustible consumidos por máquinas agrícolas, masa de fertilizante aplicada a la tierra, o volumen de gas usado en calderas; el factor de emisión (EF) es la masa del GEI emitida como consecuencia de una actividad realizada, siguiendo con el ejemplo: el uso de combustible libera toneladas de dióxido de carbono por litro consumido, la magnitud del factor va a depender del tipo de combustible y de la tecnología que posea la máquina agrícola [103][104].

El Protocolo GHG agrupa las emisiones en tres categorías según su alcance [105]. El Alcance 1 comprende todas las emisiones provenientes de fuentes dentro de los límites de un sistema y que son controlados por el mismo. El alcance 2 incluye emisiones derivadas del consumo de energía eléctrica, energía térmica, vapor y/o refrigeración dentro de los límites del sistema. En el alcance 3 se incorporan las emisiones producidas fuera de los límites del sistema, pero que son consecuencia indirecta de las actividades del sistema. Adicionalmente, a las emisiones del alcance 1 se les denomina emisiones directas debido a que son controladas y

emitidas por el sistema estudiado, y a las emisiones en el alcance 2 y 3 se les llama emisiones indirectas porque se generan a causa de las actividades del sistema, pero no son controladas por él. La Figura 7 presenta un ejemplo de los alcances donde la ciudad es el sistema.

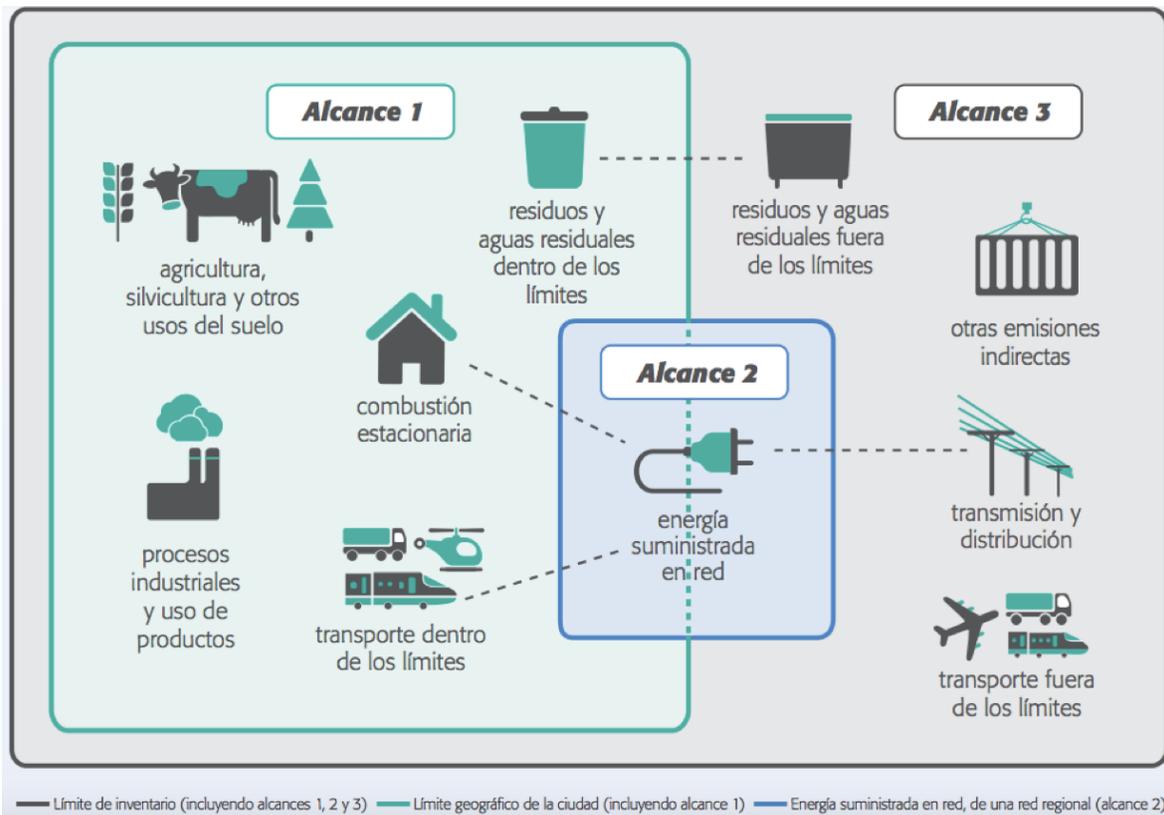


Figura 7. Fuentes y límites de las emisiones GEI de una ciudad [103].

5.3 Análisis de inventario

En esta sección se muestran los datos hallados, los supuestos y las ecuaciones usadas para cuantificar entradas y salidas de los sistemas. Dado que la categoría de impacto es Potencial de Calentamiento Global, en este apartado se determinan las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O generadas por los sistemas de producción. Para comprender totalmente los procesos, se tiene que completar la información con la sección Análisis de Datos del capítulo 6 de esta memoria llamado “Huella Ecológica”, ya que en él se especifican las instalaciones y el consumo eléctrico de cada actividad.

Los cuatro sistemas tienen en común el uso de energía eléctrica para realizar algunos de sus procesos. El último factor de emisión registrado por la página del Ministerio de Energía, es del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) del año 2018 y equivale a $0,11 \text{ [kgCO}_2\text{eq/MJ]}$ [106]. Otro elemento en común es el cálculo de emisiones del transporte y la cocción, los que se detallan en el Anexo C y el Anexo D, respectivamente.

5.3.1 Sistema de producción de porotos

En el cultivo de poroto, realizado mediante labranza convencional, se usa maquinaria agrícola que funciona con combustible diésel, las emisiones GEI de esa actividad se calculan con la Ecuación 6 extraída de la metodología del IPCC volumen N°2, capítulo 3: “Combustión móvil” [107]. La ecuación se aplica en la ejecución del arado, rastraje, siembra, hilerado, cosecha y en la aplicación de herbicida, fertilizante, fungicida e insecticida con un pulverizador de barra.

$$Emisiones_{GEI} = Consumo_{combustible} \cdot Factor\ de\ emisión_{GEI,combustible} \quad (\text{Ecuación 6})$$

El consumo de combustible de los vehículos agrícolas se obtuvo del artículo “Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile”, de la Universidad de Concepción [108]. Los factores de emisión poseen un valor de 74.100 [kg/TJ] para el dióxido de carbono, 5,55 [kg/TJ] para el metano y 6,65 [kg/TJ] para el óxido nitroso, de acuerdo al capítulo del informe del IPCC mencionado. Por otro lado, las emisiones generadas en la fabricación de fertilizantes, insecticidas, fungicidas y herbicidas fueron extraídas de bibliografía [109].

En la producción agrícola de poroto además se deben incluir las emisiones del uso de urea como fertilizante. Se considera la emisión directa de N₂O por el uso de fertilizante sintético y orgánico (estiércol de animal, compost, desechos vegetales, entre otros), la emisión indirecta de N₂O debida a la volatilización de nitrógeno y la emisión de CO₂ por la descomposición de la urea y por la fabricación del fertilizante.

La emisión directa a causa del uso de urea se calcula con la Ecuación 7 [110]. En ella, F_{SN} es la masa de nitrógeno del fertilizante sintético por la masa de producto cosechado (0,027 [kgN/kg]), F_{ON} es la masa de nitrógeno contenida en el estiércol, compost o lodos añadida al suelo (0,033 [kgN/kg]) y EF_1 es el factor de emisión a causa de los aportes de nitrógeno por fertilizante, abono orgánico y residuos agrícolas para contrarrestar la pérdida de carbono del suelo en la labranza convencional, cuyo valor por defecto es 0,01 [kgN₂O – N/kgN] [38]. Todo se multiplica por el factor de conversión $\frac{44}{28}$ [kgN₂O/kgN₂O – N], para expresar los resultados en [kgN₂O].

$$N_2O_{directas} = \frac{44}{28} \cdot (F_{SN} + F_{ON}) \cdot EF_1 \quad (\text{Ecuación 7})$$

La emisión indirecta (N_2O_{ATD}) por deposición atmosférica de nitrógeno volatilizado se cuantifica con la Ecuación 8. En la ecuación, F_{SN} es la masa de nitrógeno en el fertilizante normalizada por la masa de proteína diaria mínima requerida, la fracción de fertilizante que se volatiliza ($Frac_{GASF}$) tiene un valor por defecto de 0,1 [kgNH₃ – N + NO_x – N/kgN] y EF_4 es el factor de emisión correspondiente a la deposición de nitrógeno en la tierra y en la superficie de agua, su valor por defecto es 0,01 [kgN₂O – N/kgNH₃ – N + NO_x – N].

$$N_2O_{ATD} = F_{SN} \cdot Frac_{GASF} \cdot EF_4 \cdot \frac{44}{28} \quad (\text{Ecuación 8})$$

La urea en presencia de agua se transforma en amoníaco, bicarbonato e iones hidroxilo. A su vez, el bicarbonato se descompone en CO₂ y agua. Esta emisión se estima mediante la Ecuación 9, siendo *M* la masa total de urea usada en la tierra por masa de proteína diaria mínima requerida, *EF* es el factor de emisión general y equivale a la proporción de carbono en la urea (20%) [111].

$$CO_{2(urea)} = M \cdot EF \cdot \frac{44}{12} \quad (\text{Ecuación 9})$$

La elaboración de urea comienza con la producción de amoníaco a partir de gas natural, aire y agua, este proceso demanda 28 [GJ/tNH₃] y libera 0,018 [kgCO₂/NH₃]. Luego, el amoníaco reacciona con dióxido de carbono formando urea emitiendo [kgCO₂/kgUrea] y consumiendo 4,1 [MJ/kgUrea] [112].

Considerando que se aplica compost de guano de cerdo o cama de broiler, con un contenido de 0,035 [kgN/kgPoroto], y 100 [kgUrea/ha], de la cual un 46% es nitrógeno, el valor de las emisiones mencionadas anteriormente se encuentran en la Tabla 7 [113][114][38].

Tabla 7. Emisiones relacionadas al uso de urea como fertilizante en poroto.

Tipo de emisión	GEI	Valor emisión [kgGEI/kg]
Emisión directa	N ₂ O	0,0009
Emisión indirecta	N ₂ O	4,2E-05
Emisión descomposición	CO ₂	0,044
Emisión fabricación	CO ₂	0,19

Las emisiones del proceso de envasado se adquirieron de bibliografía [115]. La disposición final del envase se calculó en base al factor de emisión del plástico que se envía al relleno sanitario, cuyo valor es 34,1 [kgCO₂eq/t]. Considerando que la masa de un envase plástico que contiene 1 [kg] de producto es 7 [g], la emisión de GEI es 0,0002 [kgCO₂eq/kg]. Por otro lado, la cocción de la proteína se lleva a cabo en una olla tradicional (no a presión); cuando se cocina con GLP se cuantifican las emisiones de metano y CO₂, mientras que, en la cocción con encimera eléctrica se obtienen directamente las emisiones de carbono equivalente mediante la matriz energética. En la Tabla 8 se exponen, por etapa y actividad, los datos de actividad que luego son multiplicados por su respectivo factor de emisión para conseguir el PCG total.

Tabla 8. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de porotos.

Etapa	Actividad		Emisión	Emisión	Emisión	PCG total [kgCO ₂ eq/kg]
			[kgCO ₂ /kg]	[kgCH ₄ /kg]	[kgN ₂ O/kg]	
Producción	Preparación de suelo	Arado	0,033	2,5E-06	2,9E-06	0,034
		Rastraje	0,036	30E-06	3,2E-06	0,036
		Fertilizante	0,034	-	-	0,034
		Herbicida (fabricación y aplicación)	0,015	2,2E-07	2,6E-07	0,015
	Siembra	Sembradora de grano grueso	0,012	8,6E-07	1,0E-06	0,012
	Crecimiento	Herbicida (Basagran)	0,032	-	-	0,032

		Fertilizante (Urea)	0,39	-	0,0009	0,65
		Fungicida (Cadillac 80 WP)	0,013	-	-	0,013
		Insecticida (Lorsban 4E)	0,007	-	-	0,007
		Pulverizador de barra	0,009	6,6E-07	7,9E-07	0,009
	Cosecha	Hilerado	0,009	6,5E-07	7,8E-07	0,009
		Cosechadora de grano grueso	0,074	5,6E-06	6,7E-06	0,076
	Envasado	Limpiado, selección y separado	0,00003	-	-	0,00003
		Empaquetado	0,00042	-	-	0,0004
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,015	1,1E-06	1,3E-06	0,015
	Transporte 2	Sin refrigeración	0,003	2,2E-07	2,6E-07	0,003
Cocción	Disposición final envase	Plástico no reciclable	-	-	-	0,0002
	Cocinar	Cocina GLP	0,62	4,6E-05	-	0,62
		Cocina eléctrica	-	-	-	0,87
		Total cocina GLP	2,16	2,6E-05	0,001	1,6
		Total cocina eléctrica	0,67	1,4E-05	0,001	1,8

5.3.2 Sistema de producción de lentejas

Al igual que en el poroto, las emisiones de la maquinaria agrícola se calcularon siguiendo el procedimiento y factores de emisión propuestos por el IPCC. Mientras que las emisiones de GEI originadas por la elaboración de agroquímicos y fertilizantes se encontraron en bibliografía [109].

Pese a que no se agrega urea como fertilizante se debe nutrir el suelo después del arado, para ello se aplican enmiendas orgánicas, de guano de cerdo o cama de broiler, las que aportan nitrógeno a la tierra y al ambiente, emitiendo óxido nitroso de forma directa e indirecta. Las emisiones directas se cuantifican con la Ecuación 7. Considerando que la enmienda agregada al suelo contiene $0,02 [kgN/kg]$, que el factor de emisión EF_1 es por defecto $0,01 [kgN_2O - N/kgN]$ y que F_{SN} es cero porque no se utilizan fertilizantes sintéticos, la emisión directa por uso de enmiendas es $3,1 \cdot 10^{-4} [kgN_2O/kg]$.

La emisión indirecta por deposición de nitrógeno volatilizado se obtiene de la Ecuación 8. En la ecuación, F_{SN} es el contenido de nitrógeno en la enmienda, $Frac_{GASF}$ es por defecto $0,1 [kgNH_3 - N + NO_x - N/kgN]$ y el factor de emisión EF_4 es por defecto $0,01 [kgN_2O - N/kgNH_3 - N + NO_x - N]$. Con los valores anteriores, se determina que la emisión indirecta de N_2O es $3,1 \cdot 10^{-5} [kgN_2O/kg]$.

Las emisiones GEI del envasado se establecieron por bibliografía [115]. En cuanto a la disposición final del envase, la emisión de GEI es $0,0002 [kgCO_2eq/kg]$; para calcular esa emisión se consideró que el envase plástico de $1 [kg]$ de lentejas pesa $6 [g]$ y que el factor de emisión de la disposición de ese plástico en un relleno sanitario es $34,1 [kgCO_2eq/t]$. Por otro lado, en la cocción de la proteína con GLP se cuantifican las emisiones de metano y CO_2

siguiendo la metodología del IPCC; en la cocción con encimera eléctrica se considera la emisión de carbono equivalente de la matriz energética. Los datos de cada actividad, multiplicado por su factor de emisión correspondiente se encuentra en la Tabla 9.

Tabla 9. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de lentejas.

Etapa	Actividad		Emisión [kgCO ₂ /kg]	Emisión [kgCH ₄ /kg]	Emisión [kgN ₂ O/kg]	PCG total [kgCO ₂ eq/kg]
Producción	Preparación de suelo	Arado	0,064	4,8E-06	5,7E-06	0,065
		Rastraje	0,069	5,2E-06	6,2E-06	0,07
		Fertilizante	0,052	-	0,0003	0,14
		Herbicida (fabricación y aplicación)	0,018	4,3E-07	5,1E-07	0,018
	Siembra	Sembradora de grano grueso	0,022	1,7E-06	2,0E-06	0,023
	Crecimiento	Herbicida (Simazina 50)	0,019	-	-	0,019
		Fungicida (Benomyl)	0,021	-	-	0,021
		Fungicida (Manzate 200)	0,024	-	-	0,024
		Insecticida (Zero 5EC)	0,009			0,008
		Pulverizador de barra	0,017	1,3E-06	1,5E-06	0,017
	Cosecha	Hilerado	0,017	1,3E-06	1,5E-06	0,017
		Cosechadora de grano grueso	0,091	6,8E-06	8,2E-06	0,093
	Envasado	Limpiado, selección y separado	2,6E-05	0		2,6E-05
		Empaquetadora	0,0004			0,0004
	Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,014	1,1E-06	1,3E-06
Transporte 2		Sin refrigeración	0,0029	2,2E-07	2,6E-07	0,003
Cocción	Disposición final envase	Plástico no reciclable	-	-	-	0,0002
		Cocinar	Cocina a gas	0,34	2,3E-06	-
		Cocina eléctrica	-	-	-	0,51
		Total cocina GLP	1,38	2,8E-05	0,0004	0,88
		Total cocina eléctrica	1,83	2,3E-05	0,0004	1,05

5.3.3 Sistema de producción de carne de broiler

En general, cada etapa de la producción de carne de ave se realiza en plantas separadas [116]. Es por esto que los datos del engorde se obtuvieron del proyecto “Sector de crianza de pollos broiler, Las Correhuelas” [55], y la información sobre la faena del proyecto “Actualización y desarrollo planta faenadora de aves Lo Miranda” [61].

La mayor fuente de CO₂ en la crianza de pollo broiler proviene de la respiración del ave. La emisión de dióxido de carbono es proporcional a la producción metabólica de calor, lo que se relaciona con la temperatura del ambiente y la actividad del animal. Para un pollo broiler

que se desarrolla en condiciones estándar de la industria, es decir, en confinamiento y con control de la temperatura y la ventilación, su emisión de CO₂ es de 0,67 [kgCO₂/kg] [117].

Las emisiones de metano, por una parte, provienen de la fermentación entérica del animal, originada por la degradación anaeróbica de la materia orgánica llevada a cabo por bacterias del tracto digestivo. El IPCC no entrega detalles de su valor, así que éste fue extraído de un informe que utiliza metodologías de la institución en su cálculo. De acuerdo a lo anterior, la emisión por fermentación entérica de pollo broiler es $8,2 \cdot 10^{-6}$ [kgCH₄/kg] [118].

Por otra parte, existen emisiones de metano derivadas de la gestión del estiércol, las que se pueden cuantificar mediante la Ecuación 10.

$$EF = (VS \cdot 45 \text{ [días]}) \cdot \left(B_o \cdot 0,67 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \sum_{S,k} \frac{MCF_{S,k} \text{ [%]}}{100} \cdot MS_{S,k} \right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

En la ecuación, *VS* es la masa de sólidos volátiles excretados por día, su valor por defecto es de 0,01 [kgVS/día]; *B_o* es la capacidad máxima del estiércol de producir metano, equivale a 0,36 [m³CH₄/kgVS] y se multiplica por el factor de conversión 0,67, para expresar la emisión de metano en masa; se llama *MCF_{S,k}* al factor de conversión de metano de un cierto sistema de gestión de estiércol “*S*” en una zona climática “*k*”, para el tratamiento de aves de corral el factor es de 1,5%; por último, *MS_{S,k}* es la fracción de estiércol manejado usando la tecnología “*S*” en la región climática “*k*”, se supone que un 100% del estiércol de broiler se acumula junto a un material absorbente, que al terminar la crianza es recogido y almacenado sin agregar agua. Reemplazando estos datos en la ecuación la emisión de metano es de $1,4 \cdot 10^{-6}$ [kgCH₄/kg].

Las emisiones directas de N₂O son el resultado de la nitrificación y desnitrificación del nitrógeno en el almacenamiento y tratamiento de estiércol. Las emisiones directas (*N₂O_D*) se obtienen con la Ecuación 11, en la que *N_{ex}* es el promedio de excreción de nitrógeno durante la vida del animal, *MS* es la fracción de excreción promedio que se gestiona con el tratamiento “*S*”, debe ser análogo al usado en el metano, y *EF₃* es el factor de emisión para emisiones directas de N₂O con el sistema de gestión de estiércol “*S*”. La planta en estudio registra una masa promedio de 3,6 [kgEstiércol/broiler], suponiendo que ese estiércol posee un contenido de 35,5 [kgN/tEstiércol], *N_{ex}* es 0,13 [kgN/pollo · crianza] [119]. El factor de emisión *EF₃* para el tratamiento de estiércol es 0,001 [kgN₂O – N/kgN]. Sustituyendo todos los valores expuestos en la Ecuación 11, las emisiones directas equivalen a $1 \cdot 10^{-4}$ [kgN₂O/kg].

$$N_2O_D = \frac{44}{28} \cdot \sum_S Nex \cdot MS_{(S)} \cdot EF_{3(S)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Las emisiones indirectas de N₂O ocurren cuando el nitrógeno orgánico se mineraliza en nitrógeno amoniacal, que al ser muy volátil rápidamente se esparce en el aire. El IPCC propone calcular esta emisión mediante la Ecuación 12 y 13. Primero, en la Ecuación 12 se estima la masa de nitrógeno en el estiércol que se pierde (*N_{volatilización-MMS}*) debido a la volatilización en NO_x y NH₃ en [kgN/año], para ello se recopilan datos como el promedio anual de excreción de nitrógeno por broiler (*N_{ex}*), la fracción de la excreción total de nitrógeno del ciclo según el sistema de gestión de estiércol (*MS_(S)*) y el porcentaje que se

volatiliza como NO_x y NH₃ en el sistema de gestión “S” ($Frac_{GasMS(S)}$), cuyo valor por defecto es 55% para el tratamiento de estiércol de broiler. Así, la emisión indirecta por volatilización es de $3,7 \cdot 10^{-4}$ [kgN/kg].

$$N_{volatilización-MMS} = \sum_S Nex \cdot MS_{(S)} \cdot \frac{Frac_{GasMS(S)}}{100} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Luego, como muestra la Ecuación 13, la emisión indirecta de N volatilizado se multiplica por el factor de emisión de la deposición atmosférica de nitrógeno en la superficie del suelo o agua (EF_4), este factor ya se mencionó en el cálculo de emisiones del poroto y tiene el mismo valor: 0,01 [kgN₂O - N/kgNH₃ - N + NO_x - N]. De esa forma, la emisión indirecta de óxido nitroso es $5,7 \cdot 10^{-6}$ [kgN₂O/kg].

$$N_2O_G = \frac{44}{28} \cdot N_{volatilización-MMS} \cdot EF_4 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Además, en la crianza de pollo broiler se utiliza GLP en la calefacción del pabellón de engorde, liberando metano y dióxido de carbono. El factor de emisión de CO₂ es 3 [kgCO₂/kgGLP] y el factor de emisión de metano es 1,1 [kgCH₄/TJ] [120][107]. La planta en estudio registra un uso de 18 [MJ/broiler], por lo que la emisión de CO₂ es 0,62 [kgCO₂/kg] y la emisión de metano es $1,1 \cdot 10^{-5}$ [kgCH₄/kg].

Una vez que el pollo alcanza 2,6 [kg] se lleva a la planta de faena. En ella se obtienen 1,9 [kg] de carne como producto. En la Tabla 10 se precisan las emisiones de GEI de la planta. Los residuos como sangre o grasas son enviados a una planta de rendering en donde se elaboran harinas y aceites en base a ellos. Ambas plantas, la faenadora y la de rendering, generan desechos con contenido orgánico, los que provocan emisiones de metano y óxido nitroso, y cuya magnitud depende del tipo de tratamiento que se les realice. En la planta de tratamiento de agua estudiada, se recibe un flujo de entrada de 1.310 [m³] de residuos al día, los que son depositados en lagunas anaeróbicas. De acuerdo al capítulo 6, “Tratamiento y eliminación de aguas residuales”, del volumen N°5 del IPCC, las emisiones de metano se calculan con la Ecuación 14 [121].

$$Emisión CH_4 = (TOW - S) \cdot EF_j - R \quad (\text{Ecuación 14})$$

En la ecuación, S es el componente orgánico separado como lodo, se mide en [kgDQO/año], y R es la masa recuperada de metano cuando se aprovecha para crear energía en [kgCH₄/año], ambas tienen un valor cero por defecto. Continuando, EF_j es el factor de emisión de metano para las aguas industriales residuales tratadas por el sistema j , se consigue a partir de la Ecuación 15. En ella B_o es la capacidad máxima de producción de metano por el sistema, su valor por defecto es de 0,25 [kgCH₄/kgDQO] y MCF_j es el factor de corrección del metano para el tratamiento j , cuyo valor para una laguna anaeróbica de más de dos metros de profundidad es 0,8. Así, el factor de emisión es 0,2 [kgCH₄/kgDQO].

$$EF_j = B_o \cdot MCF_j \quad (\text{Ecuación 15})$$

Finalmente, en la Ecuación 14, TOW corresponde a la masa de materia orgánica degradable en las aguas residuales y se estima con la Ecuación 16, donde P es el producto industrial total del sistema estudiado, que para la planta analizada es 29.495 [t/año], W son las aguas residuales generadas y CDO es el requerimiento químico de oxígeno, ambos son cuantificados por el IPCC como 13 [m³/t] y 4 [kgDQO/m³], respectivamente.

$$TOW = P \cdot W \cdot CDO \quad (\text{Ecuación 16})$$

Reemplazando en la Ecuación 16, la masa de materia orgánica degradable en las aguas residuales es 1.572.079 [kgDQO/año]. De esta forma se tiene toda la información necesaria para emplear la Ecuación 14. Sustituyendo, la emisión de metano por el tratamiento de agua es 314.416 [kgCH₄/año].

