



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
FACULTAD DE AGRONOMIA E INGENIERIA FORESTAL  
DIRECCION DE INVESTIGACION Y POSTGRADO  
MAGISTER EN RECURSOS NATURALES

**ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO  
PARA EL SECTOR AGRICULTURA MEDIANTE PROCESO ANALÍTICO  
JERÁRQUICO**

Tesis presentada como requisito para optar al grado de

*Magister en Recursos Naturales: Cambio Global*

por:

Catalina Belén Marinkovic De la Cruz

Comité de Tesis

Profesor Guía: Francisco Meza

Profesores Informantes:

Eduardo Arellano

Horacio Gilabert

Noviembre 2021

Santiago-Chile

## **Agradecimientos**

Deseo expresar mi agradecimiento a las instituciones y proyectos que hicieron posible que este trabajo terminara con éxito y, en especial a:

A la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, al Centro de Cambio Global UC y al proyecto FONDECYT N°1170429 por financiar este trabajo.

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible que este trabajo terminara con éxito y, en especial a:

En primer lugar, al Profesor Francisco Meza Dabancens, por creer en mí y darme la oportunidad y privilegio de trabajar en conjunto durante el proceso de formación, de haber sido fuente de inspiración desde mis inicios en la Universidad, aspirando siempre a entregar lo mejor de uno y ser un aporte para la construcción de un país más justo y sostenible. En segundo lugar, a Andrés Pica Téllez, por su motivación y acompañamiento a lo largo de este proceso, por su paciencia y ayuda constante.

A mi hija Antonia por todos los sacrificios que vivimos juntas y su paciencia, a Marcela y Carolina (y a la Yoyi) que sin su apoyo no lo habría logrado.

A mi madre por siempre motivarme sobre hacer lo correcto, a mi padre por el apoyo constante, a mi hermana Cota por su motivación, apoyo y aguantarme.

A los profesores Eduardo Arellano y Horacio Gilabert por sus consejos para que este trabajo quedara lo mejor posible.

A todos lo que hicieron posible de una u otra forma que yo llegar hasta aquí.

*Dedicatoria a Greta por su valentía y a mi abuelo Francisco por su inspiración*

## INDICE

ABSTRACT .....	7
1 INTRODUCCIÓN .....	9
2 MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
2.1 Construcción de Escenario de mitigación para el sector Agricultura al 2050 .	12
2.2 Modelo y metodología de estimación de emisiones del Sector Agricultura....	12
2.3 Modelos de proyección categorías principales .....	18
2.4 Medidas de mitigación para el Sector Agricultura.....	24
2.5 Priorización de medidas de mitigación para el sector Agricultura .....	26
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
3.1 Modelo de estimación de emisiones del Sector Agricultura Histórico .....	38
3.2 Proyecciones Categorías Principales .....	41
3.3 Medidas de mitigación y Curva MACC .....	49
3.4 Escenarios de emisiones GEI del Sector Agricultura.....	52
3.5 Análisis de Decisión Multicriterio, a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) 61	
4 CONCLUSIONES .....	83
5 RESUMEN .....	85
6 BIBLIOGRAFÍA .....	86
7 ANEXOS.....	94

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Módulos Categorías de emisiones Sector Agricultura en software Analytica	13
Figura 2 Modelo Jerárquico para la toma de decisiones con AHP, definido para la priorización de medidas de mitigación al cambio climático .....	29
Figura 3 Planilla ejemplo de Evaluación Cualitativa de Medidas para el Subcriterio Co-beneficios Ambientales, del Criterio Ambiental de la matriz de decisión.....	36
Figura 4 Distribución anual de emisiones estimadas, según categorías del sector agricultura, mediante Modelo, en MtCO <sub>2</sub> eq por año. ....	39
Figura 5 Comparación de la proyección del Stock de ganado Bovino(N° de cabezas) en Chile al 2050 .....	43
Figura 6 Comparación de la proyección del Stock de ganado Porcino en Chile para el 2050, para diferentes estudios. ....	44
Figura 7 Stock de Ganado Porcino Histórico de distintas fuentes, en millones de cabezas.....	46
Figura 8 Comparación de la proyección del Stock Aves de Corral en Chile para el 2050, para diferentes estudios. ....	47
Figura 9 Comparación de Proyección de Consumo de Nitrógeno a nivel nacional para el periodo 2019 – 2050.....	48
Figura 10 Curva de Costos Marginales de Abatimiento .....	51
Figura 11 Emisiones totales para el sector agricultura periodo 1990-2050 para “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” .....	52
Figura 12 Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Aceptabilidad Social” .....	70
Figura 13 Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Innovación” .....	71
Figura 14 Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Capacidades Técnicas” .....	72
Figura 15 Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Facilidad de Implementación” .....	73