Por otro lado, las emisiones de óxido nitroso producidas por el tratamiento de agua no se encuentran bien definidas en la guía del IPCC, pero indican una forma general de cuantificarlas con la Ecuación 17. La guía señala que el factor de emisión (EF_{N_2O}) procedente de las aguas tratadas es 0,005 [kgN₂O – N/kgN], mientras que el caudal (Q) y el contenido de nitrógeno en ese caudal de entrada (M_N) son determinados por la planta. El caudal de entrada es 478.150 [m³/año] y posee 0,15 [kgN/m³], en consecuencia, la emisión de óxido nitroso es 563 [kgN₂O/año].

$$\text{Emisión } N_2O = \frac{44}{28} \cdot Q \cdot M_N \cdot EF_{N_2O} \quad (\text{Ecuación 17})$$

El impacto ambiental ocasionado por la disposición del envase que protege la carne se mide de igual forma que en las legumbres, con una la emisión de carbono equivalente igual a 34,1 [kgCO₂eq/t]. Suponiendo que la masa del empaquetado de 1 [kg] de carne de broiler pesa 10 [g], la emisión de carbono equivalente es $3,4 \cdot 10^{-4}$ [kgCO₂eq/kg]. Por último, para medir el tiempo de cocción se usa una olla corriente. De acuerdo al IPCC, la cocción con GLP emite metano y CO₂, y las emisiones de la encimera eléctrica son el producto del consumo eléctrico y el carbono equivalente de la matriz energética.

Tabla 10. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de carne de broiler.

Etapa	Actividad		Emisión [kgCO ₂ /kg]	Emisión [kgCH ₄ /kg]	Emisión [kgN ₂ O/kg]	PCG total [kgCO ₂ eq/kg]
Producción	Crecimiento del animal	Iluminación, ventilación y bombeo de agua	0,144	-	-	0,14
		Calefacción GLP	0,626	1,1E-05	-	0,63
		Respiración, estiércol y tratamiento	0,666	9,3E-06	0,0001	0,69
		Producción de alimento	0,349	-	-	0,35
	Procesamiento	Planta faenadora	0,070	-	-	0,07
		Tratamiento agua	0,006	0,011	1,9E-05	0,31
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,007	5,4E-07	6,5E-07	0,007

	Transporte 2	Con refrigeración	0,022	5,4E-07	6,5E-07	0,022
Almacenamiento		Con refrigeración	0,018	-	-	0,018
Cocción	Disposición final envase	Plástico no reciclable	-	-	-	1E-04
		Cocinar	Cocina a gas	0,24	5,3E-06	-
		Cocina eléctrica	-	-	-	0,32
		Total cocina GLP	2,10	0,011	0,00013	2,48
		Total cocina eléctrica	2,17	0,011	0,00013	2,56

5.3.4 Sistema de producción de carne de cerdo

Al desarrollar el análisis se recopilaron los datos del proyecto “Agroindustrial del Valle del Huasco”, ya que cubre la mayor parte de la fase de producción: una fábrica de pellet, una planta de engorde y faena de cerdos y su correspondientes plantas de rendering y tratamiento de aguas. Además, el proyecto se sometió a una Evaluación de Impacto Ambiental, por lo que se dispone de información accesible para el estudio [122][123][69].

En la etapa de lactancia y engorde de la producción de carne de cerdo se emite dióxido de carbono de dos fuentes: la exhalación del animal y de su estiércol. Se entiende por estiércol al conjunto bosta y orina, es decir, los desechos sólidos y líquidos del cerdo [110]. A partir de un *review* de emisiones de GEI en criaderos de cerdo, se estima que la emisión por respiración ($E - CO_{2,cerdo}$) es una función que depende del peso del animal (BW) y se calcula con la Ecuación 18 [124]. Por otro lado, se estableció que la emisión de CO_2 del estiércol proviene de tres fuentes. La primera es de la obtención de amoníaco y CO_2 como resultado de la hidrólisis de urea catalizada por la enzima ureasa, la segunda es la fermentación anaerobia de materia orgánica en ácidos grasos intermedios, donde se libera metano y CO_2 , y por último, la degradación aeróbica de materia orgánica (del proceso de compost, por ejemplo). La emisión debida al estiércol de las fuentes nombradas equivale a un 40% de la emisión por exhalación. Sumando ambas emisiones, el CO_2 total liberado es $3,2 [kgCO_2/kg]$.

$$E - CO_{2,cerdo} = 0,136 \cdot BW^{0,573} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Las emisiones de metano provocadas por la fermentación entérica del animal tienen un valor de $1,0 [kgCH_4/cerdo \cdot \text{año}]$ de acuerdo al IPCC. Mientras que las emisiones de metano procedentes de la gestión del estiércol se obtienen de la Ecuación 19.

$$EF = (VS \cdot 180 [\text{días}]) \cdot (B_o \cdot 0,67 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \sum_{S,k} \frac{MCF_{S,k} [\%]}{100} \cdot MS_{S,k}) \quad (\text{Ecuación 19})$$

Suponiendo que en la etapa de lactancia y engorde de un cerdo, que en total tienen una duración de 180 días, se generan $1.177 [kg]$ de estiércol y que el contenido de sólidos volátiles es $0,042 [kgVS/kgEstiércol]$, el valor de VS es $0,3 [kgVS/día]$. Continuando con la Ecuación 19, la capacidad máxima del estiércol de producir metano (B_o) equivale a $0,29 [m^3CH_4/kgVS]$. Además, existen dos etapas en el tratamientos de purines en el caso estudiado. Primero se realiza un tratamiento de lodos activados al total de residuos, donde se remueve la materia orgánica y se separa el purín en sólido y líquido; luego la parte sólida

resultante (62% del total inicial) es llevada a una cancha de compostaje. Considerando que la región de O'Higgins es una zona climática templada (la temperatura promedio es 15 [°C]), $MCF_{S,k}$ y $MS_{S,k}$ en estiércol de cerdos de criadero tienen un valor de 74% y 100% para el tratamiento de lodos activados, y 4% y 62% para el tratamiento de compost, respectivamente. Reemplazando todos los datos en la ecuación y sumando el resultado de ambos tratamientos, se sabe que la emisión de metano es de $8,5 \cdot 10^{-4}$ [kgCH₄/kg].

Las emisiones directas (N_2O_D) se obtienen con la Ecuación 11. La planta en estudio registra una masa promedio de 1.177 [kgEstiércol/cerdo], suponiendo que ese estiércol posee un contenido de 0,9 [gN/kgEstiércol], N_{ex} es 1,05 [kgN/cerdo · 180días]. El factor de emisión EF_3 para el tratamiento de oxidación biológica con aireación forzada y mezclado permanente es 0,01 [kgN₂O – N/kgN], y el del tratamiento de compost es 0,006 [kgN₂O – N/kgN]. Sustituyendo lo anterior en la Ecuación 11, las emisiones directas corresponden a $2,4 \cdot 10^{-4}$ [kgN₂O/kg].

Las emisiones indirectas de N₂O se calculan con la Ecuación 12 y 13. Los valores de N_{ex} y $MS_{(S)}$ se mantienen iguales a los de las emisiones directas. En la Ecuación 12 el porcentaje que se volatiliza como NO_x y NH₃ en el sistema de gestión “S” ($Frac_{GasMS(S)}$) posee un valor por defecto de 40% para el tratamiento de lodos activados y 45% para el tratamiento de compost. Reemplazando en la ecuación, la emisión indirecta por volatilización es de $7,6 \cdot 10^{-5}$ [kgN/kg]. Tras calcular $N_{volatilización-MM_S}$ se aplica la Ecuación 13, en la que EF_4 es 0,01 [kgN₂O – N/kgNH₃ – N + NO_x – N], por lo tanto la emisión indirecta de óxido nitroso es $1,2 \cdot 10^{-6}$ [kgN₂O/kg].

A los 180 días de crianza el cerdo alcanza 120 [kg] y es trasladado a la planta de procesamiento, en donde se producen diariamente 165.548 [kg] carne. El detalle de cada GEI de la planta se presenta en la Tabla 11. Con algunos residuos generados como consecuencia de la producción de carne, como grasas y sangre, se fabrican harina y aceite en una planta de rendering. A su vez, los desechos de la planta faenadora y la de rendering son tratados en una planta de tratamiento de agua, la que libera metano y óxido nitroso, en mayor o menor proporción, dependiendo de la tecnología usada. La planta de tratamiento analizada recibe 52.466 [m³] de residuos por día que son depositados en una laguna anaeróbica.

Siguiendo la misma metodología que en el pollo broiler, las emisiones de metano se miden con la Ecuación 14. Para ello, primero se calcula EF_j como lo indica la Ecuación 15, multiplicando la capacidad máxima de producción de metano (0,25 [kgCH₄/kgDQO] es su valor) y el factor de corrección del tratamiento con lagunas anaeróbicas (0,8), lo que da como resultado 0,2 [kgCH₄/kgDQO]. Luego, con la Ecuación 16 obtiene TOW , que es el producto entre las toneladas de carne elaboradas al año (60.425 [t/año]), las aguas residuales que genera su producción (18 [m³/t]) y el requerimiento químico de oxígeno (7 [kgDQO/m³]), y su valor es 7.613.551 [kgDQO/año]. Por último, S y R son cero por defecto; reemplazando los datos anteriores en la Ecuación 14, las emisiones de metano son 1.522.710 [kgCH₄/año].

Las emisiones de óxido nitroso se cuantifican con la Ecuación 17, multiplicando el caudal, 19.150.210 [m³/año], por el factor de emisión de N₂O, 0,005 [kgN₂O – N/kgN], por el

contenido de nitrógeno en el caudal de entrada a la planta de tratamiento, 0,38 [kgN/m³]. Así, la emisión de N₂O es 57.929 [kgN₂O/año].

En la disposición final del envase, se sabe que la emisión de carbono equivalente es 34,1 [kgCO₂eq/t]. Adicionalmente, se considera que el envase plástico que cubre 1 [kg] de carne de cerdo tiene una masa de 9 [g], por lo que la emisión es 3 · 10⁻⁴ [kgCO₂eq/kg]. Finalmente, al igual que en las proteínas anteriores, en la cocción se utiliza una olla tradicional, se cuantifican las emisiones de metano y CO₂ en el caso de la cocina a GLP y las emisiones de la matriz energética en el caso de la cocina eléctrica.

Tabla 11. Emisiones de GEI por etapa y actividad del sistema de producción de carne de cerdo.

Etapa	Actividad		Emisión [kgCO ₂ /kg]	Emisión [kgCH ₄ /kg]	Emisión [kgN ₂ O/kg]	PCG total [kgCO ₂ eq/kg]
Producción	Crecimiento del animal	Lactancia (iluminación, ventilación y calefacción)	0,073	-	-	0,07
		Lactancia (respiración y manejo de estiércol)	0,615	0,0007	2,8E-05	0,64
		Engorde (iluminación, ventilación)	0,068	-	-	0,07
		Engorde (respiración y manejo de estiércol)	2,58	0,0054	0,0002	2,79
		Producción de alimento	0,142	-	-	0,14
	Procesamiento	Planta faenadora	0,285	-	-	0,29
		Planta rendering	0,873	-	-	0,87
		Tratamiento agua	0,0001	0,0252	0,001	9,5E-05
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,007	5,4E-07	6,5E-07	0,007
	Transporte 2	Con refrigeración	0,022	1,6E-06	1,9E-06	0,022
Almacenamiento		Con refrigeración	0,022	-	-	0,022
Cocción	Disposición final envase	Plástico no reciclable	-	-	-	0,0003
		Cocinar	Cocina a gas	0,61	1,8E-06	-
	Cocina eléctrica		-	-	-	0,85
		Total cocina GLP	4,93	0,031	0,0012	6,3
		Total cocina eléctrica	5,21	0,031	0,0012	6,5

5.4 Evaluación de impacto ambiental

En este apartado se exponen los resultados del Análisis de Ciclo de Vida. Primero se presentarán los resultados por cada proteína, destacando aquellas actividades con un impacto ambiental superior. Es preciso mencionar, que los resultados de la cocina GLP y gas natural son prácticamente idénticos (difieren en milésimas), por lo que se tendrá dos resultados distintos: uno para la cocina GLP y otro para la cocina eléctrica o encimera. En los resultados por sistema de producción se expone sólo la cocción con gas licuado de petróleo, ya que es

el tipo de cocina más usado [95]. Luego, se comparan los resultados entre proteínas, se identifica la que obtuvo una menor carga ambiental y se discute sobre el tipo de cocina con mayor emisión. En el Anexo E se detallan los valores los datos de cada actividad utilizados para calcular el PCG, y en el Anexo F se halla un ejemplo de cálculo.

5.4.1 Evaluación de impacto ambiental por sistema de producción

El sistema de producción de poroto emite en total $0,6 [kgCO_2eq/MPD]$. Un 89% del total corresponde a emisiones de dióxido de carbono y un 10% a N_2O . Los resultados del Potencial de Calentamiento Global del sistema de producción de porotos, incorporados en el Gráfico 2, muestran que la cocción es la etapa que produce mayores emisiones de GEI, seguido por la etapa de producción, donde destaca el crecimiento (actividad que incluye la fabricación y aplicación de fertilizante nitrogenado, fungicidas, herbicidas e insecticidas), las labores con maquinaria agrícola en la preparación del suelo y en la cosecha.

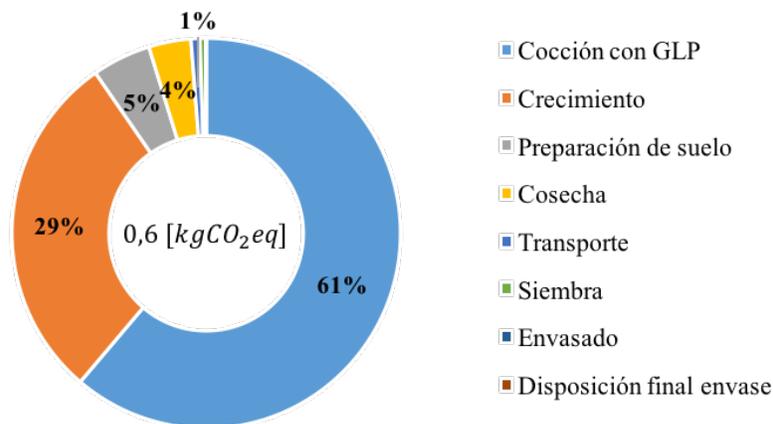


Gráfico 2. Emisiones del sistema de producción de poroto por actividad.

El sistema de producción de lenteja causa una emisión de $0,3 [kgCO_2eq/MPD]$, que se compone en un 93% de CO_2 y en un 6,6% en óxido nitroso. Las actividades y su respectivo aporte a la emisión total se muestra en el Gráfico 3. Sobresale en el gráfico, las emisiones de la etapa de cocción de la proteína usando GLP, en segundo lugar se encuentra la etapa de producción con las actividades de crecimiento, preparación del suelo y cosecha.

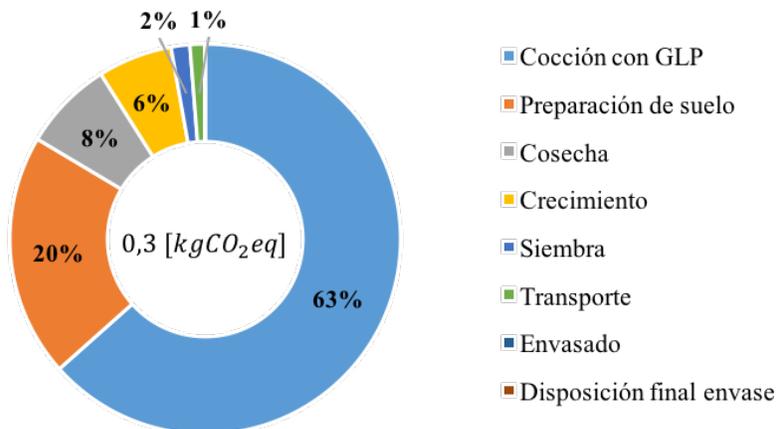


Gráfico 3. Emisiones del sistema de producción de lenteja por actividad.

Las emisiones del sistema de producción de carne de pollo broiler suman 0,8 [$kgCO_2eq/MPD$], y están compuestas por un 86% de CO_2 , un 12% de metano y un 2% de N_2O . De acuerdo al Gráfico 4, fueron significativas: la respiración y gestión de estiércol, la calefacción con GLP durante el crecimiento del pollo y mantener condiciones básicas de bienestar (que incluyen la ventilación, bombeo de agua, iluminación y producción de alimento). La liberación de GEI por parte de la planta faenadora y el tratamiento de los residuos que ésta genera, se encuentran en cuarto lugar en la actividad llamada procesamiento.

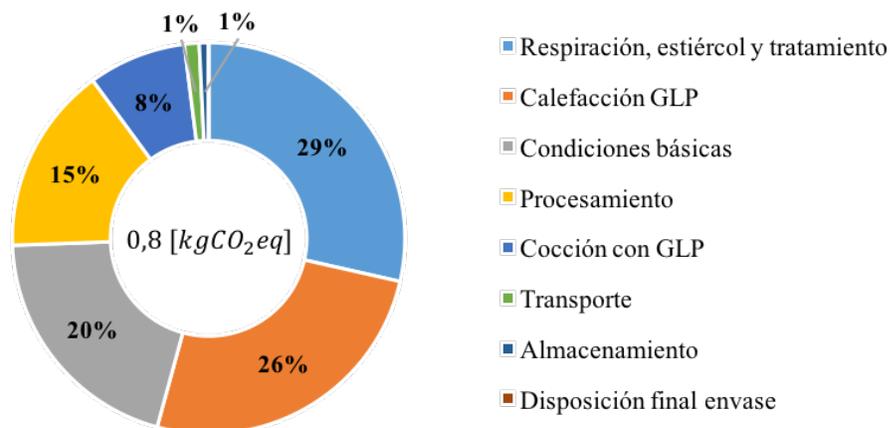


Gráfico 4. Emisiones del sistema de producción de carne de broiler por actividad.

En total, el sistema de producción de carne de cerdo emite 2,5 [$kgCO_2eq/MPD$]. La distribución de emisiones es 81% CO_2 , 15% metano y 4% óxido nítrico. El principal aporte al Potencial de Calentamiento Global es la emisión de la respiración del cerdo y el tratamiento de su estiércol en el engorde del cerdo, fase que tiene una duración de 159 días. En segundo lugar se ubica el procesamiento del animal, que abarca las emisiones de la planta de faena, la planta de rendering y el tratamiento de los residuos líquidos que surgen de ambas plantas. Luego, siguen las emisiones de la respiración y gestión de estiércol, tanto de la madre como del lechón, en la lactancia, cuya duración es 21 días. Las demás contribuciones se observan en el Gráfico 5.

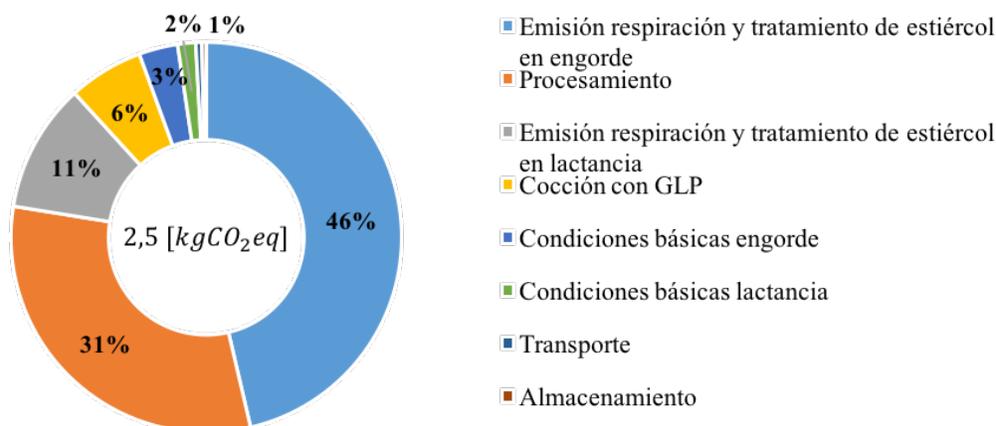


Gráfico 5. Emisiones del sistema de producción de carne de cerdo por actividad.

Es importante destacar que en el manejo del estiércol, tal como se mencionó en la descripción del proceso, se supuso que el purín es llevado a una cancha de compostaje ya que así es como

Agrosuper, la empresa con mayor participación en el mercado nacional, afirma tratar estos residuos. Sin embargo, no se poseen cifras oficiales del porcentaje de purines a nivel país que son tratados con esa técnica, que al entregar oxigenación a los residuos, genera bajas emisiones de metano. En caso de ser almacenados sin agitación constante, por ejemplo en un relleno sanitario, se produciría percolato y gas metano, y como consecuencia habría un incremento en el PCG calculado en esta memoria.

5.4.2 Comparación de resultados

A partir del ACV de las cuatro proteínas se distingue que el sistema de producción de carnes resultó con valores de PCG superiores a los de las legumbres. En particular, en el ciclo de vida de las carnes la mayor contribución al PCG ocurre en la etapa de producción, debido a la emisión por respiración y gestión de estiércol del animal, el tratamiento de residuos de la planta de faena y, en el caso del pollo broiler, la calefacción durante el engorde de las aves. Como se ve en el Gráfico 6, en las carnes se encuentra la etapa de cocción en segundo lugar. Por otro lado, las legumbres, especialmente la lenteja, consiguieron PCG más bajos. En ellas, la etapa de cocción fue la principal fuente de emisiones, seguido por la etapa de producción, en donde los mayores aportes fueron provocados por el uso y fabricación de fertilizantes y por el trabajo de labranza realizado con maquinaria agrícola.

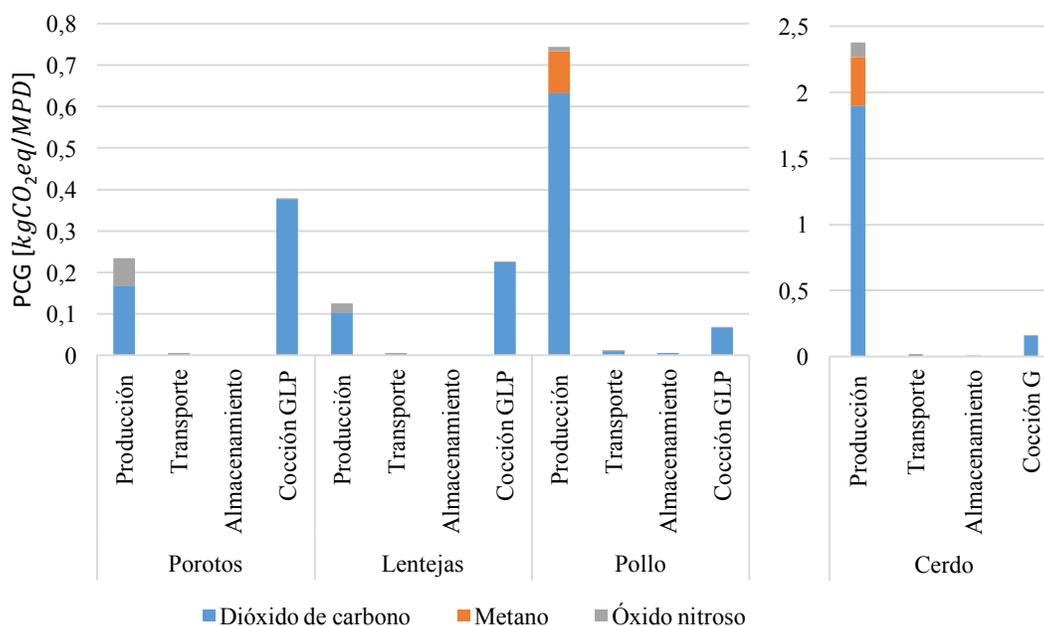


Gráfico 6. Contribución de cada emisión al Potencial de Calentamiento Global de las proteínas, por etapa.