Figura 16 Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Co-beneficios Ambientales” .....	74
Figura 17 Ranking de medidas priorizadas para grupo de actores Sector Público mediante AHP.....	75
Figura 18 Ranking de medidas priorizadas para grupo de actores Academia, mediante AHP, para el conjunto de medidas analizadas .....	77
Figura 19 Ranking de medidas priorizadas total, mediante AHP, para el conjunto de medidas analizadas.....	78
Figura 20 Comparación entre los resultados de Ranking de las medidas a través del AHP, entre el Sector Público, Academia y Ranking total .....	79
Figura 21 Resultado de Ranking de medidas de mitigación para metodología AHP y Curvas MACC .....	80
Figura 22 Hoja N°1 de Instrucciones Herramienta.....	109
Figura 23 Hoja N°1 de Instrucciones Herramienta.....	110
Figura 24 Hoja N°2 de Escala de Prioridades mediante “comparación entre pares” .	111
Figura 25 Hoja N°2 de Escala de Prioridades mediante “comparación entre pares”, Subcriterios Socio-económico y Técnico .....	112
Figura 26 Hoja N°2 de Escala de Prioridades mediante “comparación entre pares”, Subcriterios Ambientales, y criterios “Socio-económicos”, “Técnicos” y “Ambientales” .....	113
Figura 27 Hoja N°3 Resultados Ponderación de Matriz de Jerarquías para la Toma de decisiones .....	114
Figura 28 Hoja N°4 Evaluación de Medidas de Mitigación, para aceptabilidad social e Innovación.....	115
Figura 29 Hoja N°4 Evaluación de Medidas de Mitigación, para “Capacidades Técnicas y Dificultad de implementación”.....	116
Figura 30 Hoja N°4 Evaluación de Medidas de Mitigación, para “Co-beneficios ambientales”.....	117
Figura 31 Hoja N°5 Calificación medidas ejemplo, según resultados del encuestado .....	118

Figura 32 Hoja N°5 Gráfico ejemplo de resultados de Matriz de priorización de medidas, según método AHP, SMART y MAUT .....	118
Figura 33 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Costo-Efectividad" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	119
Figura 34 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Aceptabilidad Social" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	119
Figura 35 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Empleo" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	121
Figura 36 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Innovación" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	122
Figura 37 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Capacidades Técnicas" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	123
Figura 38 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Dificultad de implementación" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	124
Figura 39 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Potencial de Reducción" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	125
Figura 40 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Co-beneficios Ambientales" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia.....	126
Figura 41 Distribución de respuestas para Criterio "Socio-Económico" (a) para todos los encuestados, (b) Entrevistados Sector Público, y (c) Entrevistados Academia.....	126
Figura 42 Distribución de respuestas para Criterio "Técnico" (a) para todos los encuestados, (b) Entrevistados Sector Público, y (c) Entrevistados Academia.....	128

Figura 43 Distribución de respuestas para Criterio "Ambiental" (a) para todos los encuestados, (b) Entrevistados Sector Público, y (c) Entrevistados Academia.....128

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de las Medidas de mitigación consideradas en el análisis.....	25
Tabla 2 Definición de Subcriterios para el Modelo Jerárquico para la toma de decisiones .....	29
Tabla 3 Escala de importancia de Saaty .....	31
Tabla 4 Método de evaluación (MAUT o SMART) y Unidad de medida para cada Subcriterio del Modelo de Jerarquías a través del AHP.....	34
Tabla 5 Estimación de emisiones mediante Modelo en MtCO <sub>2</sub> eq por año.....	38
Tabla 6 Comparación de emisiones estimadas (Analytica) v/s INGEI (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a) de GEI en MtCO <sub>2</sub> eq Sector Agricultura por categoría. ....	40
Tabla 7 Costo de abatimiento y reducción de emisiones de las medidas de mitigación asociada al futuro de referencia. ....	50
Tabla 8 Comparación de emisiones totales para “Escenario BAU” “Escenario de mitigación” y “Escenario de mitigación Plausible”, para los años 2018, 2020, 2030, 2040 y 2050, en MtCO <sub>2</sub> eq.....	52
Tabla 9 Emisiones Escenario "BAU" proyectadas por categoría para los años, 2019, 2020, 2030, 2040 y 2050 en MtCO <sub>2</sub> eq * año <sup>-1</sup> .....	53
Tabla 10 Emisiones “Escenario Mitigación” proyectadas por categoría para los años, 2019, 2020, 2030, 2040 y 2050 en MtCO <sub>2</sub> eq.....	54
Tabla 11 Comparación de emisiones por categoría al 2050 para “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” al 2019, en MtCO <sub>2</sub> eq.....	56
Tabla 12 Variación porcentual de emisiones bajo “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” al 2050 .....	57
Tabla 13 Puntaje Promedio y desviación estándar para “Subcriterios Socio-Económicos”, para Entrevistados (a)Sector Público y (b)Academia .....	62
Tabla 14 Puntaje Promedio y desviación estándar para “Técnicos”, para Entrevistados (a)Sector Público y (b)Academia.....	62