Complementando lo anterior, se ve una clara tendencia en la contribución de las etapas (Gráfico 7). En las legumbres cerca de un 40% corresponde a emisiones de la etapa de producción y un 60% a emisiones de la cocción de la proteína. Mientras que en la carne, pese a que el PCG del cerdo es tres veces mayor al del broiler, en ambos la producción abarca aproximadamente un 90% de las emisiones totales. Contrario a lo que se pensaba, las etapas de transporte y almacenamiento con refrigeración tuvieron una reducida contribución.

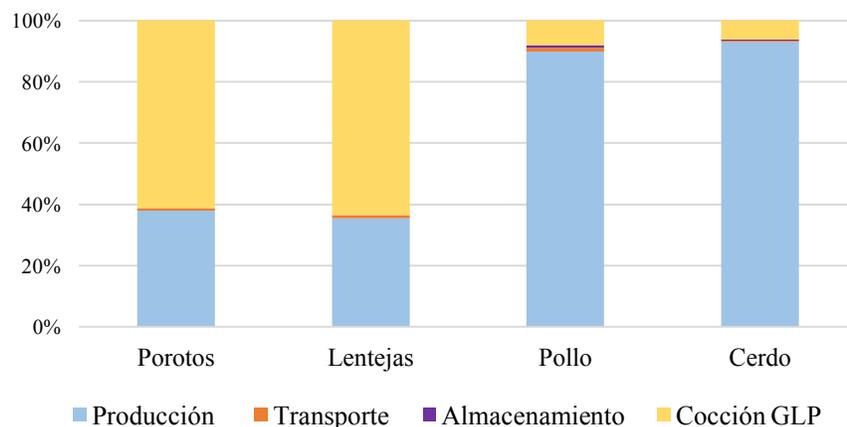


Gráfico 7. Contribución de cada etapa al total del PCG por proteína.

En las cuatro proteínas estudiadas fue predominante la emisión del gas CO₂, como se ve en la Tabla 12. En el caso de las legumbres, el principal aporte de dióxido de carbono ocurre en la etapa de cocción, y en las carnes en la etapa de producción, específicamente en la respiración y gestión de estiércol durante el engorde de éstos. En cuanto a la emisión de metano, ésta fue la segunda mayor emisión en el caso de la carne, y se debe al tratamiento de purín y de aguas residuales de las plantas de faena y rendering. En las legumbres, en segundo lugar se tiene la emisión de óxido nitroso, generada por el uso de enmiendas orgánicas para nutrir el suelo después del arado. Además, en el poroto se añade fertilizante sintético conocido como urea, su producción y uso es responsable del 26% del total de emisiones de esta proteína.

Tabla 12. Emisiones de GEI por proteína estudiada.

Proteína	Emisiones [$kgCO_2eq/MPD$]			PCG ₁₀₀ [$kgCO_2eq/MPD$]
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Porotos	0,55	1,8E-04	0,067	0,62
Lentejas	0,33	1,9E-04	0,024	0,36
Pollo	0,71	0,10	0,011	0,83
Cerdo	2,07	0,37	0,112	2,56

Adicionalmente, en la Tabla 13 se compara el Potencial de Calentamiento Global cuando el alimento se cocina con GLP y cuando se usa una cocina eléctrica. En las cuatro proteínas estudiadas las emisiones totales fueron menores en el caso de la cocina a gas. Las legumbres, debido a sus largos tiempos de cocción y a que se necesita consumir una mayor masa de ellas para cumplir con el requerimiento diario de proteína, son las que presentan un mayor PCG en esa etapa.

Tabla 13. Potencial de Calentamiento Global con dos tipos de cocinas.

Proteína	PCG ₁₀₀ etapa cocción [kgCO ₂ eq/MPD]		PCG ₁₀₀ total [kgCO ₂ eq/MPD]	
	Cocina GLP	Cocina Eléctrica	Cocina GLP	Cocina Eléctrica
Porotos	0,38	0,53	0,62	0,77
Lentejas	0,23	0,33	0,36	0,46
Pollo	0,07	0,09	0,83	0,85
Cerdo	0,16	0,22	2,5	2,6

Finalmente, al comparar el promedio del Potencial de Calentamiento Global de las legumbres y las carnes, cuando su cocción es en una cocina a gas, se observa que las carnes tienen un PCG 3,4 veces mayor al de las legumbres (Tabla 14). Entonces, al optar consumir proteína vegetal, en vez de proteína animal, se disminuye un 71% las emisiones de carbono equivalente derivadas de la alimentación por día.

Tabla 14. Potencial de Calentamiento Global promedio de la proteína vegetal y animal.

Tipo de proteína	Proteína	PCG ₁₀₀ total [kgCO ₂ eq/MPD]	Promedio [kgCO ₂ eq/MPD]
Vegetal	Porotos	0,62	0,49
	Lentejas	0,36	
Animal	Pollo	0,83	1,7
	Cerdo	2,5	

Por lo tanto, independientemente del tipo de cocina empleada, las legumbres se presentan como una opción con menor masa de emisiones de carbono equivalente, y reemplazar la proteína animal por una de origen vegetal sería una acción útil para reducir el impacto ambiental de la alimentación de una persona.

6. Huella ecológica

En este capítulo se muestran los datos y principales resultados los cuatro sistemas analizados. Se recopiló información sobre la energía eléctrica, área directa edificada o cultivada y las emisiones de dióxido de carbono liberadas al ambiente dentro de los límites definidos en el ACV y sus cuatro etapas: producción, transporte, almacenamiento y cocción.

El único límite cambiado fue el de la cocción, ya que en la huella ecológica de esta memoria no incluye la deposición final del envase. En la actualidad existe una amplia variedad de materiales y tipos de envases, por lo que el estudio de ellos excede la extensión de esta memoria.

6.1 Análisis de datos

A continuación se cuantifican entradas y salidas de estos sistemas, se evidencian los supuestos y los resultados obtenidos de las ecuaciones utilizadas.

6.1.1 Sistema de producción de poroto

En el cálculo de emisiones derivadas del uso de tractores en la agricultura chilena, se supuso que por cada 1 [HP] se consumen 0,12 [L/h] de diésel [125], y que se liberan 2,67 [$kgCO_2/L$] del combustible [126]. El gasto energético de las máquinas usadas en el cultivo se obtuvo de un artículo realizado por la Universidad de Concepción, de nombre “Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile” [108].

La preparación del terreno inicia con el arado, que tiene un costo energético de 744,9 [MJ/ha]. Luego, se allana, se extraen malezas y se forman hileras de sembrado por medio de una rastra de discos, cuyo coste energético promedio es de 267,2 [MJ/ha], el proceso se realiza tres veces [108]. Simultáneo al paso de la rastra se añaden 150 [kg/ha] de fertilizante superfosfato triple [32]. Para evitar pérdidas de rendimiento por el desarrollo de malezas se rocía, usando un tractor con pulverizador, 2 [L/ha] del herbicida Treflan generando un gasto energético de 95 [MJ/ha] [127].

El superfosfato triple es un fertilizante con alto contenido de fósforo. Se produce al reaccionar el mineral de roca apatita con ácido fosfórico o sulfúrico. Los procesos de extracción y molienda de la roca más la producción del compuesto liberan 61,08 [$kgCO_2/tFertilizante$] y requieren 2,1 [$GJ/tFertilizante$] [112]. Por su parte, la elaboración del herbicida trifluralina emite 0,001 [$kgCO_2/kgPoroto$] y necesita 0,094 [$MJ/kgPoroto$] [109].

Antes de sembrar se riega, con el propósito de facilitar la acción del fertilizante y el herbicida. En Chile el riego mecanizado se reserva para cultivos de alta rentabilidad, ya que el capital inicial para la instalación de riego presurizado es un factor limitante para la mayoría de los agricultores [128]. En el último censo agropecuario se constató que un 79% de las hectáreas destinadas a cultivo, en la región de O'Higgins, usan el riego por surco [129]. Este método aprovecha la gravedad para mover agua por los canales laterales a las hileras de siembra en pendiente, por lo que no requiere energía eléctrica.

Luego, la maquinaria de siembra tradicional de grano grueso consume 260,6 [MJ/ha]. Después de sembrar se agregan 100 [kg/ha] del fertilizante nitrogenado urea [32], 1 [L/ha] de insecticida Lorsban 4E [130] y 2,5 [L/ha] del herbicida Basagran; este último impide el surgimiento de malezas de hoja ancha [131]. También, con el fin de evitar la aparición del hongo *Ascochyta lentis*, causante de la antracnosis del poroto, se añaden 2 [kg/ha] del fungicida Cadilac 80 WP [39]. En la Tabla 15 se observan los requerimientos energéticos de la fabricación de los compuestos nombrados. En bibliografía se encontró sólo la emisión de CO₂ de la elaboración de Basagran, y es 0,012 [kgCO₂/kgPoroto].

Previo a la cosecha se hilera el campo, lo que tiene un costo de 197 [MJ/ha]. Después, se recolectan las semillas con una cosechadora de grano grueso, cuyo consumo energético promedio es 1.057 [MJ/ha].

Las etapas de transporte se ejecutan en un mismo tipo de camión de carga, sin control de temperatura. Se supuso que el primer tramo recorrido, desde el cultivo en Rengo a la empaquetadora en San Bernardo, son 100 [km] y el segundo tramo, desde la empaquetadora al punto de venta en Puente Alto, equivale a 20 [km]. Las emisiones por traslado equivalen a 0,018 [kgCO₂/kgPoroto], la metodología de cálculo se muestra en el Anexo D. Durante la permanencia de la legumbre en el punto de venta no se identifican actividades que demanden energía o que liberen GEI.

Finalmente, para cocinar los porotos primero se dejan remojando en agua 10 [h]. Transcurrido ese tiempo, se descarta el agua con un colador. En una cocina eléctrica de 1,5 [kW] de potencia, 800 [g] de porotos secos se cocerán en 1,17 [h], lo que se traduce en un consumo de 7,9 [MJ/kg]. En cocinas a gas (específicamente gas licuado de petróleo o GLP) con una potencia de 1,5 [kW], 800 [g] de porotos secos demoran 1,5 [h] en cocerse, liberando en el proceso 0,62 [kgCO₂/kg] [95][132]. Detalles del cálculo se encuentran en el Anexo C.

Tabla 15. Emisión de CO₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de poroto.

Etapa	Actividad		Emisión CO ₂ [kgCO ₂ /kg]	Consumo de energía [MJ/kg]
Producción	Preparación de suelo	Arado	0,053	-
		Rastraje	0,057	-
		Fertilizante	0,012	0,192
		Herbicida (fabricación y aplicación)	0,008	0,094
	Siembra	Sembradora de grano grueso	0,019	
	Crecimiento	Herbicida (Basagran)	0,012	0,175
		Fertilizante (Urea)	0,214	1,134
		Fungicida (Cadilac 80 WP)	-	0,111
		Insecticida (Lorsban 4E)	-	0,069
		Pulverizador de barra	0,056	-
	Cosecha	Hilerado	0,014	-
		Cosechadora de grano grueso	0,120	-

	Envasado	Limpiado, selección y separado	2,6E-06	0,0002
		Empaquetado	-	0,004
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,015	-
	Transporte 2	Sin refrigeración	0,003	-
Cocción		Cocina GLP	0,62	-
		Cocina eléctrica	-	7,9
Total cocina GLP			1,2	1,8
Total cocina eléctrica			0,5	9,7

En cuanto a la superficie ocupada en el proceso, se identifican tres fuentes. Como se ve en la Tabla 16, la primera es el área del cultivo, ésta se determina a partir del rendimiento de la lenteja que es $0,16 [kg/m^2]$ [28]. La segunda es la superficie construida para la planta de empaque, conseguida de bibliografía [133], y la tercera es el espacio utilizado en el punto de venta, calculada empíricamente.

Tabla 16. Superficies ocupadas por el sistema de producción de poroto en m^2 por masa de producto.

Etapa	Actividad	Superficie [m^2/kg]
Producción	Cultivo	5,9
	Empaque	0,0002
Almacenamiento	Punto de venta	0,03
Total		6,02

6.1.2 Sistema de producción de lenteja

El cálculo de emisiones de CO_2 para la producción de lenteja se basó en los mismos supuestos sobre consumo de diésel en tractores y emisiones de dióxido de carbono que el poroto. De igual forma, se usaron los datos de gasto energético de maquinaria agrícola del estudio “Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile” [108].

El cultivo comienza con la preparación de la tierra, que consiste en arar el suelo, lo que significa un consumo de $744,9 [MJ/ha]$, en nivelar el suelo, agregar agroquímicos, cortar residuos vegetales y mezclarlos con la tierra, mediante una rastra de discos, cuyo coste energético promedio por tres usos es $801,6 [MJ/ha]$ [108]. Para combatir malezas se añade $1 [L/ha]$ del herbicida trifluralina con un pulverizador de barra [134], consumiendo $95 [MJ/ha]$, y como fertilizante se adicionan $120 [kg/ha]$ superfosfato triple durante el paso de la rastra [135]. Análogo al poroto, la elaboración de superfosfato triple emite $61,08 [kgCO_2/tFertilizante]$ y demanda $2,1 [GJ/tFertilizante]$ [112]. Igualmente, la producción del herbicida trifluralina libera $0,002 [kgCO_2/kgLenteja]$ y exige $0,09 [MJ/kg lenteja]$ [109].

Posteriormente, se siembra con el método tradicional que tiene un costo energético de $260,6 [MJ/ha]$. En caso de ausencia de precipitaciones, se debe regar para favorecer la germinación. En Chile prevalece la agricultura familiar, por lo que predomina el sistema de

riego gravitacional y, en particular, en la región de O'Higgins un 80% de las personas que participaron en el último censo agropecuario afirmó que utiliza el riego por surco [128][129]. El riego por surco aprovecha la diferencia de nivel para distribuir agua por canales ubicados entre las hileras de siembra.

Durante el crecimiento, la lenteja puede verse afectada por la antracnosis. Esta enfermedad se puede prevenir con una dosis de 1 [kg/ha] del fungicida Benomyl [136]. La roya es otra enfermedad provocada por un hongo y se controla usando 2 [kg/ha] del fungicida Manzate 200 [137]. Para dificultar el desarrollo de malezas de hoja ancha se agregan 2 [kg/ha] de Simazina 50 [138]. Por último, se rocían 0,4 [L/ha] del insecticida Zero 5 EC [139]. En la Tabla 17 se indican los requerimientos energéticos de la fabricación de los compuestos aludidos [109]. En la misma tabla Benomyl sólo contiene la energía usada en la producción, mientras que los demás también incluyen la energía de formulación y empaque. Además, en la producción de Benomyl se liberan 0,0053 [kgCO₂/kgLenteja] [109].

En la cosecha se utiliza una hileradora y una cosechadora de grano grueso, sus consumos energéticos en promedio son 197 [MJ/ha] y 1.057 [MJ/ha], respectivamente [108]. El rendimiento nacional de la cosecha de lenteja 0,086 [kg/m²] [28].

El traslado de lentejas se basa en los mismos supuestos y recorridos que el transporte de poroto desde el cultivo en Rengo a San Bernardo (100 [km]), y de la empaquetadora a Puente Alto (20 [km]). El combustible diésel consumido en ambos viajes genera una emisión de 0,018 [kgCO₂/kg]. La metodología de cálculo fue idéntica a la de los porotos.

Una vez que el consumidor compra las lentejas, debe remojarlas en agua por 10 [h] y luego remover el agua con un colador. Cocinar 800 [g] de lentejas secas en una encimera de 1,5 [kW] de potencia, tarda 0,67 [h] y demanda 4,5 [MJ/kg]. Cocer la misma masa de lentejas en una cocina a gas de 1,5 [kW], demora 0,83 [h] y emite 0,34 [kgCO₂/kg].

Tabla 17. Emisión de CO₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de lenteja.

Etapa	Actividad		Emisión CO ₂ [kgCO ₂ /kg]	Consumo de energía [MJ/kg]
Producción	Preparación de suelo	Arado	0,103	-
		Rastraje	0,111	-
		Fertilizante	0,019	0,30
		Herbicida (fabricación y aplicación)	0,011	0,09
	Siembra	Sembradora de grano grueso	0,036	-
	Crecimiento	Herbicida (Simazina 50)	-	0,17
		Fungicida (Benomyl)	0,005	0,14
		Fungicida (Manzate 200)	-	0,22
		Insecticida (Zero 5EC)	-	0,08
		Pulverizador de barra	0,037	-
	Cosecha	Hilerado	0,027	-

	Envasado	Cosechadora de grano grueso	0,147	-
		Limpiado, selección y separado	2,6E-06	0,0002
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,015	-
	Transporte 2	Sin refrigeración	0,003	-
Cocción		Cocina a gas	0,34	-
		Cocina eléctrica	-	4,5
Total cocina GLP			0,9	1,0
Total cocina eléctrica			0,5	5,5

En relación a la superficie requerida en el proceso, se tiene el área del cultivo de la lenteja, determinada por su rendimiento de $0,08 [kg/m^2]$ [28]. Además, tal como se muestra en la Tabla 18, se contabiliza la superficie construida para la planta de empaque y el espacio utilizado en el punto de venta [133].

Tabla 18. Superficies ocupadas por el sistema de producción de lenteja en m^2 por masa de producto.

Etapas	Actividad	Superficie [m^2/kg]
Producción	Cultivo	11,6
	Empaque	0,0002
Almacenamiento	Punto de venta	0,024
Total		11,65

6.1.3 Sistema de producción de carne de broiler

Tal como en el ACV, los datos del engorde se obtuvieron del proyecto “Sector de crianza de pollos broiler, Las Correhuelas” [55], y la información sobre la faena del proyecto “Actualización y desarrollo planta faenadora de aves Lo Miranda” [61].

La planta de engorde posee una extensión de $96.160 [m^2]$ y la capacidad de criar $1.440.000 [broilers/año]$. En 45 días, el animal bebe $25 [kg]$ de agua e ingiere $4,7 [kg]$ de alimento, compuesto mayoritariamente por maíz. Así, se consigue aumentar su masa de $42 [g]$ a $2,6 [kg]$. A lo largo de este proceso, se utiliza gas licuado de petróleo para la calefacción ($20 [g/broiler]$ diarios) y energía eléctrica para ventilar y extraer aire, iluminar, bombear agua y distribuir comida [140]. Las principales entradas y salidas de esta etapa se observan en la Tabla 19 [55].

Tabla 19. Entradas y salidas de la planta de engorde.

Parámetro	Valor	Unidad
Comida	4,7	kg/broiler
Agua de consumo	25	kg/broiler
Energía eléctrica	2,5	MJ/broiler
Emisiones de CO_2	1,2	kg CO_2 /broiler
Cama de broiler	0,0014	m^3 /broiler

Se supuso que el alimento del pollo broiler de engorde se compone en un 100% de maíz. La fábrica de este alimento emite $0,22 [kgCO_2/kgBroiler]$ y consume $0,29 [MJ/kgBroiler]$. Dado que el rendimiento promedio nacional del maíz es de $1,33 [kg/m^2]$, el área necesaria para cosechar $4,7 [kg]$ de comida para un pollo broiler es de $10,3 [m^2/kgBroiler]$ [24].

La planta faenadora posee una superficie $18.505 [m^2]$ y un requerimiento energético de $5.449 [GJ/mes]$. Su producción estimada es de $23.000 [t/mes]$ de carne de ave. Como se mencionó anteriormente, el aturdimiento de pollo previo a su muerte se provoca en una cámara con un ambiente saturado en CO_2 , lo que probablemente genera una emisión de este gas al ambiente, sin embargo, no se encontraron estudios que midieran la concentración final de CO_2 en la cámara luego del paso de los animales, por lo que no se incluyó en el análisis. El envasado de la carne está incluido en el estudio, es parte del consumo de energía eléctrica. En la Tabla 20 se ven los valores de las principales entradas y salidas de la planta [61].

Tabla 20. Entradas y salidas de la planta faenadora de broilers.

Parámetro	Valor	Unidad
Agua	0,16	kg/broiler
Energía eléctrica	0,46	MJ/broiler
Emisiones de CO_2	0,109	kg CO_2 /broiler
Residuos líquidos	0,007	m ³ /broiler
Residuos sólidos	1,6	kg/broiler

Una planta faenadora que procesa $42.000 [broiler/día]$, genera $1.310 [m^3/día]$ de residuos líquidos, tratados en una planta de RILes de $1.000 [m^2]$ que demanda $4.223 [MJ/día]$. El agua resultante del tratamiento se descarga al sistema de alcantarillado y los lodos deshidratados se envían a una planta de compostaje [141]. Lamentablemente, no se hallaron datos de una planta de rendering que operara exclusivamente con menudencias de pollo broiler, puesto que en general se tratan en conjunto a desechos de carne de pavo y/o cerdo.

En este sistema existen dos tipos de transporte. El primero corresponde al traslado de animales a la planta de faena, se realiza con un camión diésel, y se fijó como un recorrido de $50 [km]$ a una velocidad de $70 [km/h]$. El segundo, es el transporte de carne refrigerada desde la planta de faena al punto de venta; la distancia a recorrer es de $123 [km]$ a una velocidad de $90 [km/h]$, en un camión diésel. En la Tabla 21 se encuentra el resultado del cálculo de emisiones.

Una vez en el punto comercial, la carne debe ser almacenada en un refrigerador que se mantiene operativo las 24 horas del día. Se supuso que ese refrigerador cuenta con una capacidad de $412 [L]$ y una potencia de $77 [MJ/día]$, consumiendo $0,16 [MJ/kg]$ [142].

Por último, para preparar $0,8 [kg]$ de pechuga de pollo en una cocina eléctrica de $1,5 [kW]$, sin agua, se debe dejar $0,42 [h]$, lo que demanda un consumo de energía de $2,8 [MJ/kg]$. Por otro lado, cocer $0,8 [kg]$ de pechuga de pollo, sin agua, en una cocina a gas con una potencia de $1,5 [kW]$, demora $0,58 [h]$, necesitando $3,9 [MJ/kg]$ para completar el proceso; lo anterior genera una emisión de $0,24 [kgCO_2/kg]$.

Tabla 21. Emisión de CO₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de carne de pollo.

Etapa	Actividad		Emisión CO ₂ [kgCO ₂ /kg]	Consumo de energía [MJ/kg]
Producción	Crecimiento del animal	Iluminación, ventilación y bombeo de agua	-	1,27
		Calefacción GLP	0,63	-
		Respiración y estiércol	0,67	-
		Producción de alimento	0,32	0,29
	Procesamiento	Planta faenadora	0,06	0,12
		Tratamiento agua	-	0,05
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,01	-
	Transporte 2	Con refrigeración	0,02	-
Almacenamiento		Con refrigeración	-	0,16
Cocción		Cocina a gas	0,24	-
		Cocina eléctrica	-	2,29
Total cocina GLP			1,9	1,9
Total cocina eléctrica			1,7	4,2

La superficie utilizada en el proceso, ya sea como construcción (en el caso de plantas de producción, pabellón de engorde y punto de venta) o como suelo de cultivo, se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Superficies ocupadas por el sistema de producción de pollo en m² por masa de producto.

Etapa	Actividad	Superficie [m ² /kg]
Producción	Crecimiento	0,035
	Cultivo alimento	10,3
	Procesamiento	0,0001
Almacenamiento	Punto de venta	0,06
Total		10,41

6.1.4 Sistema de producción de carne de cerdo

Los datos se obtuvieron del proyecto “Agroindustrial del Valle del Huasco”, ya que cubre la mayor parte de la fase de producción: una fábrica de pellet, una planta de engorde y faena de cerdos y sus correspondientes plantas de rendering y tratamiento de aguas. Además, el proyecto se sometió a una Evaluación de Impacto Ambiental, por lo que se dispone de información accesible para el estudio [122][123][69]. Las instalaciones suman en total 307 hectáreas [143].

El pellet necesario para alimentar a los animales se elabora principalmente con maíz (67%) y harina de trigo, que a través de procesos térmicos y físicos se mezcla y comprime formando aproximadamente 300 toneladas de alimento por hora. Se supuso que el 32% restante de la masa del pellet se compone de harina de trigo. En la Tabla 23 están el gasto energético, las emisiones de CO₂ y agua consumida.

Tabla 23. Entradas y salidas de la planta de alimento.

Parámetro	Valor	Unidad
Agua	29.917	kg/h
Energía eléctrica	9.751	MJ
Emisiones de CO ₂	7.845	kgCO ₂ /h

La primera etapa del ciclo ocurre en los pabellones de lactancia. Allí se utiliza energía eléctrica para iluminar y mantener la temperatura entre 28 y 30 [°C] con lámparas calefactoras. En 21 días el cerdo recién nacido (lechón) recibe agua, comida y leche materna, ganando 4 [kg]. Por el contrario, la chanchilla comienza con 145 [kg] y termina la lactancia con 122 [kg]. Ambos emiten GEI a causa de su respiración y su estiércol [124]. En la Tabla 24 se muestra la suma de las principales entradas y salidas de esta etapa para la madre y el cerdo lactante.

Tabla 24. Entradas y salidas de la etapa de lactancia.

Parámetro	Valor	Unidad
Comida (chanchilla y lechón)	48,7	kg
Agua de consumo	349,2	kg
Energía eléctrica	61,2	MJ/cerdo
Emisiones de CO ₂	73,6	kgCO ₂ /chanchilla y lechón
Purín (incluye agua de lavado)	398	kg

Luego, el crecimiento del cerdo continúa en los pabellones de engorde, en donde permanece 159 días hasta pesar 120 [kg]. Durante ese tiempo se necesita energía eléctrica para iluminar, extraer aire y ventilar, su valor total se encuentra en la Tabla 25.

Tabla 25. Entradas y salidas de la planta de engorde.

Parámetro	Valor	Unidad
Comida	337	kg/cerdo
Agua de consumo	435	kg/cerdo
Energía eléctrica	57	MJ/cerdo
Emisiones de CO ₂	308	kgCO ₂ /cerdo
Purín	779	kg/cerdo

La planta faenadora tiene capacidad para procesar 1.000 cerdos vivos por hora y la jornada de trabajo es de 16 horas diarias. Al igual que en el sistema de pollo broiler, el aturdimiento se realiza con CO₂, sin embargo, al no encontrarse documentos que midan el excedente de este gas, no es posible incluirlo en el análisis. En la Tabla 26, la energía eléctrica incluye el consumo requerido para envasar y el purín corresponde a excretas y agua de lavado generadas en la zona de espera de cerdos antes de entrar a la planta faenadora [66].

Tabla 26. Entradas y salidas de la planta faenadora de cerdos.

Parámetro	Valor	Unidad
Agua (escaldado, depilado, lavado)	51,9	kg/cerdo
Energía eléctrica	24,2	MJ/cerdo
Emisiones de CO ₂	6,79	kgCO ₂ /cerdo
Purín	0,29	kg/cerdo

Los residuos como pezuñas, sangre, vísceras, grasa, cerdos muertos anticipadamente, entre otros son transformados en harina y aceite en la planta de rendering. La fábrica es capaz de recibir 10 toneladas de desechos por hora, generando 1,4 [t/h] de harina y 0,51 [t/h] de aceite. En la Tabla 27 se hallan los principales parámetros.

Tabla 27. Entradas y salidas de la planta de rendering.

Parámetro	Valor	Unidad
Agua	2,64	t/h
Energía eléctrica	147,9	MJ/t de residuo
Emisiones de CO ₂	1.035	kgCO ₂ /h

Los RILes de las plantas de lactancia y engorde se componen en un 45% de orina y 55% de excretas, a los que se agrega seis veces su volumen en agua. Esta mezcla es tratada en una planta de lodos activados, en donde se le inyecta aire para favorecer el desarrollo de microorganismos aerobios que oxidan la materia orgánica. El proceso completo requiere 0,15 [MJ/kg]. Como resultado, un 19% del agua se puede recircular al sistema, un 19% se destina al riego de plantaciones forestales, frutales o cultivos cercanos y un 62% se convierte en lodo compostable. El CO₂ producido durante el proceso de compostaje es de origen biogénico, ya que participa en el ciclo global de carbono, y no se agrega como fuente de GEI [144].

Los RILes generados por el lavado en las plantas de faena y rendering son tratados en la planta de flotación. El agua contaminada con aceite, grasas y materia orgánica (principalmente sangre) se filtra y luego, mediante aire a presión, se hace flotar la materia orgánica presente. La parte líquida es homogeneizada y sometida a un tratamiento biológico y la parte sólida (el lodo) es removida y deshidratada. Todo lo anterior demanda 0,0008 [MJ/kg]. De los RILes ingresados al tratamiento se obtiene un 33% de agua apta para riego agrícola y 67% de lodos compostables.

El transporte de este sistema se divide en dos tipos. Primero, se realiza el transporte de cerdos vivos desde la planta de engorde a la planta de faena, la distancia propuesta recorrida es de 50 [km] a una velocidad de 60 [km/h] con un camión diésel. Seguidamente, se traslada en camiones refrigerados la carne de cerdo desde la planta de faena, ubicada en Rengo, al punto comercial en Puente Alto, la distancia recorrida es de 123 [km] a una velocidad de 90 [km/h], en camiones cuya emisión por masa de producto está en la Tabla 28.

La carne en el punto de venta debe ser almacenada en un refrigerador, cuyo consumo energético es de 0,19 [MJ/kg]. Se supuso que el refrigerador funciona las 24 horas del día, cuenta con una capacidad de 412 [L] y una potencia de 77 [MJ/día] [142].

Finalmente, para cocer la carne en una cocina eléctrica de 1,5 [kW] se dejó 0,8 [kg] de chuleta de cerdo en una olla, sin agua, por 1,12 [h], por lo que se destinaron 7,6 [MJ/kg] en su cocción. Mientras que, cocer la misma masa de chuleta de cerdo, sin agua, en una cocina a gas con una potencia de 1,5 [kW], tardó 1,47 [h], liberando al ambiente 0,39 [kgCO₂/kg].

Tabla 28. Emisión de CO₂ y consumo de energía de cada actividad del sistema de producción de carne de cerdo.

Etapa	Actividad		Emisión CO ₂ [kgCO ₂ /kg]	Consumo de energía [MJ/kg]
Producción	Crecimiento del animal	Lactancia (iluminación, ventilación y calefacción)	-	0,65
		Lactancia (respiración y manejo de estiércol)	0,61	-
		Engorde (Iluminación, ventilación)	-	0,60
		Engorde (respiración y manejo de estiércol)	2,57	-
		Producción de alimento	0,12	0,15
		Tratamiento agua	-	0,15
	Procesamiento	Planta faenadora	0,07	0,26
		Planta rendering	0,85	0,24
		Tratamiento agua	-	0,001
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,007	-
	Transporte 2	Con refrigeración	0,022	-
Almacenamiento		Con refrigeración	-	0,19
Cocción		Cocina a gas	0,6	-
		Cocina eléctrica	-	7,6
Total cocina GLP			4,9	2,2
Total cocina eléctrica			4,3	9,8

En la Tabla 29 se enlista la superficie ocupada por cada actividad en las etapas de producción y almacenamiento, en metros cuadrados por masa de producto. El área de las plantas de tratamiento están incluidas en su actividad.

Tabla 29. Superficies ocupadas por el sistema de producción de cerdo en m² por masa de producto.

Etapa	Actividad	Superficie [m ² /kg]
Producción	Crecimiento	0,008
	Cultivo alimento	8,73
	Procesamiento	0,006
Almacenamiento	Punto de venta	0,042
Total		8,78

6.2 Resultados

En este capítulo se exponen los resultados de la huella ecológica calculada para cada proteína, se reconoce la etapa que genera los mayores impactos negativos al medio ambiente y se realizan comparaciones entre etapas. La metodología utilizada se explica en la sección de Antecedentes: Huella ecológica. En el Anexo G se presentan dos ejemplos de cálculo de la huella ecológica y en el Anexo H se muestran en detalle los resultados obtenidos de las cuatro proteínas en las distintas etapas.

6.2.1 Huella ecológica por sistema de producción

En el siguiente apartado se muestra la huella ecológica del ciclo de vida de las proteínas seleccionadas, en las cuatro etapas definidas en secciones anteriores: producción, transporte, almacenamiento y cocción, y en las tres fuentes de impacto ambiental analizadas: uso directo de suelo, emisiones de CO₂ y consumo de electricidad.

6.2.1.1 Huella ecológica poroto

La huella ecológica del sistema de producción de poroto tiene un valor aproximado de 5 [$m^2\text{yr}/MPD$], lo que quiere decir que para producir la masa de proteína que necesita una persona chilena promedio en un día y absorber los residuos que deja el proceso, se requieren 5 [m^2] de superficie. En el Gráfico 8 se identifica a la etapa de producción como la que proporciona el mayor impacto ambiental, con más de un 72% de la huella ecológica total. Dentro de esa etapa, el principal aporte es el área de cultivo de poroto que abarca el 70% de la huella de producción, seguido de las emisiones generadas por el consumo de combustible diésel en la maquinaria agrícola. En segundo lugar, se tienen las cargas ambientales de la cocción, que en el caso del uso de GLP fue de 0,9 [$m^2\text{yr}/MPD$] y en el de la cocina eléctrica fue de 1,4 [$m^2\text{yr}/MPD$]. En tercer lugar se encuentra la huella derivada de las emisiones del transporte y en cuarto el almacenamiento en el punto de venta, las que representan un 0,3% y un 0,2% respectivamente, para ambos tipos de cocina.

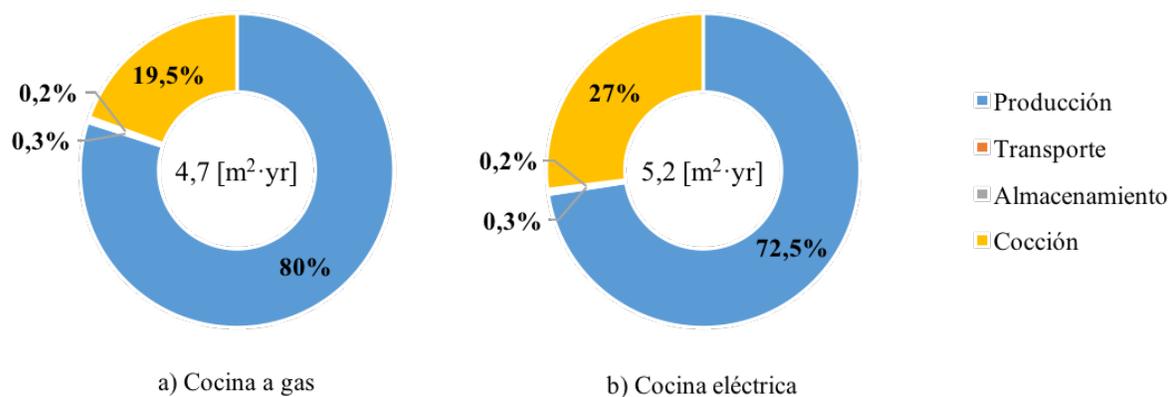


Gráfico 8. Huella ecológica poroto por etapa, en una cocina a gas (a) o una eléctrica (b).

El Gráfico 9 refuerza lo que se mencionó anteriormente, ya que el uso directo de suelo corresponde en mayor parte a la superficie de tierra destinada al cultivo de la legumbre.

Además, la variación entre las proporciones de emisiones y consumo eléctrico según el tipo de cocina sugiere que la decisión de cocinar usando gas o electricidad es relevante; esto se puede explicar por el largo periodo que tarda el poroto en cocerse.

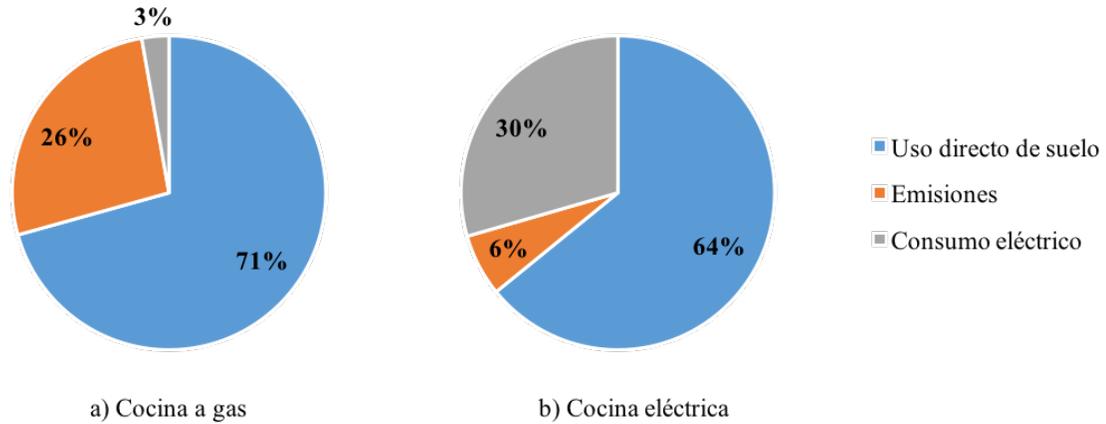


Gráfico 9. Huella ecológica del poroto por tipo de impacto ambiental.

6.2.1.2 Huella ecológica lenteja

La huella ecológica del sistema de producción de lenteja equivale a $7 [m^2 \text{ yr} / \text{MPD}]$. Como se ve en el Gráfico 10, la etapa de producción es entre un 88 y 92% de la huella total. En esta etapa se identifica al cultivo de lenteja como la mayor carga ambiental, abarcando un 94% de la etapa, seguido de la emisión de CO_2 provocada por la maquinaria agrícola. Por otro lado, el aporte de la cocción a la huella es de $0,87 [m^2 \text{ yr} / \text{MPD}]$ en el tipo de cocina eléctrica y de $0,55 [m^2 \text{ yr} / \text{MPD}]$ en la cocina a gas, la etapa es la segunda fuente de impacto ambiental.

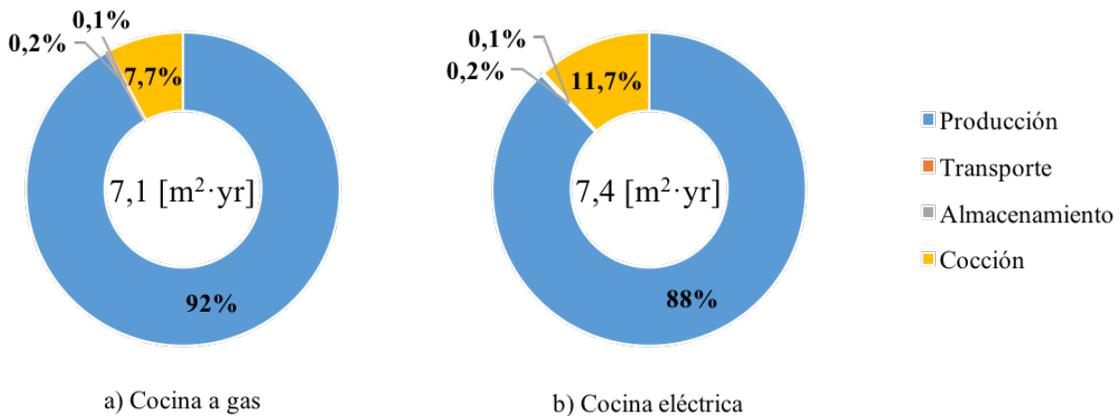
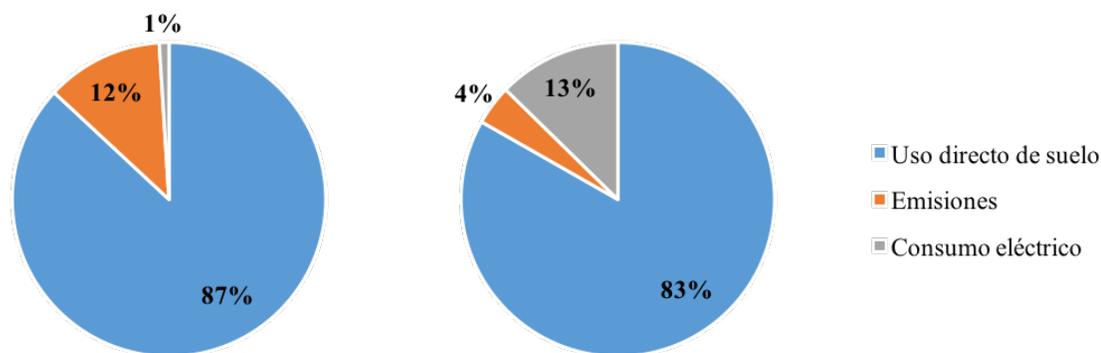


Gráfico 10. Huella ecológica lenteja por etapa, en una cocina a gas o una eléctrica.

Se distingue en el Gráfico 11 que la contribución más significativa a la huella ecológica se debe al uso directo de suelo, principalmente por el cultivo de lenteja. También, se observa que la magnitud del impacto del consumo eléctrico y de las emisiones está fuertemente asociado al tipo de cocina elegida.



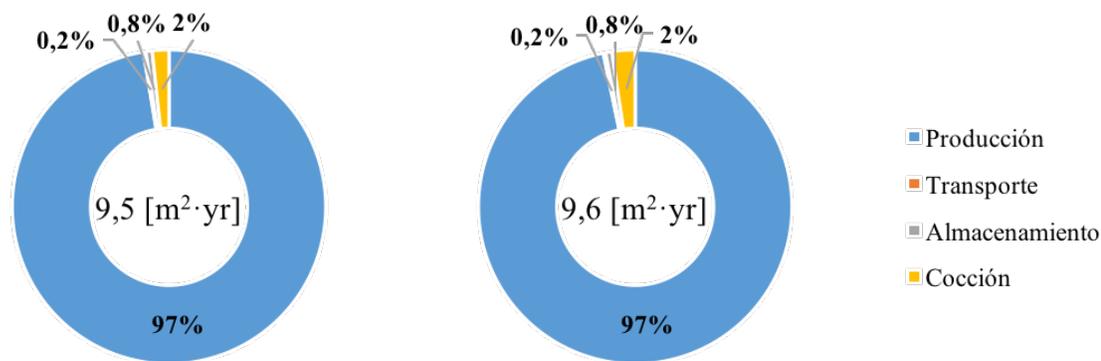
a) Cocina a gas

b) Cocina eléctrica

Gráfico 11. Huella ecológica de la lenteja por tipo de impacto ambiental.

6.2.1.3 Huella ecológica carne de broiler

La huella ecológica de esta proteína es 9,5 [$m^2 \cdot yr / MPD$]. En el Gráfico 12 se observa que la etapa de producción corresponde a un 97% del total, siendo la que genera un mayor costo ambiental. La actividad dentro de la producción que más aporta a la huella ecológica es el uso de tierra para cultivo de alimento animal. En segundo lugar se ubica la etapa de cocción del pollo, que no presenta mayores diferencias entre el tipo de cocina utilizada. En penúltimo lugar se tiene el transporte de la carne, que si bien se produjo un aumento en su valor debido a la incorporación del transporte refrigerado, este no fue lo suficientemente significativo como para desplazar a la producción de alimento.



a) Cocina a gas

b) Cocina eléctrica

Gráfico 12. Huella ecológica carne de pollo por etapa, en una cocina a gas o una eléctrica.

Las emisiones de CO_2 en el Gráfico 13 se mantienen estables, independientemente del tipo de cocina, ya que al integrar otras fuentes de liberación de CO_2 (por el uso de lámparas calefactoras que operan con gas licuado de petróleo y por funciones biológicas del pollo broiler) se desplazan a un tercer plano el consumo eléctrico y de GLP en la cocina. En efecto, la respiración del animal representa un 35% de las emisiones de CO_2 , mientras que la calefacción es responsable de un 33% y el uso de GLP en la cocina de un 10%.

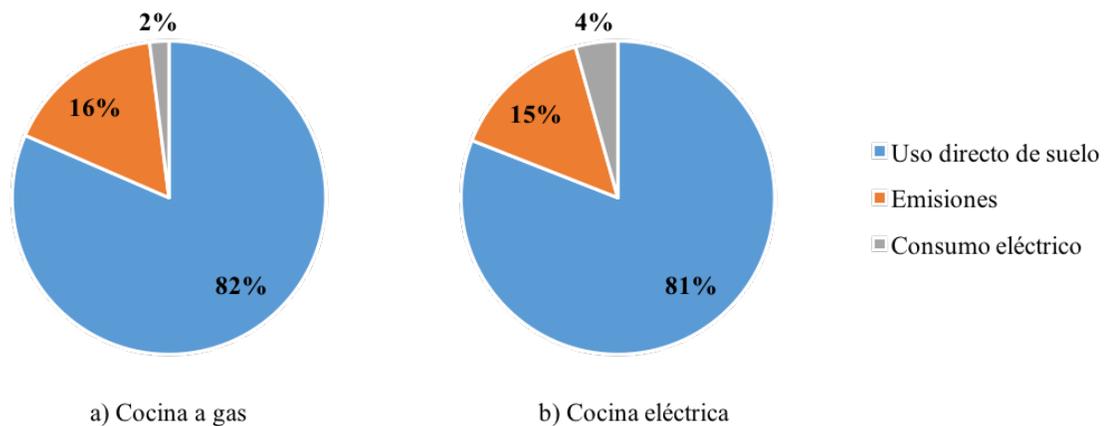


Gráfico 13. Huella ecológica de la carne de pollo por tipo de impacto ambiental.

6.2.1.4 Huella ecológica carne de cerdo

La huella ecológica de esta proteína es aproximadamente 13 [$m^2 \cdot yr / MPD$]. Tal como se expone en el Gráfico 14 la producción abarca del 95 al 97% del impacto total. El factor que más adiciona cargas en la producción es el cultivo de alimento para el crecimiento del cerdo, seguido de las emisiones de CO_2 por respiración y gestión del estiércol animal. La cocción del cerdo se sitúa como la segunda etapa con mayor porcentaje de impacto, ya que la carne de este animal demora más de una hora en completar su cocción. El transporte y almacenamiento se mantienen sin sobresalir en impacto ambiental.

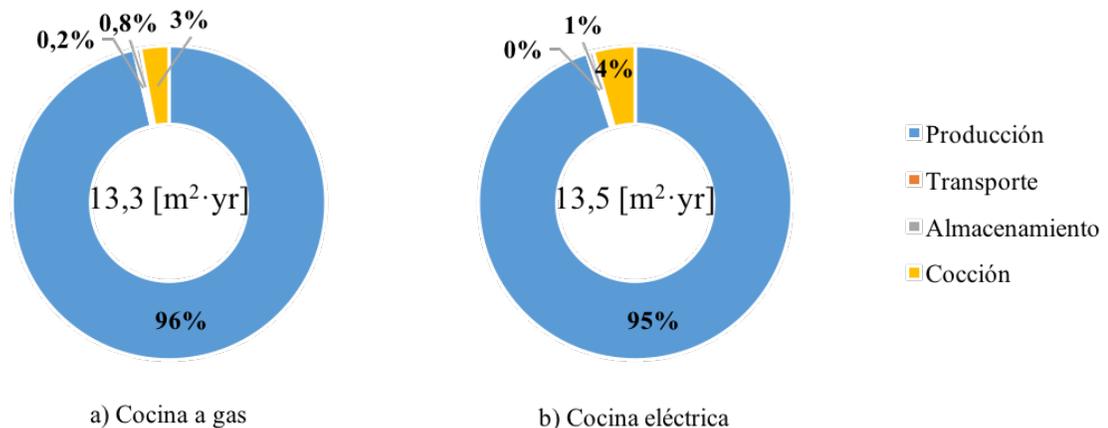


Gráfico 14. Huella ecológica carne de cerdo por etapa, en una cocina a gas o una eléctrica.

Se observa en el Gráfico 15 que el uso directo de suelo es la categoría con mayor impacto ambiental. También destacan las emisiones de CO_2 en la huella ecológica de la producción de proteína de cerdo, principalmente por las razones mencionadas en el párrafo anterior: el cerdo es un animal cuya respiración y función digestiva emite importantes sumas de GEI, y además la carne del cerdo es la segunda de las cuatro proteínas que más demora en cocerse completamente.

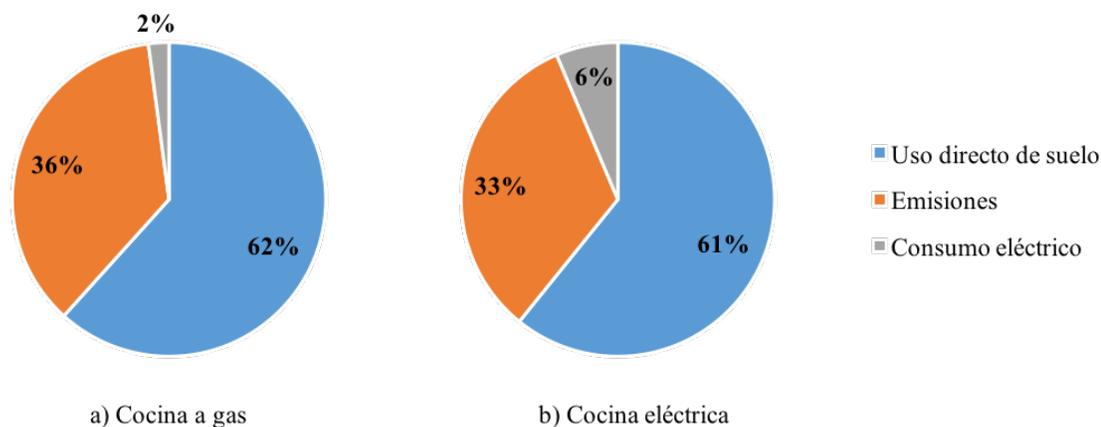


Gráfico 15. Huella ecológica de la carne de cerdo por tipo de impacto ambiental.

Es preciso señalar que el resultado obtenido no incluye la gestación del cerdo, etapa de 114 días en la que se produce una gran ingesta de agua y alimento por parte de la cerda gestante, por lo que si se ampliaran los límites para abarcar esta etapa del ciclo de la vida del cerdo, la huella ecológica tendría un valor cercano a los 19 [$m^2 yr/MPD$].

6.2.2 Comparación de resultados

La huella ecológica del cerdo resultó ser la mayor, debido principalmente al cultivo de alimento que se suministra durante el periodo de crecimiento del animal, tal como lo señalan los estudios internacionales mencionados en la sección Estado del arte. Adicionalmente, se suman como fuertes impactos la emisión de CO_2 por respiración y purines, el tratamiento de residuos líquidos y la valorización de residuos sólidos mediante una planta de fabricación de harina y aceite. El pollo comparte con el cerdo el impacto de la elaboración de su alimento y de sus emisiones biológicas, pero en una menor escala, ya que el pollo adquiere sólo 2,6 [kg] en 45 días y consume 4,7 [kg] de alimento, a diferencia del cerdo que alcanza 120 [kg] en 180 días y en total ingiere 390 [kg] de pellet. Estas y otras razones dejan al pollo como la proteína con la segunda huella ecológica más grande, como se observa en el Gráfico 16.

Las legumbres lograron las menores huellas. Pese a que el poroto supera a la lenteja en emisiones y uso de energía por parte de máquinas agrícolas, agroquímicos y fertilizantes, la huella del poroto es menor porque su área de cultivo para cubrir el requerimiento de proteína diario para una persona también lo es. Además, este aumento se explica porque el proceso de obtención de proteína a partir de la lenteja se ve altamente influenciado por el bajo rendimiento de este cultivo (0,086 [kg/m^2]). Si, por ejemplo, la lenteja presentara el mismo rendimiento que la planta de poroto (0,17 [kg/m^2]), la huella ecológica usando una cocina a gas tendría un valor de 4,2 [$m^2 yr/MPD$] y con una cocina eléctrica 3,9 [$m^2 yr/MPD$], es decir, su huella ecológica sería incluso menor a la que posee el poroto. El máximo rendimiento de la lenteja en el país se observa en la región de la Araucanía y en la región del Biobío, donde se registra un rendimiento entre 0,10 – 0,12 [kg/m^2].

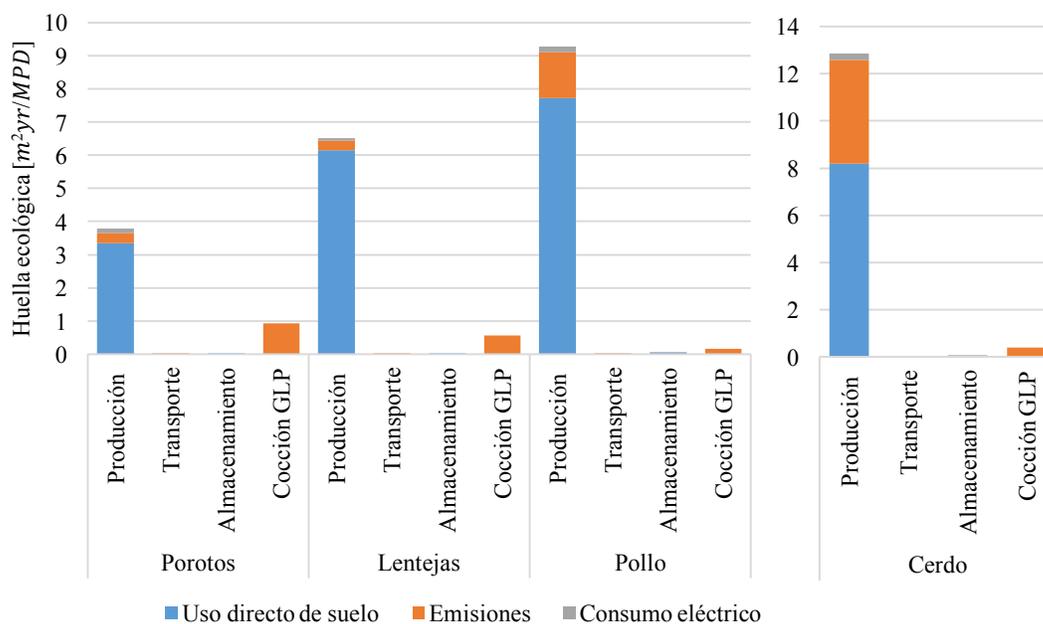


Gráfico 16. Contribución de cada factor a la huella ecológica de las proteínas, por etapa.

En la Tabla 30 se exponen los resultados obtenidos para cada proteína por etapa de producción (con cocción a gas). Al comparar legumbres con carnes se ve el claro incremento en el impacto del transporte, cuando el camión posee un sistema refrigerado; lo mismo ocurre en el almacenamiento con unidad de frío en el punto de venta de la carne de cerdo y pollo.

Tabla 30. Cuadro comparativo por etapa de cada sistema de producción de proteína.

Etapa	Poroto [m²·yr/MPD]	Lenteja [m²·yr/MPD]	Pollo [m²·yr/MPD]	Cerdo [m²·yr/MPD]
Producción	3,79	6,51	9,29	12,84
Transporte	0,01	0,01	0,02	0,03
Almacenamiento	0,02	0,01	0,06	0,06
Cocción con GLP	0,92	0,55	0,16	0,39
Total	4,7	7,1	9,5	13,3

La cocción de la proteína, en general, fue el segundo foco de impacto ambiental, por lo que se enfatiza la importancia de fijar los límites del ciclo hasta el consumo del alimento en el ACV de éstos. La cocina eléctrica tuvo un impacto superior a la cocina con GLP (Tabla 31), esto se puede explicar porque en la matriz energética del país las energías renovables no convencionales, reconocidas por tener un bajo impacto ambiental, conforman sólo un 18% de la matriz, mientras que las energías no renovables, las mayores generadoras de GEI, poseen una alta participación, llegando al 43% [145].

Tabla 31. Huella ecológica promedio de la proteína vegetal y animal.

Proteína	Huella ecológica etapa cocción [m ² yr/MPD]		Huella ecológica total [m ² yr/MPD]	
	Cocina GLP	Cocina Eléctrica	Cocina GLP	Cocina Eléctrica
Porotos	0,92	1,41	4,7	5,2
Lentejas	0,55	0,87	7,1	7,4
Pollo	0,16	0,23	9,5	9,6
Cerdo	0,39	0,58	13,3	13,5

Si se compara la huella ecológica promedio entre legumbres y carnes, Tabla 32, se observa que la huella de las carnes es en promedio 1,9 veces mayor a la de las legumbres. Por lo tanto, al preferir una proteína vegetal se utiliza un 48% menos de superficie biológicamente productiva por día.

Tabla 32. Huella ecológica promedio de la proteína vegetal y animal.

Tipo de proteína	Proteína	Huella ecológica [m ² yr/MPD]	Promedio [m ² yr/MPD]
Vegetal	Porotos	4,7	5,9
	Lentejas	7,1	
Animal	Pollo	9,5	11,4
	Cerdo	13,3	

En consecuencia de todo lo anteriormente mencionado, los resultados de la huella ecológica indican que al reemplazar fuentes proteicas de origen animal por otras de origen vegetal sí implicaría una disminución en el impacto ambiental de la alimentación de una persona.

7. Alcance económico

En esta sección se aborda el aspecto económico al que se enfrenta el consumidor al decidir lo que comprará en un punto de venta. Para ello, se estudiará la relación precio-masa de proteína contenida en algunos típicos productos disponibles al preparar una cena o un almuerzo. Además, se compara el uso de cocina a gas o eléctrica de acuerdo al consumo de energía al cocinar las proteínas estudiadas.

7.1 Costo de mercado

Primero, se averiguaron los precios de mercado en tres sitios distintos para cada alimento, en su versión fría para las carnes y en bolsa para las legumbres. En el caso del pollo se eligieron los precios sólo de la pechuga deshuesada, dado que los resultados del ACV se hicieron en torno a ese corte; bajo el mismo argumento, en el caso del cerdo se seleccionaron los precios de la chuleta de cerdo.

De la búsqueda descrita anteriormente, se obtuvo que el precio promedio de un kilogramo de porotos es de \$2.776, el de un kilogramo de lentejas es \$2.336, de un kilogramo de pechuga de pollo es de \$4.501 y por último el precio promedio de un kilogramo de chuleta de cerdo es \$5.463. El detalle de este cálculo y los siguientes se encuentran en el Anexo I. Suponiendo que no existen pérdidas de masa del paquete comprado, es decir, que todo lo que está dentro del paquete es consumido, se divide el costo por la masa de producto, y ese resultado se multiplica por la masa del alimento que cubre el requerimiento diario de proteína. Así, el precio de cubrir la demanda mínima de proteína diaria, definida como 0,059 [kg], para cada proteína se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Costo de consumir todo el requerimiento diario de proteína con los alimentos estudiados.

Proteína	Costo [\$/MPD]
Poroto	704
Lenteja	562
Pollo	1.528
Cerdo	2.325

El resultado no es una sorpresa, es ampliamente sabido que las legumbres tienen un valor comercial menor al de la carne. De hecho las legumbres son un bien inferior, lo que quiere decir que las personas disminuyen su consumo en la medida que suben sus ingresos. En general, se tiende a reemplazar las legumbres por la carne debido a su sabor y fácil preparación. Es por esto que los subproductos de la carne, como vienas y hamburguesas, al entrar en el mercado con un precio asequible, rápidamente se convirtieron en un sustituto económico de la carne [146]. Sin embargo, los subproductos de la carne presentan un porcentaje considerable de grasas saturadas, por lo que no son equivalentes en términos nutritivos a la carne. Razón por la cual se decide extender el análisis para comparar la relación precio por masa de proteína de productos de preparación rápida, suponiendo que fuesen la única fuente de proteína de una persona durante un día. El resultado se encuentra en la Tabla 34.

Tabla 34. Comparación de precio para cumplir el requerimiento diario de proteína con distintos productos procesados.

Proteína	Producto	Proteína por 1 unidad de producto [g]	Unidades para cumplir con la MPD	Precio para consumir la MPD
Pollo	Nugget La Crianza	2,3	26	\$3.815
	Nugget Super Pollo	2,7	22	\$1.813
	Hamburguesa King	8,0	7	\$1.311
	Hamburguesa Super Pollo	16,7	4	\$790
	Salchicha San Jorge	6,7	9	\$1.064
	Vienesa Montina	6,1	10	\$1.445
	Vienesa Winter	6,0	10	\$1.288
Cerdo	Hamburguesa Lider	14,5	4	\$2.817
	Hamburguesa La Crianza	14,7	4	\$3.181
	Salchichas Sureñas Lider	7,1	8	\$955
	Salchichas Sureñas La Crianza	6,9	9	\$1.991
	Salchichas Sureñas Super Cerdo	7,1	8	\$1.166
Lenteja	Hamburguesa Rikü	10,1	6	\$6.305
	Hamburguesa lenteja Minuto Verde	7,7	8	\$7.669
	Hamburguesa LeBurger	9,4	6	\$7.830
Poroto	Hamburguesa Rikü	9,6	6	\$6.626
	Hamburguesa Minuto Verde	7,6	8	\$7.744
	Hamburguesa VegMonkey	7,5	8	\$7.001

El producto con mejor precio, que cumple el requerimiento de proteína, es la hamburguesa de pollo, no obstante, su valor (\$790) es mayor al promedio obtenido para las lentejas (\$562) y los porotos (\$704). Adicionalmente, se observa que en los demás productos el valor supera el doble del precio de las legumbres a granel, ya que se deben consumir un gran número de unidades de producto para alcanzar la demanda de proteína diaria. Por consiguiente, los productos de carne procesada en general son más económicos que la carne, pero no tienen menor valor que las legumbres.

Por otro lado, los productos menos económicos fueron las hamburguesas de legumbres, siendo su precio casi 10 veces mayor al de la legumbre que están hechos. Lo que se debe principalmente a que estos productos tienen una baja demanda y aún no se elaboran a gran escala.

Es importante advertir que la porción de vienesa (50 [g]) y hamburguesa (100 [g]) sugerida por comida es una unidad, ya que poseen un alto contenido de grasas saturadas y sodio. En el año 2015 la Organización Mundial de la Salud clasificó como cancerígenas a las carnes procesadas, después de concluir que el consumo diario de 50 [g] de este producto incrementa en un 18% el riesgo de desarrollar cáncer colorrectal [147].

En conclusión, las legumbres a granel tienen el menor costo de venta del mercado y, pese a que resulta más económico, desde el punto de vista nutricional no se recomienda reemplazar la porción de carne por una porción de subproducto de carne.

7.2 Costo energético

En esta sección se compara el precio que tiene el uso de distintas formas de cocer la proteína. Entonces, se necesita primero conocer la masa de combustible o consumo de energía del proceso necesario para cocinar la masa diaria recomendada. Los detalles del tiempo de cocción y energía de la cocina para cada proteína se encuentran en el capítulo de “Análisis de Datos” de la huella ecológica. En la Tabla 35, se muestra una síntesis del consumo tanto para la cocina a gas licuado de petróleo, como la eléctrica.

Tabla 35. Consumo de una cocina a gas y eléctrica para cada proteína.

Proteína	Consumo	
	Gas [kgGLP/MPD]	Electricidad [kWh/MPD]
Porotos	0,13	1,33
Lentejas	0,08	0,82
Pollo	0,07	0,22
Cerdo	0,06	0,55

Luego, se procede a buscar el precio de las energías mencionadas. El gas licuado de petróleo en venta en la comuna de Puente Alto tiene un valor promedio de 1.291 [\$/kgGLP] [148]. Por otro lado, en la misma comuna, la energía eléctrica es suministrada por la compañía “Empresa Eléctrica Puente Alto”; cuya tarifa en horario diurno es de 119 [\$/kWh]. Con estos precios, el costo de usar una cocina a gas o eléctrica se registra en la Tabla 36.

Tabla 36. Costo de utilizar una cocina a gas o una eléctrica al cocer cada proteína.

Proteína	Costo	
	Gas [\$/MPD]	Electricidad [\$/MPD]
Porotos	173	158
Lentejas	103	98
Pollo	98	26
Cerdo	73	65

De acuerdo a los resultados expuestos en la Tabla 36, la cocina eléctrica es una opción más económica que la cocina a gas licuado de petróleo. También, se observa que el poroto posee el mayor costo, explicado por su superior tiempo de cocción (que se refleja en su consumo de gas y electricidad Tabla 35) y porque su proporción de proteína por unidad de masa total es menor. El cerdo, pese a tener un mayor tiempo de cocción que el pollo, la unidad funcional lo favorece por su mayor porcentaje de proteína contenido.

7.3 Comparación de resultados

Al reunir los resultados obtenidos del costo de mercado y la cocción de las proteínas, se concluye que las lentejas representan la opción más económica para el consumidor, tanto con una cocina eléctrica o a gas, seguido del poroto, luego el pollo broiler y finalmente el cerdo. El precio total que debe pagar el consumidor por la proteína comprada en el punto de venta y su cocción se encuentra en la Tabla 37.

Tabla 37. Costo derivado de la compra y cocción de las proteínas estudiadas.

Proteína	Costo de mercado [\$/MPD]	Costo cocción [\$/MPD]		Costo total [\$/MPD]	
		Gas	Electricidad	Gas	Electricidad
Porotos	704	173	158	877	862
Lentejas	562	103	98	665	660
Pollo	1.528	31	26	1.559	1.554
Cerdo	2.325	73	65	2.398	2.390

Finalmente, comparando el costo total promedio entre carnes y legumbres, en la Tabla 38, se distingue que las carnes son en promedio 2,6 veces más costosas que las legumbres. Por consiguiente, al comprar una proteína vegetal, y usar una cocina a gas, el costo total resulta ser un 61% menor al de la proteína animal.

Tabla 38. Costo promedio de la proteína vegetal y animal.

Tipo de proteína	Proteína	Costo total [\$/MPD]	Costo promedio [m ² yr/MPD]
Vegetal	Porotos	877	771
	Lentejas	665	
Animal	Pollo	1.559	1.978
	Cerdo	2.398	

8. Evaluación general

Las legumbres alcanzaron los menores índices de Potencial de Calentamiento Global y de huella ecológica. Pese a que el sistema de producción es similar, en el Análisis de Ciclo de Vida el PCG del poroto superó al de la lenteja, como consecuencia del uso del fertilizante nitrogenado (urea) en el cultivo y por su mayor tiempo de cocción. Por el contrario, la lenteja obtuvo una superior huella ecológica, debido a su significativo uso de suelo por su bajo rendimiento de granos por hectárea. Se determinó que la etapa con mayor impacto en ambas leguminosas es la cocción, por lo que, como esta memoria está dirigida al consumidor, se recomienda reducir el tiempo de cocción remojando las legumbres por al menos diez horas, cocinándolas en una olla a presión o agregando bicarbonato.

En la evaluación del sistema de producción de legumbres de esta memoria no se incluye el transporte de agroquímicos y fertilizantes, ni el transporte de las máquinas agrícolas al sector de cultivo. Tampoco se consideró el cambio de uso de suelo, porque se supuso que la siembra se realizaba en un terreno que ya se encontraba cumpliendo esta función. Pese a esto, del estado del arte de estudios internacionales se infiere que las etapas no incorporadas tienen un bajo aporte en emisiones y en huella ambiental, ya que la etapa agrícola es la que abarca un mayor porcentaje de las emisiones totales y el uso de suelo para cultivos es responsable de más de un 50% de la huella total.

La carne de pollo tuvo valores intermedios tanto en la huella ecológica como en el ACV. En la huella ecológica destaca el aporte de la superficie dedicada al cultivo de alimentación para el animal; en el ACV sobresalen las emisiones provocadas por la etapa de crecimiento del ave (su calefacción, alimentación y las propias emisiones de la respiración y estiércol del pollo). En el sistema de producción de carne de pollo se encuentra pendiente incluir el impacto de cultivar e importar soya para agregarlo al alimento de las aves, las emisiones y huella de la planta de rendering y del transporte de lodos a la zona donde son compostados, posterior al tratamiento. Asimismo, se excluyó del análisis la elaboración, transporte y eliminación de químicos usados en el tratamiento de agua (por ejemplo, floculantes o coagulantes) y en la limpieza y mantenimiento de equipos en las plantas. No obstante, dado que la etapa que cuenta con el mayor porcentaje de emisiones y de huella ecológica, es decir, la etapa de crecimiento del animal, fue íntegramente representada, el resultado debe ser levemente superior al calculado [149][87].

A partir de los resultados obtenidos de la huella ecológica y del Análisis de Ciclo de Vida, el mayor impacto ambiental ocurre en la producción de la carne de cerdo, siendo las principales fuentes el cultivo de alimento, la respiración animal y el manejo de estiércol. Al igual que en el caso del pollo broiler, en esta memoria no se incluye el impacto ambiental del cultivo y transporte de soya (se supuso que el alimento consistía en una mezcla de maíz y harinilla de trigo). También se omitió en este estudio la huella y las emisiones del transporte de lodos al lugar de compostaje y de los productos químicos utilizados en el tratamiento de agua, mantenimiento y limpieza de equipos industriales. Dadas las etapas pendientes, se cree que los valores calculados son ligeramente menores al valor real, pero esto implicaría que el impacto ambiental es aún mayor al estimado, por lo tanto el resultado se sostiene: el mejor

desempeño ambiental de las legumbres las posiciona como un adecuado reemplazo de la carne.

Las etapas más relevantes en los análisis de las cuatro proteínas fueron la etapa de producción (que incluye la actividad de cultivo en el caso de las legumbres y crecimiento animal en el caso de las carnes) y la etapa de cocción. Es por ello que se reitera la importancia de ampliar el ciclo de vida hasta el consumo del producto estudiado, dado que en general los análisis ambientales en alimentos no extienden los límites hasta la cocción de estos.

Al comparar dos tipos de cocina, la cocina eléctrica resultó ser la que posee mayor huella ecológica y PCG en todas las proteínas estudiadas, sin excepción. En el Gráfico 17 a) y b) se observan los resultados del análisis ambiental, comparando el desempeño de cada cocina.

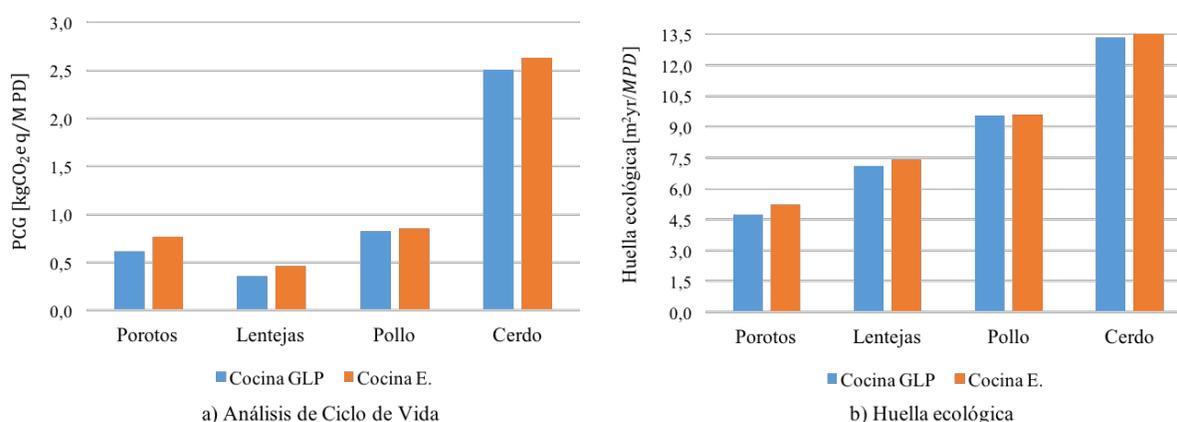


Gráfico 17. Análisis ambiental de cada proteína usando una cocina GLP o eléctrica.

Por otro lado, del estudio económico de la decisión de compra se extrae que las legumbres son la proteína con el menor precio de mercado. En cuanto al costo energético que implica la preparación de las proteínas estudiadas, las carnes presentaron valores más económicos que las legumbres, debido principalmente a su menor tiempo de cocción y a su mayor contenido proteico. La cocina eléctrica tuvo un precio más bajo que la cocina a gas en todas las proteínas, como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39. Precio de mercado promedio y costo de cocer la proteína en una cocina GLP o eléctrica.

Proteína	Precio mercado [\$/MPD]	Costo cocción [\$/MPD]	
		Cocina GLP	Cocina Eléctrica
Porotos	704	173	158
Lentejas	562	103	98
Pollo	1.528	31	26
Cerdo	2.325	73	65

En la obtención de resultados se seleccionaron datos de fuentes estatales y privadas fidedignas, pero no actualizadas, por lo que convendría repetir este análisis ambiental en el futuro cuando se cuente, por ejemplo, con la recopilación de datos del nuevo Censo Agropecuario o con alguna Evaluación de Impacto Ambiental realizada recientemente. Esta

nueva información impactaría principalmente en la fabricación y uso de los fertilizantes, pesticidas, insecticidas y herbicidas de los cultivos de legumbres y en la fabricación de alimento, consumo de energía eléctrica o dimensiones de plantas para los animales.

De los tres análisis realizados, se deduce que al reemplazar la ingesta de proteína animal por una vegetal, usando una cocina a gas, se contribuye a disminuir las emisiones GEI en un 71%, la huella ecológica en un 48% y el gasto diario en un 61%. Si se utiliza una cocina eléctrica, la reducción es de un 65% en el caso del PCG, un 45% en la huella ecológica y en un 61% el gasto diario. Esta disminución se puede potenciar usando una cocina a gas y acortando el tiempo de cocción con ollas de eficiencia energética, como una olla a presión. En la Tabla 40 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en el desarrollo de esta memoria.

Tabla 40. Comparación del análisis ambiental y económico de los 4 sistemas estudiados, usando dos tipos de cocinas: cocina GLP y cocina eléctrica.

Proteína	Análisis de Ciclo de Vida [kgCO ₂ eq/MPD]		Huella ecológica [m ² yr/MPD]		Costo total compra y cocción [\$/MPD]	
	Cocina GLP	Cocina E.	Cocina GLP	Cocina E.	Cocina GLP	Cocina E.
Porotos	0,62	0,77	4,7	5,2	877	862
Lentejas	0,36	0,46	7,1	7,4	665	660
Pollo	0,83	0,85	9,5	9,6	1.559	1.554
Cerdo	2,50	2,63	13,3	13,5	2.398	2.390

9. Conclusiones

Estudios internacionales afirman que debido a la crisis climática, que será agudizada por el crecimiento demográfico futuro, el patrón de consumo de alimentos actual es insostenible en el futuro. En este contexto, se decide hacer un estudio sobre la comparación del impacto ambiental de cuatro productos distintos, con contenido equivalente de proteína, usando datos nacionales. El estudio consistió en un Análisis de Ciclo de Vida, que cuantifica mediante el indicador Potencial de Calentamiento Global, el impacto ambiental de producir la masa de proteína diaria recomendada, de cuatro fuentes: poroto, lenteja, pollo y cerdo. Adicionalmente, se calculó la huella ecológica de la elaboración de cada fuente de proteína, con el objetivo de complementar el resultado de emisiones de carbono equivalente con uno que incluya el uso de suelo; y por último, se evaluó el costo que implicaría un posible reemplazo de una proteína por otra.

En el sistema de producción de legumbres a estudiar se incluyó desde la etapa de preparación del suelo para el cultivo de la semilla, hasta que el producto es cocinado. Dentro de los límites se incluye la fabricación y uso de los fertilizantes y agroquímicos, emisiones de la generación de energía eléctrica y el transporte del producto al lugar de venta. En el sistema de producción de carne se abarcó desde el primer día de vida del animal hasta la cocción de su carne. Algunas actividades que integran el sistema son el crecimiento del animal, la fabricación de su alimento, plantas de tratamiento de su estiércol, generación de energía eléctrica, transporte refrigerado del producto terminado y su posterior almacenamiento en una unidad de frío. En ambas fuentes de proteína se consideraron dos tipos de cocina en la última etapa: una eléctrica y otra con gas licuado de petróleo. Los límites y la unidad funcional (masa de proteína diaria) son iguales en el ACV y la huella ecológica.

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida en orden decreciente de PCG fueron: la carne de cerdo con 2,5 [$kgCO_2eq/MPD$], la carne de pollo broiler con 0,8 [$kgCO_2eq/MPD$], el poroto con 0,6 [$kgCO_2eq/MPD$] y por último la lenteja con 0,3 [$kgCO_2eq/MPD$]. En las carnes la mayor contribución al PCG la realizó la emisión de la respiración y el tratamiento de estiércol. Mientras que en las legumbres fue la cocción del alimento. El uso de cocina eléctrica arrojó valores de carbono equivalente mayores a los reportados al cocinar con GLP.

Los resultados de la huella ecológica de las proteínas en orden decreciente es: primero la carne de cerdo con 13 [m^2yr/MPD], luego la carne de pollo broiler con 9,5 [m^2yr/MPD], la lenteja con 7,1 [m^2yr/MPD] y en último lugar el poroto con 4,7 [m^2yr/MPD]. En el cerdo y el pollo se observó que el mayor aporte a la huella se debe al cultivo de alimento para consumo animal. En el caso de las legumbres también la principal contribución fue el uso de suelo para cultivo, se enfatiza en que conseguir mejores rendimientos de cultivo podría reducir en un 50% la huella ecológica de estos. La huella ecológica de utilizar una cocina a gas resultó menor a la calculada con una cocina eléctrica.

Se destaca del estudio lo relevante que es incluir la cocción de las proteínas en análisis ambientales de alimentos, ya que en el ACV fue la principal fuente de emisiones en el caso de las legumbres y en la huella ecológica fue la segunda etapa con mayor aporte en todas las

proteínas. Por esta razón, además, se recomienda disminuir el tiempo de cocción remojando las legumbres por al menos diez horas, y cocinar las proteínas en una olla a presión.

En cuanto al análisis económico, se estudiaron precios de mercado de cada proteína. En orden decreciente de precio promedio se obtuvo: la carne de cerdo (\$2.325), la carne de pollo broiler (\$1.528), el poroto (\$704) y por último, la menos costosa, la lenteja (\$562). Adicionalmente, se calculó el costo de utilizar una cocina a gas o una eléctrica al cocer cada proteína. De acuerdo a los resultados, usar una cocina eléctrica es una opción más económica que emplear una cocina a gas licuado de petróleo.

En función de los resultados de los tres análisis y sus comparaciones, se concluye que reemplazar la proteína de origen animal por una de origen vegetal sí contribuye a reducir las emisiones GEI, la huella ecológica y el gasto diario derivado de la alimentación de una persona. Específicamente, al preferir una proteína vegetal, el PCG total es un 71% menor, la huella ecológica es un 48% menor y el costo es un 61% menor que el obtenido con una proteína animal usando una cocina con GLP. Por otro lado, el uso de una cocina a gas tiene una menor huella ecológica y PCG, pero significa un costo ligeramente superior.

Como proyección, se sugiere complementar los resultados obtenidos en esta memoria calculando la huella de agua de los sistemas de producción de proteína propuestos, y también promover la creación de nuevas fuentes de información a nivel nacional para repetir estos análisis ambientales y realizar otros, de manera que se pueda evaluar la proyección del impacto de los sistemas de alimentación nacionales; así los consumidores podrían tomar su decisión de compra informada y responsablemente.

Bibliografía

- [1] E. Stehfest, L. Bouwman, D. P. Van Vuuren, M. G. J. Den Elzen, B. Eickhout, y P. Kabat, “Climate benefits of changing diet”, *Clim. Change*, vol. 95, n° 1–2, pp. 83–102, 2009.
- [2] A. Carlsson-kanyama, “Food Consumption Patterns and Their Influence on Climate Change”, *Springer R. Swedish Acad. Sci.*, vol. 27, n° 7, pp. 528–534, 2015.
- [3] A. Carlsson-kanyama y A. González, “Potential contributions of food consumption patterns to climate change”, *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 89, pp. 1704–1709, 2015.
- [4] U. C. Dirección de Estudios Sociales (DESUC). Instituto de Sociología, “Informe Final ‘ENCUESTA NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE 2018’ LICITACIÓN N° 608897-110-LE17”, 2018.
- [5] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, “Consumo aparente de principales alimentos en Chile”, Chile, 2012.
- [6] A. L. Pino, G. Cediel, y S. B. Hirsch, “Ingesta De Alimentos De Origen Animal Versus Origen Vegetal Y Riesgo Cardiovascular”, *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 36, pp. 210–216, 2009.
- [7] A. Chao *et al.*, “Meat Consumption and Risk of Colorectal Cancer”, *J. Am. Med. Assoc.*, vol. 293, n° 2, 2005.
- [8] E. Stehfest, M. van den Berg, G. Woltjer, S. Msangi, y H. Westhoek, “Options to reduce the environmental effects of livestock production - Comparison of two economic models”, *Agric. Syst.*, vol. 114, pp. 38–53, 2013.
- [9] G. Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, “Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities”, Roma, 2013.
- [10] S. Subak, “Global environmental costs of beef production”, *Ecol. Econ.*, vol. 30, n° 1, pp. 79–91, 1999.
- [11] M. Alés Reina, M. Matos Romero, J. M. Ania Palacios, F. Millán Bravo, R. Azañón Hernandez, y E. Montero Romero, *ATS/DI Atención Especializada Del Instituto Catalán de la Salud*, Segunda ed. España, 2002.
- [12] D. Whitford, *Proteins: Structure and Function*. London, 2013.
- [13] Anthony Albanese, *Protein and Amino acid nutrition*. London: Elsevier, 1959.
- [14] F. Lappe, *Diet for a Small Planet, 10th anniversary edition.*, 10ª ed. New York: Ballantine Books, 1982.
- [15] W. J. Craig y A. R. Mangels, “Position of the American Dietetic Association: vegetarian diets.”, *J. Am. Diet. Assoc.*, vol. 109, n° 7, pp. 1266–1282, 2009.
- [16] R. Young y P. L. Pellett, “Plant proteins in relation to human and amino acid nutrition”, *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 59, n° January, 1994.
- [17] M. F. Fuller y P. J. Reeds, “Nitrogen cycling in the gut”, *Annu Rev Nutr.*, vol. 18, pp. 385–411, 1998.
- [18] M. C. Latham, “Nutrición humana en el mundo en desarrollo”, *Colección FAO*, vol. 29, pp. 99–204, 2002.
- [19] WHO, FAO, y United Nations University, “Protein and amino acid requirements in human nutrition”, p. 265, 2007.
- [20] FoodData Central, “Beans, white, mature seeds, cooked, boiled, with salt”, *U.S. Department of Agriculture*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://fdc>.

- nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/175249/nutrients. [Accedido: 05-mar-2020].
- [21] FoodData Central, “Lentils, mature seeds, cooked, boiled, with salt”, *U.S. Department of Agriculture*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/175254/nutrients>. [Accedido: 05-mar-2020].
- [22] FoodData Central, “Chicken, breast, fried, no coating, skin eaten, made with oil”, *U.S. Department of Agriculture*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/337119/nutrients>. [Accedido: 05-mar-2020].
- [23] FoodData Central, “Pork, fresh, loin, top loin (roasts), boneless, separable lean and fat, cooked, roasted”, *U.S. Department of Agriculture*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/167842/nutrients>. [Accedido: 05-mar-2020].
- [24] Instituto Nacional de Estadísticas, “Siembra y cosecha cultivos anuales 2017”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/cosecha>. [Accedido: 08-feb-2020].
- [25] S. Banfi, “Cultivo de porotos en perspectiva”, *Of. Estud. y Políticas Agrar.*, pp. 1–6, 2013.
- [26] A. Pinheiro, C. Ivanovic, y L. Rodríguez, “Consumo de legumbres en Chile. Perspectivas y desafíos”, *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 45, pp. 14–20, 2018.
- [27] H. . Guglielmetti *et al.*, “Cultivo del poroto en la zona del centro sur”, *Inst. Investig. Agropecu.*, vol. 9, pp. 1–9, 1977.
- [28] C. Baginsky G y L. Ramos C., “Situación de las legumbres en Chile: Una mirada agronómica”, *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 45, pp. 21–31, 2018.
- [29] Fundación para la Innovación Agraria, *Serie Estudios Para La Innovación FIA. Oportunidades para el Desarrollo Competitivo de las Leguminosas de Grano Seco en Chile*, Primera ed. 2017.
- [30] H. Rodríguez, “Agricultores de La Ligua conocieron en Chillán nueva variedad de poroto tórtola ‘Zorzal-INIA’”, *INIA Quilamapu Noticias*, 25-ene-2018.
- [31] K. Tay Neves, “Situación Leguminosas de Grano en la Región de Ñuble”, *INIA Quilamapu*. Programa de Leguminosas de Grano, p. 44, 2019.
- [32] J. T. Urbina y A. V. Solar, “Producción Moderna y Competitiva de Poroto”, *Inf. 118 INIA-Quilamapu*, pp. 1–4, 2012.
- [33] M. Fernández del P., “Fertilización del poroto”, *Informativo 19 INIA-La Platina*. Santiago, Chile, pp. 35–36, 1983.
- [34] J. González Urbina, “Producción de poroto y garbanzo en el secano costero del Valle del Mataquito”, *Boletín INIA N°349*, pp. 43–54, 2017.
- [35] ODEPA, “Ficha técnico-económica”. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile, Región O’Higgins, pp. 1–2, 2012.
- [36] M. A. Bello U. y M. T. Pino Q., “Preparación de Suelos”, *Boletín INIA N°18*. Centro Regional de Investigación Kampenaike, Punta Arenas, Chile, p. 18, 2000.
- [37] F. Manqui G., M. Allende C., y A. Villablanca F., “Preparación de Suelos”, *Informativo 61 INIA-Ururi*. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile, pp. 1–4, 2012.
- [38] J. Hirzel Campos y F. Salazar Sperberg, “Guía de manejo y buenas prácticas de aplicación de enmiendas orgánicas en agricultura”, *Boletín INIA N°325*, p. 58, 2016.
- [39] Servicio Agrícola y Ganadero, “Cadilac 80 WP”. p. 2, 2017.
- [40] P. Sepúlveda R., “Enfermedades de Frejol”, *Ficha técnica N°20 INIA*. p. 39, 2016.

- [41] N. Espinoza *et al.*, “Producción de Lenteja”, Telstar Im., vol. 144, E. Peñaloza y E. Kehr, Eds. Temuco, Chile, 1991, p. 74.
- [42] J. Tay U., A. France I., y M. Paredes C., “SUPER ARAUCANA-INIA: UNA NUEVA VARIEDAD DE LENTEJA (*Lens culinaris* Med.) CHILENA DE GRANO GRANDE”, *Agric. Técnica*, vol. 61, n° 3, pp. 385–389, jul. 2001.
- [43] E. Acevedo y P. Silva, *Agronomía de la Cero Labranza*, Serie Cien. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, 2003.
- [44] S. Yoshikawa, J. Riquelme, N. Rodríguez, y C. Ruíz, “Cero labranza en el secano interior de Chile, su desarrollo y temas pendientes”. pp. 217–228, 2004.
- [45] I. Martínez, “Tecnología de la cero labranza en el secano interior de Chile”. Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados, INIA, p. 4, 2015.
- [46] C. Céspedes L., “Centro de Transferencia y Extensión Arauco Sustentable: Contexto y alternativas agropecuarias para la Provincia de Arauco”, *Boletín INIA N°347*, n° Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chillán, Chile, p. 150, 2017.
- [47] K. Tay N., “Producción de lenteja en la provincia de Arauco”, *Informativo 127 INIA-Quilamapu*. Chillán, Chile, p. 2, 2015.
- [48] M. H. O. Rashid, J. Gonzalez, J. P. W. Young, y M. Wink, “*Rhizobium leguminosarum* is the symbiont of lentils in the Middle East and Europe but not in Bangladesh”, *FEMS Microbiol. Ecol.*, vol. 87, n° 1, pp. 64–77, 2014.
- [49] J. Tay y F. Fernández, “Leguminosas de Grano”, en *Producción Moderna de Cultivos y Praderas en el Secano Interior*, Chillán, Chile: INIA Quilamapu, 2003, pp. 53–70.
- [50] N. Espinoza, “Control de malezas en lenteja y arveja para grano seco y verde”. INIA Carillanca, pp. 89–103.
- [51] J. Tay Urbina, J. González Urbina, C. Ruíz Sánchez, y A. Valenzuela Solar, “Producción Moderna y Competitiva de Lenteja”, *Inf. 119 INIA-Quilamapu*, pp. 1–4, 2012.
- [52] P. Sepúlveda R. y M. Alvarez A., “Roya y antracnosis: enfermedades de la lenteja”, *Inf. 13 INIA-La Platina*, pp. 9–10, 1982.
- [53] J. Tay U., “Leguminosas de invierno”, *Informativo 115 INIA-Quilamapu*. p. 2, 2012.
- [54] Instituto Nacional de Estadísticas, “Ferias y mataderos de ganado y aves”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/mataderos-de-ganado>. [Accedido: 06-feb-2020].
- [55] Comisión Regional del Medio Ambiente de la VI Región del General Libertador Bernardo O’Higgins, “Califica Ambientalmente Proyecto ‘Sector de Crianza de Pollos Broiler, Las Correhuelas’”, Rancagua, 2004.
- [56] Servicio Agrícola y Ganadero, “Establecimientos faenadores para consumo nacional y exportación”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/establecimientos-faenadores-para-consumo-nacional>. [Accedido: 31-ene-2020].
- [57] ChileCarne A. G., “Reporte 2018”, Chile, 2018.
- [58] L. R. U, J. P. G, y E. R. C., “Manual de manejo del pollo granja”, Fundación para la Innovación Agraria. Ministerio de Agricultura. Chile, 1998.
- [59] J. M. Lozano Díaz, “Producción De Broilers De Pesos Elevados (I)”, n° I, pp. 7–13, 2008.
- [60] L. A. Pinacho Utrilla, “Rendimiento en canal, cortes primarios, secundarios y menudencias en pollos de engorda alimentados con zeolita tipo clinoptilolita”, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 2013.

- [61] Comisión Regional del Medio Ambiente de la VI Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, "Califica Ambientalmente el proyecto 'Actualización y Desarrollo Planta Faenadora de Aves Lo Miranda'", 2018.
- [62] D. Acuña y M. J. Pizarro, "La industria porcina en Chile: Oportunidades y desafíos para su sustentabilidad", 2019.
- [63] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026", p. 154, 2017.
- [64] MAPS Chile. Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile, "MAPS Chile: Resultados de Fase 2", 2014.
- [65] F. Farías *et al.*, "Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático", en *Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile*, vol. 1, 2016, p. 505.
- [66] Humphreys, "Agrosuper S.A. Reseña Anual y Cambio de Tendencia de Clasificación", 2013.
- [67] E. J. Ramírez Moore, "Evaluación de un sistema intensivo de producción de cerdos en la localidad de Río Bueno, Región de Los Ríos.", Universidad Austral de Chile, 2017.
- [68] G. Casas A., G. Afanador, y D. Rodríguez, "Componentes anatómicos y coeficientes alométricos en cerdos machos castrados desde el nacimiento", *Rev. Colomb. Ciencias Pecu.*, vol. 22, n° 2, 2009.
- [69] Servicio de Evaluación Ambiental, "Ficha del Proyecto: Modificación Proyecto Agroindustrial del Valle del Huasco", 2015. [En línea]. Disponible en: https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=1865594. [Accedido: 12-nov-2018].
- [70] Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana, "Califica Ambientalmente el proyecto 'Modificación Matadero Linderos'", Santiago, Chile, 2014.
- [71] M. A. Curran, "Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability", *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 2, n° 3, pp. 273–277, 2013.
- [72] G. Rebitzer *et al.*, "Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications", *Environ. Int.*, vol. 30, n° 5, pp. 701–720, 2004.
- [73] E. H. Leiva, "Análisis de Ciclo de Vida. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental", Escuela de Organización Industrial, 2016.
- [74] OpenDAP, "Enfoque de ciclo de vida", 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.opendap.es/acvnormativa>. [Accedido: 01-ene-2019].
- [75] Global Footprint Network, "FAQ", 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.footprintnetwork.org/faq/>. [Accedido: 02-mar-2020].
- [76] M. A. J. Huijbregts, S. Hellweg, R. Frischknecht, K. Hungerbühler, y A. J. Hendriks, "Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products", *Ecol. Econ.*, vol. 64, n° 4, pp. 798–807, 2008.
- [77] Global Footprint Network, "Ecological Footprint", 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>. [Accedido: 30-mar-2019].
- [78] J. Li, X. Zhang, X. Chang, y W. Gao, "Revising yield and equivalence factors of ecological footprints based on land-use conversion", *Sustain.*, vol. 10, n° 11, pp. 1–17, 2018.
- [79] Mary Ann Curran, "A Brief History of Life-Cycle Assessment", *Sci. Appl. Int. Corp.*,

- p. 3, 2006.
- [80] H. M. Z. Bjørn A., Owsianiak M., Molin C., “Life Cycle Assessment History”, *Archit. Des.*, vol. 87, n° 3, pp. 96–103, 2017.
 - [81] A. K. Cerutti *et al.*, “Life cycle assessment application in the fruit sector: State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products”, *J. Clean. Prod.*, vol. 73, pp. 125–135, 2014.
 - [82] D. Nijdam, T. Rood, y H. Westhoek, “The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes”, *Food Policy*, vol. 37, n° 6, pp. 760–770, 2012.
 - [83] M. de Vries y I. J. M. de Boer, “Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments”, *Livest. Sci.*, vol. 128, n° 1–3, pp. 1–11, 2010.
 - [84] G. A. McAuliffe, D. V. Chapman, y C. L. Sage, “A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production”, *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 56, pp. 12–22, 2016.
 - [85] P. Roy *et al.*, “A review of life cycle assessment (LCA) on some food products”, *J. Food Eng.*, vol. 90, n° 1, pp. 1–10, 2009.
 - [86] S. Clune, E. Crossin, y K. Verghese, “Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories”, *J. Clean. Prod.*, 2016.
 - [87] H. Ritchie, “Environmental impacts of food production”, *Our World in Data*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>. [Accedido: 14-abr-2020].
 - [88] T. I. Rodríguez Opazo, “Análisis de Ciclo de Vida en producción porcina, Proyecto agroindustrial del Valle de Huasco, AGROSUPER”, Universidad Técnica Federico Santa María, 2013.
 - [89] K. G. Díaz Zamorano, “Selección de medidas para mejorar sustentabilidad ambiental en hidropónicos La Cruz utilizando Análisis de Ciclo de Vida”, Universidad de Chile, 2014.
 - [90] M. J. P. Allendes, “Análisis de impacto ambiental y opciones de mitigación para la industria vitivinícola, mediante un análisis de ciclo de vida”, Universidad de Chile, 2016.
 - [91] G. Romero, “Análisis Del Impacto Ambiental De La Dieta Promedio Chilena, Optimización a Través De Optimeal Y Propuesta De Políticas Públicas Para Su Reducción.”, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.
 - [92] Kerry, “Etiqueta Limpia y el Consumidor: Productos Cárnicos”, *Kerry Propr. Consum. Res.*, p. 12, 2019.
 - [93] A. Biggs, S. Briceño, y R. Pizarro, “Plan de Acción Nacional de Consumo y Producción Sustentable 2017 - 2022”, Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile, 2017.
 - [94] Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile, “Programa Nacional de Consumo y Producción Sustentables”, p. 65, 2016.
 - [95] Corporación de Desarrollo Tecnológico In-Data, *Informe Final Uso de la Energía de los Hogares Chile 2018*. Ministerio de Energía. Gobierno de Chile, 2019.
 - [96] M. Apablaza, “Generación silenciosa. Una mirada a las personas mayores en Chile”, CIPEM. Universidad del Desarrollo. Caja Los Héroes, 2019.
 - [97] C. Celis Morales *et al.*, “Aumento del índice de masa corporal durante las últimas cuatro décadas en la población chilena: De la desnutrición a la obesidad”, *Rev. Med.*

- Chil.*, vol. 145, n° 10, pp. 1363–1364, 2017.
- [98] Ministerio del Medio Ambiente y R. Martínez, *Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2016*. Santiago, Chile: Área de Mitigación e Inventarios de contaminantes climáticos, 2018.
- [99] Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, “Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing”, en *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, United Kingdom and New York, 2013, pp. 659–740.
- [100] K. Rypdal, K. Flugsrud, y W. Irving, “Elección De La Metodología Y Realización De Nuevos Cálculos”, en *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, B. Nyenzi, Ed. p. 7.1-7.28.
- [101] P. Artaxo *et al.*, “Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing”, en *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Ed. United Kingdom y New York, 2007, p. 106.
- [102] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Estimating Greenhouse Gas Emissions in Agriculture: A manual to Address Data Requirements for Developing Countries*. Roma, 2015.
- [103] W. Kean Fong, M. Sotos, M. Doust, S. Schultz, A. Marques, y C. Deng-Beck, *Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria*. World Resources Institute e International Council for Local Environmental Initiatives, 2014.
- [104] World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute, “The Greenhouse Gas Protocol”. USA, p. 116, 2012.
- [105] World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute, *GHG Protocol Agricultural Guidance: Interpreting the Corporate Accounting and Reporting Standard for the agricultural sector*. 2014.
- [106] Ministerio de Energía, “Indicadores Ambientales - Factor de emisiones GEI del Sistema Eléctrico Nacional”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.energia.gob.cl/indicadores-ambientales-factor-de-emisiones-gei-del-sistema-electrico-nacional>. [Accedido: 18-jun-2020].
- [107] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Volume 2: Energy”, en *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, y K. Tanabe, Eds. Japón: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [108] E. J. Hetz y A. I. Barrios, “Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile”, *Agro Sur*, vol. 25, n° 2, pp. 146–161, 1997.
- [109] A. G. Williams, E. Audsley, K. Stecey, y D. J. Parsons, “Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use”. Cranfield University, p. 20, 2009.
- [110] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use”, en *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, y K. Tanabe, Eds. Japón: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [111] R. Ruiz, “Características De Algunos Fertilizantes Nitrogenados Para Uso En Goteo”, *Ser. INIA La Platina N°82*, p. 2, 1999.

- [112] M. Á. Hernández Tobar, “Potencial de calentamiento global de los sistemas agrícolas cero labranza y convencional en una localidad regada de la zona central de Chile”, Universidad de Chile, 2017.
- [113] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, *Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Large Volume Inorganic Chemicals, Ammonia, Acids and Fertilisers Industries*. España: Joint Research Centre, 2007.
- [114] J. Espinoza Oyarzún, “La urea y su comercialización en Chile”, n° 56 2. Oficina De Estudios y Políticas Agrarias, p. 11, 2012.
- [115] A. Vinaderos, “Informe ISGEA. Alubia blanca de riñón”, Castilla y León, 2011.
- [116] Servicio de Evaluación Ambiental. Gobierno de Chile, *Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos del plantales y establos de crianza, engorda, postura o reproducción de animales avícolas*. Designio, 2017.
- [117] J. Broucek y B. Cermák, “Emission of harmful gases from poultry farms and possibilities of their reduction”, *Ekológia (Bratislava)*, vol. 34, pp. 89–100, 2015.
- [118] S. Y. Wang y D. J. Huang, “Assessment of greenhouse gas emissions from poultry enteric fermentation”, *Asian-Australasian J. Anim. Sci.*, vol. 18, n° 6, pp. 873–878, 2005.
- [119] C. M. Williams, “Poultry waste management in developing countries”, vol. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 1–2, 2013.
- [120] Instituto Mexicano del Petróleo, “Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México”, Coyoacán, México, 2014.
- [121] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Volume 5: Waste”, en *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, y K. Tanabe, Eds. Japón: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [122] Comisión Regional del Medio Ambiente de la III Región de Atacama, “Revisión de la Resolución de Calificación Ambiental del Proyecto ‘Agroindustrial del Valle del Huasco’ del Titular Agrocomercial AS Ltda”, 2012.
- [123] J. C. Valencia B, “Boletín Veterinario Oficial. Inicio del Proyecto Agroindustrial Valle del Huasco, Región de Atacama”, vol. N°14, pp. 1–8, 2011.
- [124] F. X. Philippe y B. Nicks, “Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure”, *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 199, pp. 10–25, 2015.
- [125] A. Matthei, “Las claves para maximizar el ahorro de combustible en un tractor”, *El Mercurio*, 12-nov-2014.
- [126] Oficina Catalana del Canvi Climàtic, “Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)”, 2013.
- [127] INIA, “Comportamiento económico de cultivos anuales en el centro sur de Chile”, *Boletín INIA N°358*, p. 134, 2018.
- [128] Instituto de Investigaciones Agropecuarias y R. López Olivari, “Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile”, *Boletín INIA N°340*, p. 157, 2016.
- [129] Instituto Nacional de Estadísticas, “VIII Censo Agropecuario y Forestal”. Chile, 2007.
- [130] Servicio Agrícola y Ganadero, “Insecticida Lorsban 4E”. p. 2, 2018.
- [131] ODEPA, “Ficha técnico-económica poroto guarda (seco)”. Región O’Higgins, pp. 1–2, 2012.

- [132] Gasco Educa, “Usos del Gas”. [En línea]. Disponible en: http://www.gascoeduca.cl/Maqueta/aplicaciones_03.html. [Accedido: 21-mar-2020].
- [133] P. J. Martínez, “Establecimiento de una planta empacadora de frijol en la empresa Asociativa de Campesinos de Producción ‘El Plan’ Morocelí, departamento de El Paraíso, Honduras”, Universidad Zamorano, 1998.
- [134] ADAMA Chile, “Ficha Técnica Herbicidas. Triflurex 48 EC”. p. 3, 2014.
- [135] J. Tay U., A. Pedreros L., y A. France L., “Sistemas de producción de leguminosas de invierno”, *Tierra Adentro*, Regiones del Maule y Bío Bío, pp. 40–43, 2003.
- [136] Servicio Agrícola y Ganadero, “Benomyl 50% WP”. pp. 2–4, 2017.
- [137] Servicio Agrícola y Ganadero, “Manzate 200”. p. 1, 2016.
- [138] Servicio Agrícola y Ganadero, “Simazina 50 SC”. p. 1, 2019.
- [139] Servicio Agrícola y Ganadero, “Zero 5 EC”. p. 2, 2017.
- [140] D. S. Teitel, M. A. Levi, V. Chao, M. Barrak, E. Barlev, “Ventilation in Poultry Production”. Alberta Government, p. 4, 2012.
- [141] Servicio de Evaluación Ambiental. Gobierno de Chile, “Informe Consolidado de la Evaluación de Impacto Ambiental de la Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto ‘Sistema de Tratamiento de RILES de Planta Faenadora Agroindustrial Arica Limitada’”. 2008.
- [142] Comercial Franklin, “Congelador 412 litros Maigas”. Santiago, Chile, 2019.
- [143] Gestión Ambiental Consultores. Estudio de Impacto Ambiental. Proyecto Agroindustrial del Valle del Huasco, “Capítulo 3: Descripción del Proyecto”. p. 137, 2006.
- [144] E. Calvo Buendía, K. Tanabe, A. Kranjc, B. Jamsranjav, M. Fukuda, y S. Ngarize, *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [145] Comisión Nacional de Energía, “Anuario Estadístico de Energía 2017”. Gobierno de Chile, p. 164, 2017.
- [146] ODEPA, “Percepción de los consumidores sobre productos hortofrutícolas, lácteos, carnes y pan”, p. 49, 2009.
- [147] World Health Organization, “IARC Monographs evaluate consumption of red meat and processed meat and cancer risk”, *Int. Agency Res. Cancer*, n° October, pp. 1–2, 2015.
- [148] Gobierno de Chile. Chile Atiende, “Precios de Cilindros de Gas Licuado de Petróleo en línea”, 2020. [En línea]. Disponible en: http://www.gasenlinea.gob.cl/index.php/web/buscador?rere_id=0. [Accedido: 03-ago-2020].
- [149] H. Ritchie y M. Roser, “Meat and Dairy Production”, *Our World in Data*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/meat-production>. [Accedido: 13-dic-2018].
- [150] Generadoras de Chile, “Marzo 2019”, *Boletín del Merc. Eléctrico Sect. Generación*, p. 26, 2019.
- [151] Comisión Nacional de Energía, “Estadísticas Electricidad”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>. [Accedido: 11-feb-2020].
- [152] K. Funk, J. Milford, y T. Simpkins, “Waste Not, Want Not: Analyzing the Economic and Environmental Viability of Waste-to-Energy (WTE) Technology for Site-Specific Optimization of Renewable Energy Options”, *Jt. Inst. Strateg. Energy Anal.*, n° February 2013, 2013.

- [153] A. Eberle, G. A. Heath, S. Nicholson, y A. Carpenter, “Systematic Review of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Electricity”, *Natl. Renew. Energy Lab.*, n° September, pp. 1–53, 2017.
- [154] NREL, “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics”, Colorado, Estados Unidos, 2012.
- [155] Departamento de Control de la Contaminación de CONAMA, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile, 2009.
- [156] Asociación Española de Codificación Comercial, “Recomendaciones AECOC para la Logística. Guía de cálculo de la huella de carbono del transporte de mercancías por carretera”. p. 78, 2017.
- [157] ARISTO Consultores, “Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector transporte de carga”. Ministerio de Energía. Gobierno de Chile, p. 394, 2013.
- [158] L. Iannelli, R. Prieto, y S. Gil, “Los vehículos híbridos a gas (GNC)”, *Petrotecnia*, Revista del Instituto Argentino del Petróleo y el Gas, pp. 86–95, jun-2018.
- [159] G. Morales Varas, *En el camino: Los conductores de camiones de carga y sus condiciones laborales*, n° 2. Chile: Dirección del Trabajo, Gobierno de Chile, 2011.
- [160] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Ministerio de Obras Públicas, “Ley Chile”, 2003. [En línea]. Disponible en: https://www.leychile.cl/Consulta/m/norma_plana?org=&idNorma=206382. [Accedido: 08-may-2020].

Anexos

Anexo A: Intensidad ponderada de emisión de CO₂ por consumo energético

Los datos para obtener este factor, necesario para calcular la huella ecológica relacionada con el uso energético, se adquirieron a partir de información bibliográfica sobre las tecnologías que componen la matriz energética de Chile, hasta febrero de 2019 [150][151], y sus respectivas emisiones GEI, expresadas en $\left[\frac{kg\ CO_2eq}{MJ}\right]$ [152][153][154].

Se consideró que el Sistema Eléctrico Nacional se compone únicamente de las tecnologías de la Tabla A.1, y que se posee una potencia de instalada de generación de 24.683,9 [MW]. Del total, se calculó el porcentaje de la capacidad de cada tecnología y se multiplicó por su emisión GEI correspondiente. Así, sumando el producto anterior, el factor de intensidad ponderada de emisión de CO₂ por consumo energético (I_{CO_2}) es 0,12 $\left[\frac{kg\ CO_2eq}{MJ}\right]$.

Tabla A.1. Tecnologías que forman la matriz energética nacional y sus respectivas emisiones.

	Tecnología	Capacidad instalada [MW]	Capacidad ponderada	Emisiones [kg CO ₂ eq/MJ]	Emisión ponderada [kg CO ₂ eq/MJ]
Energías Renovables	Geotérmica	44,9	0,2%	0,013	0,00002
	Eólica	1741	7%	0,003	0,00022
	Hidro de embalse	3.383	14%	0,003	0,00046
	Hidro de pasada	3.364	14%	0,003	0,00045
	Solar	2.459	10%	0,011	0,00111
	Biogás	56	0,2%	0,014	0,00003
	Biomasa	446	1,8%	0,009	0,00016
Energías No Renovables	Carbón	5.545	22%	0,27	0,062
	Gas natural	4.876	20%	0,13	0,025
	Derivados del petróleo	2.769	11%	0,23	0,026
Total		24.684	1	0,69	0,12

Anexo B: Diagrama de distribución de etapas

En la Figura B.1 se muestran las actividades consideradas en el cálculo de cada etapa. Tener en cuenta que en “Procesamiento” y “Rendering” de ambas carnes se incluye el tratamiento de agua necesario para cada uno.

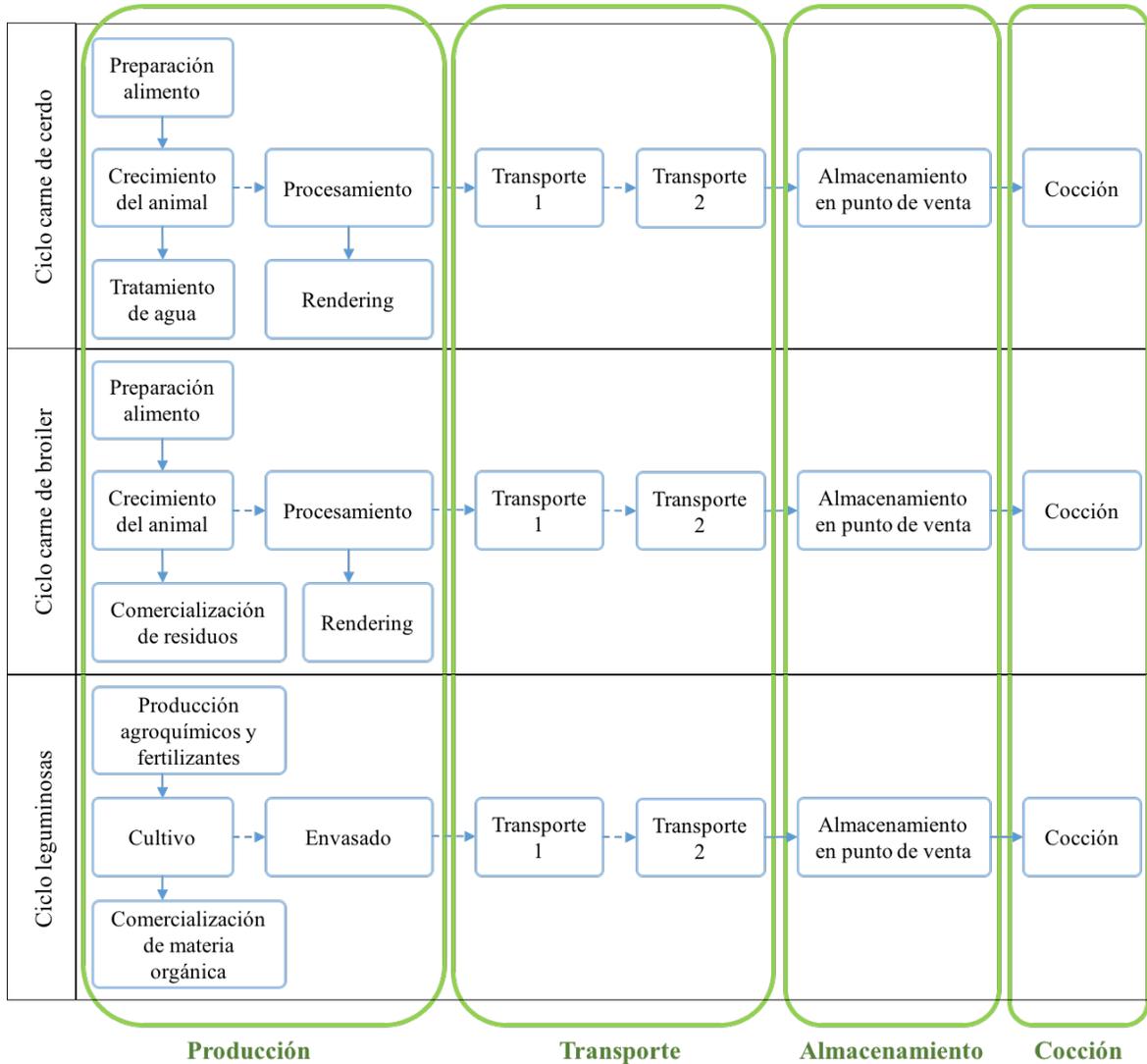


Figura B.1. Diagrama de las actividades que componen cada etapa en los ciclos productivos.

Anexo C: Cálculo de emisiones por tipo de cocina

En esta sección se muestra el ejemplo de cálculo del impacto ambiental causado por la cocción de alimento en una olla tradicional tapada (no se usó olla a presión). El tiempo de cocción se obtuvo de manera empírica, los valores técnicos de las cocinas, como emisiones o consumo eléctrico, se adquirieron de catálogos de empresas o de informes hechos por organismos oficiales.

Anexo C.1: Cocina eléctrica

El consumo de energía ($CE_{cocinaE}$) se define como el producto entre la potencia y la frecuencia de uso de la cocina [95]. Por ejemplo, 800 [g] de porotos demoran 1,17 [h] en cocerse en una cocina de una potencia de 1,5 [kW]. Su consumo energético es:

$$CE_{cocinaE} [MJ] = 1,5 [kW] \cdot 1,17 [h] \cdot \frac{3,6 [MJ]}{[kWh]} = 6,3 [MJ]$$

La demanda de energía eléctrica, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Consumo eléctrico} \left[\frac{MJ}{kg} \right] = \frac{\text{Consumo energía} [MJ]}{\text{Masa cocinada} [kg]}$$

Reemplazando con los datos del ejemplo:

$$\text{Consumo eléctrico} = \frac{6,3 [MJ]}{0,8 [kg]} = 7,9 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

Anexo C.2: Cocina con gas licuado de petróleo

El consumo de combustible (CC) se define como el producto entre la potencia y la frecuencia de uso de la cocina, dividido por el poder calorífico, que es 12,79 [kWh/kg] para el GLP [95]. Por ejemplo, 800 [g] de porotos demoran 1,5 [h] en cocerse en una cocina GLP de una potencia de 1,5 [kW]. Su consumo de combustible es:

$$CC_{cocinaGLP} = \frac{1,5 [kW] \cdot 1,5 [h]}{12,79 \left[\frac{[kWh]}{[kg]} \right]} = 0,18 [kg]$$

Luego, suponiendo que la emisión de CO₂ generada es de 2,82 [kgCO₂/kg], la masa de CO₂ derivada del consumo de energía (EC_{GLP}) es [155]:

$$EC_{GLP} = \frac{0,18 [kg] \cdot 2,82 \left[\frac{[kgCO_2]}{[kg]} \right]}{0,8 [kg]} = 0,62 \left[\frac{[kgCO_2]}{[kg]} \right]$$

Además, la cocina a gas libera gas metano en su uso. El factor de emisión es 1,1 [kgCH₄/TJ]. La energía utilizada corresponde a 2,25 [kWh], por lo tanto la emisión es:

$$Emisión_{CH_4} = 2,25 [kWh] \cdot \frac{3,6 [MJ]}{[kWh]} \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kgCH_4}{MJ} \right] = 2,8 \cdot 10^{-6} [kgCH_4]$$

Anexo D: Cálculo de emisiones procedentes del transporte

Anexo D.1: Emisiones maquinaria agrícola

A partir de bibliografía, se obtienen la energía usada por máquina por hectárea [108]. Luego se normalizan los datos y se calcula la emisión usando la Ecuación 6, con un factor de emisión de 74.100 [kg/TJ] para el dióxido de carbono, 5,55 [kg/TJ] para el metano y 6,65 [kg/TJ] para el óxido nitroso. Por ejemplo, en el poroto el arado demanda 745 [MJ/ha], lo que equivale a 0,113 [MJ/MPD] y se aplica la ecuación:

$$Emisiones_{CO_2} = 0,113 \left[\frac{MJ}{MPD} \right] \cdot 0,0741 \left[\frac{kgCO_2}{MJ} \right] = 0,084 \left[\frac{kgCO_2}{MPD} \right]$$

$$Emisiones_{CH_4} = 0,113 \left[\frac{MJ}{MPD} \right] \cdot 5,55 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kgCH_4}{MJ} \right] = 6,3 \cdot 10^{-7} \left[\frac{kgCH_4}{MPD} \right]$$

$$Emisiones_{N_2O} = 0,113 \left[\frac{MJ}{MPD} \right] \cdot 6,65 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kgN_2O}{MJ} \right] = 7,5 \cdot 10^{-7} \left[\frac{kgN_2O}{MPD} \right]$$

El procedimiento anterior se itera con cada maquinaria.

Anexo D.2: Emisiones transporte de carga

La metodología de cálculo presentada en este Anexo pertenece a la “Guía de cálculo de la huella de carbono del transporte de mercancías por carretera” [156]. En el transporte refrigerado se supuso que la carga tenía una masa de 12.000 [kg]. Respecto al transporte sin control de temperatura, la carga es de 15.000 [kg] [157].

Siguiendo la metodología propuesta por la guía mencionada, primero se necesita el consumo específico (f_{envio}^*) de diésel, en términos de toneladas-kilómetro ([tkm]):

$$f_{envio}^* [L/tkm] = a * f_{envio} [L/tkm]$$

El factor de corrección (a) de un vehículo de 15 toneladas es de 1,3. El consumo específico por propulsión del vehículo (f_{envio}) en términos de tonelada-kilómetro, para un camión entre 12 y 24 toneladas, es 0,042.

Después, el consumo de combustible debido al envío está dado por la expresión:

$$F_{envio} [L] = f_{envio}^* [L/tkm] * P_{envio} [t] * D_{ruta} [km]$$

Si existen detenciones a lo largo del camino para hacer entregas, la distancia recorrida por la carga (D_{ruta}) y el peso bruto del envío (P_{envio}) pueden ir variando en el trayecto, por lo que el combustible demandado debe calcularse por tramo de ruta. En esta memoria se supuso que se realizaban dos viajes y en cada uno existía una parada donde se descarga la totalidad del contenido del camión. En el caso de las legumbres, el primer trayecto consiste en la descarga de leguminosas en la empaquetadora y en el segundo se deposita el producto en el punto de

almacenamiento o de venta. En el caso de la carne el primer traslado es de animales vivos hacia la faena, y el segundo es de producto envasado al punto de venta.

Por último, se calcula la emisión de CO₂ del recorrido (G_T), usando el alcance del tanque a las ruedas [158], para un camión que emplea combustible diésel con un factor de emisión (g_T) de 2,67 [kgCO₂/L]:

$$G_T [kgCO_2] = g_T * F_{envio}$$

Aplicando la metodología al caso de las legumbres, las emisiones por consumo de combustible por el viaje de la plantación en Rengo a la empaquetadora en San Bernardo (100 [km]) es:

$$f_{envio1,legum}^* = 1,3 * 0,042 \left[\frac{L}{tkm} \right] = 0,05 \left[\frac{L}{tkm} \right]$$

$$F_{envio1,legum} = 0,05 \left[\frac{L}{tkm} \right] * 15 [t] * 100 [km] = 82 [L]$$

$$G_{T1} = 6,7 \left[\frac{kgCO_2}{L} \right] * 82 [L] = 218,7 [kgCO_2]$$

Además, el consumo del trayecto entre la empaquetadora en San Bernardo y el punto de venta en Puente Alto (20 [km]) es:

$$F_{envio2,legum} = 0,05 \left[\frac{L}{tkm} \right] * 15 [t] * 20 [km] = 16,4 [L]$$

$$G_{T2} = 2,67 \left[\frac{kgCO_2}{L} \right] * 16,4 [L] = 43,7 [kgCO_2]$$

Sumando ambas emisiones y dividiendo por la masa de legumbres, se obtiene el total de emisiones por kilogramo de producto (E_{Total}) para el recorrido de las legumbres:

$$E_{Total} = \frac{G_{T1} + G_{T2}}{15.000 [kg]} = 0,0175 \left[\frac{kgCO_2}{kg legumbre} \right]$$

Complementariamente, cuando existe una unidad de frío en el vehículo, el consumo de combustible derivado de la refrigeración de la carga durante el traslado ($F_{ruta,ref}$) se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{ruta,ref} [L] = f_{ref} [L/h] * t_{ruta,ref} [h]$$

El consumo específico de combustible por refrigeración (f_{ref}) depende del tipo de camión y de las condiciones de la unidad de frío. Para un vehículo de capacidad pequeña (menor a 30 [m³]) que mantenga una temperatura de -18 [°C], se estima un consumo específico de 2,5 [L/h]. El tiempo recorrido con la unidad de frío en funcionamiento ($t_{ruta,ref}$) se obtiene a partir de la expresión:

$$t_{ruta,ref} [h] = \frac{D_{ruta} [km]}{v_{media} [km/h]} + t_{espera} * 2 [h]$$

D_{ruta} es la distancia recorrida por el camión cargado, v_{media} es la velocidad media durante el traslado y t_{espera} es el tiempo de carga y descarga del producto y su valor es 2,9 [h], ya que por ley el tiempo de espera máximo por mes es de 88 [h] [159].

Luego, para conocer las emisiones GEI correspondientes al viaje refrigerado (G_T), considerando el alcance del tanque a las ruedas, se usa la fórmula:

$$G_T [kgCO_2] = g_T * F_{ruta,ref}$$

El factor de emisión del tanque a las ruedas (g_T) de un camión que emplea combustible diésel es de 2,67 [kgCO₂/L].

En particular, el traslado con refrigeración de carne de cerdo y pollo se efectúa de Rengo a la comuna de Puente Alto en la región Metropolitana, recorriendo 123 [km]. La velocidad de un camión ligero en autopista es de 90 [km/h] [160][156]. Así se obtiene el tiempo en ruta:

$$t_{ruta,ref} [h] = \frac{123 [km]}{90 [km/h]} + 2,9 * 2 [h] = 7,2 [h]$$

Con este valor se puede determinar el consumo de combustible:

$$F_{ruta,ref} [L] = 2,5 [L/h] * 7,2 [h] = 17,9 [L]$$

Finalmente, la emisión a causa de la carga refrigerada es:

$$G_{Tref} [kgCO_2] = 2,67 [kgCO_2/L] * 17,9 [L] = 47,8 [kgCO_2]$$

Para conocer el total de las emisiones, se calculará la emisión generada por el traslado de animales a la faena:

$$f_{envio1,carne}^* = 1,3 * 0,042 \left[\frac{L}{tkm} \right] = 0,05 \left[\frac{L}{tkm} \right]$$

$$F_{envio1,carne} = 0,05 \left[\frac{L}{tkm} \right] * 15 [t] * 50 [km] = 40,9 [L]$$

$$G_{T1,carne} = 2,67 \left[\frac{kgCO_2}{L} \right] * 40,9 [L] = 109,3 [kgCO_2]$$

Por otro lado, la emisión generada por el consumo de combustible del camión adicional a la carga refrigerada es:

$$F_{envio2,carne} = 0,05 \left[\frac{L}{tkm} \right] * 12 [t] * 123 [km] = 80,6 [L]$$

$$G_{T2,carne} = 2,67 \left[\frac{kgCO_2}{L} \right] * 80,6 [L] = 215,2 [kgCO_2]$$

Sumando las emisiones del primer y segundo viaje el total de emisiones será:

$$G_{T,carne} = (G_{T1,carne}) + (G_{Tref} + G_{T2,carne}) = 109,3 + 47,8 + 215,2 = 372,3 [kgCO_2]$$

El primer traslado de pollo broiler a la faena se realiza en un camión de 15 toneladas. Considerando que un pollo pesa 2,6 [kg], el vehículo tiene capacidad para 5.769 pollos, lo que equivale a 11.100 [kg] de carne. En el transporte de carne con refrigeración la carga tiene un peso de 12 toneladas. Así, el total de emisiones por masa de carne es:

$$E_{T,pollo} = \frac{(G_{T1,carne})}{11.100 [kg]} + \frac{(G_{Tref} + G_{T2,carne})}{12.000 [kg]} = 0,032 \left[\frac{kgCO_2}{kg \text{ carne pollo}} \right]$$

Mientras que, repitiendo el proceso para la carne de cerdo. El transporte del cerdo a la faena se lleva a cabo en un vehículo de 15 toneladas, que tiene lugar para 125 cerdos, lo que representa 11.417 [kg]. Con estos datos, la emisión total por masa es:

$$E_{T,cerdo} = \frac{(G_{T1,carne})}{11.417 [kg]} + \frac{(G_{Tref} + G_{T2,carne})}{12.000 [kg]} = 0,031 \left[\frac{kgCO_2}{kg \text{ carne cerdo}} \right]$$

Anexo E: Potencial de Calentamiento Global de cada sistema de producción

En la Tabla E.1 se encuentran las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso por etapa de las cuatro proteína estudiada.

Tabla E.1. Resumen de resultados PCG por proteína estudiada.

Proteína	Etapa	PCG [kgCO ₂ eq/MPD]			Total [kgCO ₂ eq/MPD]	
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Cocina GLP	Cocina Eléctrica
Poroto	Producción	0,17	9,3E-05	0,067	0,62	0,77
	Transporte	0,0044	9,2E-06	0,00011		
	Almacenamiento	-	-	-		
	Cocción GLP	0,37	7,9E-05	-		
	Cocción E.	0,52	-	-		
Lenteja	Producción	0,10	0,00014	0,024	0,36	0,46
	Transporte	0,0042	8,8E-06	9,9E-05		
	Almacenamiento	-	-	-		
	Cocción GLP	0,22	4,2E-05	-		
	Cocción E.	0,33	-	-		
Carne de pollo broiler	Producción	0,63	0,10	0,011	0,83	0,85
	Transporte	0,010	1,0E-05	0,00012		
	Almacenamiento	0,006	-	-		
	Cocción GLP	0,06	4,1E-05	-		
	Cocción E.	0,08	-	-		
Carne de cerdo	Producción	1,9	0,373	0,11	2,56	2,63
	Transporte	0,012	2,6E-05	0,0003		
	Almacenamiento	0,009	-	-		
	Cocción GLP	0,15	8,4E-05	-		
	Cocción E.	0,22	-	-		

Anexo F: Ejemplo de cálculo ACV

En este apartado se expone un ejemplo de cálculo del sistema de legumbres y del sistema de proteína animal usando una cocina con GLP. Los valores utilizados corresponden a los detallados en el análisis de datos y en los antecedentes del Análisis de Ciclo de Vida. El desarrollo completo de los cálculos presentados se efectuó en planillas Excel.

Anexo F.1: Normalización de datos

Antes de calcular el PCG se normalizan los datos, de modo que sean equivalentes a la masa necesaria para cumplir el requerimiento diario de proteína (designado como MPD). Los valores de normalización se calculan a partir de la Tabla 1 y la Tabla 2 de la sección de Antecedentes. Por ejemplo en la Tabla 1, se indica que por cada 100 [g] de poroto cocido, el alimento contiene 9,7 [g] de proteína, entonces la equivalencia es:

$$masa\ de\ normalización_{poroto} = \frac{1\ [kg\ poroto] \cdot 0,059\ [kg\ proteína]}{0,097\ [kg\ proteína]} = 0,61\ [kg]$$

Se realiza el mismo procedimiento a los datos de la Tabla 2, y se obtienen los valores de la Tabla F.1.

Tabla F.1. Valores de normalización para cada proteína.

	Producto crudo [kg/MPD]	Producto cocido [kg/MPD]
Poroto	0,25	0,61
Lenteja	0,24	0,66
Pollo	0,34	0,28
Cerdo	0,43	0,26

Anexo F.2: Ejemplo de cálculo

Continuando el ejemplo con el poroto, se toman los datos de la Tabla 8 del arado: $0,033\ [kgCO_2/kg]$, $2,5 \cdot 10^{-6}\ [kgCH_4/kg]$ y $2,9 \cdot 10^{-6}\ [kgN_2O]$ y se normalizan.

$$0,033 \left[\frac{kgCO_2}{kg} \right] \cdot 0,25 = 0,008 \left[\frac{kgCO_2}{MPD} \right]$$

$$2,5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kgCH_4}{kg} \right] \cdot 0,25 = 6,3 \cdot 10^{-7} \left[\frac{kgCH_4}{MPD} \right]$$

$$2,9 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kgN_2O}{kg} \right] \cdot 0,25 = 7,5 \cdot 10^{-7} \left[\frac{kgN_2O}{MPD} \right]$$

Después se aplica la Ecuación 5, con los factores de emisión de la Tabla 6 y se tiene la emisión total del arado:

$$PCG_{Total} [kgCO_2eq] = \sum_{i=1}^n (AD \cdot EF)_i \cdot PCG_i \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$PCG_{Total} = 0,008 + 6,3 \cdot 10^{-7} \cdot 28 + 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot 265 = 0,086 \left[\frac{kgCO_2eq}{MPD} \right]$$

Anexo G: Ejemplo de cálculo de Huella Ecológica

Anexo G.1: Ejemplo legumbre

Primero se deben normalizar los datos como se indica en el Anexo F.1. Siguiendo el ejemplo con el poroto, los datos de la Tabla 15 y la Tabla 16 se normalizan por la unidad funcional, multiplicando por el valor que corresponda de la Tabla. Los datos normalizados se observan en la Tabla G.1.

Tabla G.1. Emisión de CO₂, consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de poroto.

Etapa	Actividad		Emisión [kgCO ₂ /MPD]	Energía [MJ/MPD]	Superficie [m ² yr/MPD]
Producción	Preparación de suelo	Arado	0,013	-	1,5
		Rastraje	0,015	-	
		Fertilizante	0,003	0,049	
		Herbicida (fabricación y aplicación)	0,002	0,024	
	Siembra	Sembradora de grano grueso	0,005	-	
	Crecimiento	Herbicida (Basagran)	0,003	0,044	
		Fertilizante (Urea)	0,054	0,287	
		Fungicida (Cadilac 80 WP)	-	0,028	
		Insecticida (Lorsban 4E)	-	0,018	
		Pulverizador de barra	0,003	-	
	Cosecha	Hilado	0,004	-	
		Cosechadora de grano grueso	0,030	-	
	Envasado	Limpiado, selección y separado	6,6E-07	6E-05	
Empaquetado		-	0,001		
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,004	-	-
	Transporte 2	Sin refrigeración	0,001	-	-
Almacenamiento	Sin refrigeración		-	-	0,007
Cocción	Cocina a gas		0,38	-	-
Total			0,52	0,45	1,52

En el cálculo del área directa se emplea la Ecuación 2 presentada en Antecedentes:

$$EF_{directo} = \sum_a A_a \cdot EqF_a \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la ecuación anterior, A_a es el valor total normalizado de la superficie que se encuentra en la Tabla G.1. Además, EqF_a tanto para construcción y tierra de cultivo tiene un valor de 2,2. Reemplazando en la ecuación:

$$EF_{directo} = 1,52 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] \cdot 2,2 = 3,35 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Luego, la huella ecológica relacionada a la emisión de CO₂ se obtiene de la Ecuación 3, en la que se reemplaza la suma de las emisiones de la Tabla G.1 y los datos entregados en el antecedente de la huella ecológica:

$$EF_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot \frac{1-F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$EF_{CO_2} = 0,52 \left[\frac{kg CO_2}{MPD} \right] \cdot \frac{1 - 0,3}{0,4 \left[\frac{kg CO_2}{m^2 yr} \right]} \cdot 1,4 = 1,3 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Mediante la Ecuación 4, se calcula la huella ecológica derivada de la producción de energía, sustituyendo el valor total del consumo de energía:

$$EF_{energía eléctrica} = E_{cons} \cdot I_{CO_2} \cdot \frac{1-F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$EF_{energía eléctrica} = 0,45 \left[\frac{MJ}{MPD} \right] \cdot 0,12 \left[\frac{kg CO_2}{MJ} \right] \cdot \frac{1 - 0,3}{0,4 \left[\frac{kg CO_2}{m^2 yr} \right]} \cdot 1,4 = 0,13 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Finalmente, se suman los tres resultados, concluyendo que la huella ecológica total para el sistema de producción de poroto tiene un valor de 4,77 $[m^2 yr/MPD]$.

$$EF_{poroto} = 3,35 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] + 1,3 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] + 0,13 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] = 4,77 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Anexo G.2: Ejemplo carne

Se repite el procedimiento anterior, la Tabla 28 y la Tabla 29 se normalizan multiplicando por el valor correspondiente en la Tabla F.1. El resultado de la normalización se puede observar en la Tabla G.2.

Tabla G.2. Emisión de CO₂, consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de carne de cerdo.

Etapa	Actividad	Emisión [kgCO ₂ /MPD]	Energía [MJ/MPD]	Superficie [m ² yr/MPD]	
Producción	Crecimiento del animal	Lactancia (iluminación, ventilación y calefacción)	-	0,28	3,718
		Lactancia (respiración y manejo de estiércol)	0,26	0,00	
		Engorde (Iluminación y ventilación)	0,00	0,26	
		Engorde (respiración y manejo de estiércol)	1,09	-	
		Producción de alimento	0,053	0,066	
		Tratamiento agua	-	0,065	
	Procesamiento	Planta faenadora	0,03	0,109	0,002
		Planta rendering	0,36	0,10	
		Tratamiento agua	-	0,00036	
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,0031	-	-
	Transporte 2	Con refrigeración	0,0093	-	
Almacenamiento		Con refrigeración	-	0,082	0,0179
Cocción	Cocina a gas	0,10	-		
Total		1,91	0,96	3,74	

Primero, se obtiene la huella del área directa aplicando la Ecuación 2, con un factor de equivalencia 2,2, ya que el estudio involucra tierra de cultivo y de construcción:

$$EF_{directo} = 3,74 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] \cdot 2,2 = 8,22 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

A continuación, se calcula la huella ecológica de la emisión de CO₂ reemplazando el total de emisiones de carbono de la Tabla G.2 y los datos de las constantes especificadas en el antecedente de la huella ecológica:

$$EF_{CO_2} = 1,91 \left[\frac{kg CO_2}{MPD} \right] \cdot \frac{1 - 0,3}{0,4 \left[\frac{kg CO_2}{m^2 yr} \right]} \cdot 1,4 = 4,68 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Posteriormente, se estima la huella ecológica del consumo energético con la Ecuación 4. Para ello se sustituyen las constantes que se encuentran en Antecedentes y el consumo total se extrae de la Tabla G.2:

$$EF_{energía\ eléctrica} = 0,96 \left[\frac{MJ}{MPD} \right] \cdot 0,12 \left[\frac{kg CO_2}{MJ} \right] \cdot \frac{1 - 0,3}{0,4 \left[\frac{kg CO_2}{m^2 yr} \right]} \cdot 1,4 = 0,28 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Por último, sumando los tres resultados obtenidos, se tiene la huella ecológica del sistema de producción de carne de cerdo:

$$EF_{poroto} = 8,22 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] + 4,68 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] + 0,28 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right] = 13,19 \left[\frac{m^2 yr}{MPD} \right]$$

Anexo G.3: Tablas normalizadas

La Tabla G.3 y la Tabla G.4 contienen toda la información usada en el análisis, los valores se encuentran normalizados por la unidad funcional. Las referencias de los datos se encuentran en la descripción del proceso.

Tabla G.3. Emisión de CO₂, consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de lentejas.

Etapa	Actividad		Emisión [kgCO ₂ /MPD]	Energía [MJ/MPD]	Superficie [m ² yr/MPD]
Producción	Preparación de suelo	Arado	0,025	-	2,8
		Rastraje	0,027	-	
		Fertilizante	0,005	0,072	
		Herbicida fabricación y aplicación)	0,003	0,022	
	Siembra	Sembradora de grano grueso	0,009	-	
	Crecimiento	Herbicida (Simazina 50)	-	0,042	
		Fungicida (Benomyl)	0,001	0,034	
		Fungicida (Manzate 200)	-	0,052	
		Insecticida (Zero 5EC)	-	0,018	
		Pulverizador de barra	0,009	-	
	Cosecha	Hilerado	0,007	-	
		Cosechadora de grano grueso	0,035	-	
	Envasado	Limpiadora, seleccionadora y separadora	0,000	0,000	
Empaquetadora		-	0,001		
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,004	-	-
	Transporte 2	Sin refrigeración	0,001	-	
Almacenamiento			-	-	0,0058
Cocción		Cocina gas	0,226	-	-
Total			0,35	0,24	2,80

Tabla G.4. Emisión de CO₂, consumo de energía y superficie utilizada en el sistema de producción de pollo broiler.

Etapa	Actividad		Emisión [kgCO ₂ /MPD]	Energía [MJ/MPD]	Superficie [m ² yr/MPD]
Producción	Crecimiento del animal	Iluminación, ventilación y bombeo de agua	-	0,43	3,5
		Calefacción GLP	0,21	0	
		Respiración y estiércol	0,23	0	
		Producción de alimento	0,11	0,0981	
	Procesamiento	Planta faenadora	0,019	0,0418	0,00003
		Tratamiento agua	-	0,018	
Transporte	Transporte 1	Sin refrigeración	0,0025	0	-
	Transporte 2	Con refrigeración	0,0074	0	
Almacenamiento		Con refrigeración	-	0,05	0,021
Cocción		Cocina a gas	0,067	-	-
		Total	0,64	0,65	3,5

Anexo H: Huella ecológica de cada sistema de producción

En la Tabla H.1 se presentan los resultados de la huella ecológica de cada proteína por etapas del ciclo productivo.

Tabla H.1. Resumen de resultados huella ecológica por proteína estudiada.

Proteína	Etapa	Huella Ecológica [m ² yr/MPD]			Total [m ² yr/MPD]	
		Suelo	Emisión CO ₂	Consumo energético	Cocina GLP	Cocina Eléctrica
Poroto	Producción	3,34	0,32	0,13	4,7	5,2
	Transporte	-	0,011	-		
	Almacenamiento	0,016	-	-		
	Cocción	-	0,92	1,41		
Lenteja	Producción	6,15	0,29	0,071	7,1	7,4
	Transporte	-	0,010	-		
	Almacenamiento	0,013	-	-		
	Cocción	-	0,55	0,87		
Carne de pollo broiler	Producción	7,73	1,38	0,17	9,5	9,6
	Transporte	-	0,024	-		
	Almacenamiento	0,045	-	0,016		
	Cocción	-	0,16	0,23		
Carne de cerdo	Producción	8,18	4,40	0,26	13,2	13,5
	Transporte	-	0,030	-		
	Almacenamiento	0,039	-	0,024		
	Cocción	-	0,25	0,58		

Anexo I: Análisis económico

En este anexo se exponen los cálculos y fuentes de información requeridos por la sección Alcance Económico. Para obtener los resultados de primero, se recopiló información de tres páginas distintas sobre los precios de las proteínas estudiadas. En el pollo se eligió la pechuga deshuesada porque los cálculos del ACV se hicieron en torno a este corte. El mismo criterio se usó en el caso del cerdo, por lo que se buscaron precios de la chuleta de cerdo. El resultado se tiene en la Tabla I.1.

Tabla I.1. Precios encontrados en el mercado para cada proteína.

Proteína	Precio	Referencia
Porotos 1 [kg]	\$2.849	https://n9.cl/ozrm
	\$2.990	https://laferiadelivery.cl/producto/porotos-blancos-kilo
	\$2.490	https://mercadosilvestre.cl/products/porotos-blancos-1kg
Promedio	\$2.776	
Lentejas 1 [kg]	\$1.990	https://mercadosilvestre.cl/products/lentejas-5mm-1kg
	\$2.800	https://laferiadelivery.cl/producto/lentejas-kilo
	\$2.219	https://www.jumbo.cl/lentejas-jumbo-6-mm-1-kg/p
Promedio	\$2.336	
Pechuga deshuesada pollo 1 [kg]	\$4.414	https://n9.cl/mf6j
	\$4.100	https://rb.gy/hvepnh
	\$4.988	https://n9.cl/3gh3x
Promedio	\$4.501	
Chuleta cerdo 1 [kg]	\$4.656	https://n9.cl/e8j3
	\$6.164	https://rb.gy/fk0vw6
	\$5.571	https://www.ensucasa.cl/67-chuletas
Promedio	\$5.463	

Recordando estimaciones anteriores, la masa cruda de cada proteína que se necesita para cumplir el requerimiento diario total se registra en la Tabla F.1. Si, por ejemplo, se quiere calcular el precio por consumir todo el requerimiento consumiendo porotos, se busca en aquella tabla que se requieren 0,25 [kg] de porotos para satisfacerlo. Así, se calculó el costo de ingerir la masa de proteína diaria recomendada para cada alimento como se muestra a continuación:

$$2.776 \left[\frac{\$}{kg \text{ de poroto}} \right] * 0,25 \left[\frac{kg \text{ de poroto}}{MPD} \right] = 704 \left[\frac{\$}{MPD} \right]$$

Se itera el procedimiento con los tres alimentos restantes y se obtiene la Tabla 33.

Siguiendo la modalidad anterior, se procede con los alimentos procesados que usan de base las proteínas elegidas, como vienas y hamburguesas. Se buscaron datos sobre su contenido de proteína y costo de mercado. Se supuso que la masa de proteína declarada en el empaque

hacía referencia al alimento cocido, ya que su valor coincide con el porcentaje de proteína esperado en un producto que fue sometido por un proceso térmico. Con la información se hizo una tabla que se dividió en dos: la Tabla I.2 y la Tabla I.3.

Tabla I.2. Proteína contenida en cada producto.

Proteína	Producto	Comentario	Contenido proteico			MPD de producto [kg]
			Proteína [kg]	En masa de producto		
Pollo	Nuggets La Crianza	72 [g] son 3 nuggets	0,095	1	kg de nuggets	0,62
	Nugget Super Pollo	66 [g] son 3 nuggets	0,008	0,07	kg de nuggets	0,49
	Hamburguesa King	1 unidad	0,008	0,06	kg de hamburguesa	0,41
	Hamburguesa Super Pollo	1 unidad	0,017	0,06	kg de hamburguesa	0,19
	Salchicha San Jorge	1 vienesa son 50 [g]	0,013	0,1	kg de vienesa	0,45
	Vienesas Montina	1 vienesa 50 [g]	0,012	0,1	kg de vienesa	0,49
	Vienesas Winter	1 vienesa 50 [g]	0,006	0,05	kg de vienesa	0,49
Cerdo	Hamburguesa Lider	1 hamburguesa 100 [g]	0,015	0,1	kg de hamburguesa	0,41
	Hamburguesa La Crianza	1 hamburguesa 100 [g]	0,015	0,1	kg de hamburguesa	0,40
	Salchichas Sureñas Lider	1 vienesa 50 [g]	0,007	0,05	kg de vienesa	0,42
	Salchichas Sureñas La Crianza	1 vienesa 50 [g]	0,007	0,05	kg de vienesa	0,43
	Salchichas Sureñas Super Cerdo	1 vienesa 50 [g]	0,007	0,05	kg de vienesa	0,42
Lenteja	Hamburguesa Rikü	1 hamburguesa 110 [g]	0,010	0,1	kg de hamburguesa	0,65
	Hamburguesa Minuto Verde	1 hamburguesa 100 [g]	0,008	0,1	kg de hamburguesa	0,77
	Hamburguesa LeBurger	1 hamburguesa 100 [g]	0,009	0,1	kg de hamburguesa	0,63
Poroto	Hamburguesa Minuto Verde	1 hamburguesa 100 [g]	0,008	0,1	kg de hamburguesa	0,78
	Hamburguesa VegMonkey	1 hamburguesa 100 [g]	0,008	0,1	kg de hamburguesa	0,79
	Hamburguesa Rikü	1 hamburguesa 110 [g]	0,010	0,1	kg de hamburguesa	0,68

Tabla I.3. Costo para cumplir con el requerimiento diario de proteína por producto.

Proteína	Producto	Valor del producto		Costo para cumplir con MPD [\$/MPD]	Referencia
		Masa [kg]	Costo		
Pollo	Nuggets La Crianza	1	\$6.123	\$3.815	https://cutt.ly/NyAHQjz
	Nugget Super Pollo	2,5	\$9.281	\$1.813	https://cutt.ly/eyAHQ9X
	Hamburguesa King	0,09	\$290	\$1.311	https://cutt.ly/QyAHWsq
	Hamburguesa Super Pollo	0,06	\$223	\$790	https://cutt.ly/2yAHWUo
	Salchicha San Jorge	1	\$2.390	\$1.064	https://cutt.ly/hyAHEdq
	Vienesa Montina	0,5	\$1.489	\$1.445	https://cutt.ly/HyAHEH1
	Vienesa Winter	1	\$2.611	\$1.288	https://cutt.ly/8yAHRqa
Cerdo	Hamburguesa Lider	0,1	\$690	\$2.817	https://cutt.ly/2yAHRhT
	Hamburguesa La Crianza	0,1	\$790	\$3.181	https://cutt.ly/8yAHRHe
	Salchichas Sureñas Lider	1	\$2.290	\$955	https://cutt.ly/YyAHR2v
	Salchichas Sureñas La Crianza	1	\$4.641	\$1.991	https://cutt.ly/FyAHTgZ
	Salchichas Sureñas Super Cerdo	1	\$2.781	\$1.166	https://cutt.ly/YyAHT7t
Lenteja	Hamburguesa Rikü	0,44	\$4.299	\$6.305	https://cutt.ly/2yAHYxb
	Hamburguesa Minuto Verde	0,4	\$3.990	\$7.669	https://cutt.ly/dyAHYBz
	Hamburguesa LeBurger	0,4	\$4.990	\$7.830	https://cutt.ly/UyAHUtV
Poroto	Hamburguesa Minuto Verde	0,4	\$3.990	\$7.744	https://cutt.ly/lyAHUJL
	Hamburguesa VegMonkey	0,1	\$890	\$7.001	https://cutt.ly/QyAHU8W
	Hamburguesa Rikü	0,44	\$4.299	\$6.626	https://cutt.ly/ayAHIxv