Tabla 15 Puntaje Promedio y desviación estándar para subcriterios “Ambientales”, para Entrevistados (a) Sector Público y (b)Academia.....	63
Tabla 17 Puntaje Promedio y desviación estándar para Criterios “Socio-economico”, “Técnico” y “Ambientales”, para Entrevistados (a) Sector Público y (b) Academia .....	63
Tabla 18 Puntaje ponderado para Subcriterios de la Matriz de Jerarquías.....	64
Tabla 19 Nota de evaluación subcriterio "Costo-efectividad" bajo método MAUT para las medidas analizadas.....	67
Tabla 20 Nota Evaluación subcriterio "Potencial de mitigación" bajo método MAUT para las medidas analizadas .....	67
Tabla 21 Nota Evaluación subcriterio "Empleo" bajo método MAUT para las medidas analizadas.....	68
Tabla 22 Puntajes ponderados para cada una de las medidas de mitigación para grupo de actores Sector Público mediante AHP.....	76
Tabla 23 Puntajes ponderados para cada una de las medidas de mitigación para grupo de actores Academia mediante AHP.....	77
Tabla 24 Puntajes ponderados para cada una de las medidas de mitigación total mediante AHP.....	78

Analysis and selection of climate change mitigation measures for the agriculture sector through a hierarchical analytical process (AHP)

Catalina Belén Marinkovic De la Cruz <sup>1</sup>, Francisco Javier Meza Dabancens<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.

**ABSTRACT**

**Catalina Marinkovic and Francisco Meza. Analysis and selection of climate change mitigation measures for the agriculture sector through a hierarchical analytical process (AHP).** Tesis, *Magister* en Recursos Naturales, Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica, Santiago de Chile. 136 pp. Chile has committed to a reduction of approximately 30% of its Greenhouse Gases (GHG) emissions by 2030 and mentions the interest in achieving carbon neutrality by 2050. Currently, the agriculture sector represents 10,5 % of GHG emissions nationwide. The objective of this work is to evaluate the potential for reducing GHG emissions by 2050 in the agriculture sector, applying a set of mitigation measures that are prioritized through a Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) under the Analytical Hierarchical Process (AHP), and comparing them with the prioritization of the Marginal Abatement Costs Curve (MACC). In this work, three scenarios were developed. The first corresponds to a "Mitigation Scenario", which considers the set of measures analyzed, and the second to a "Plausible Mitigation Scenario", which considers only those measures that have a reduction cost less than the Social Price of Carbon. The results show that the greatest reduction occurs under the "Mitigation Scenario", but the average Abatement Cost is 1.6 times higher per ton reduced than under the "Plausible Mitigation Scenario". The reduction of the Agricultural sector in Chile by 2030 is less than that expected at the world level to achieve a temperature limit of 2°C. The MCDA proved to be capable of influencing decision-making, by incorporating

environmental, social and economic criteria (focus on just transition) for the prioritization of mitigation measures.

**Key Words:** Mitigation, Climate Change, Agriculture, Multi-criteria Decision Analysis.

## 1 INTRODUCCIÓN

Para limitar el calentamiento global a un valor de no más de 2°C, se deberá disminuir al menos en un 25% de las emisiones globales netas de CO<sub>2</sub> al 2030 y alcanzar emisiones netas nulas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al 2070, considerando como año base el año 2010 (IPCC, 2018). Para lograr cumplir este objetivo, el año 2015 se desarrolló el Acuerdo de París, estableciendo metas de reducción de emisiones a través de las Contribuciones Nacionales Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) de cada país miembro (ONU, 2015). En el marco de lo anterior, Chile presentó su segundo compromiso de reducción de emisiones GEI a través de su NDC el año 2020, en el cual establece alcanzar una reducción del 30% del balance de emisiones al 2030 con respecto al 2016, con miras de alcanzar la carbono neutralidad al 2050 (Gobierno de Chile, 2020).

A nivel mundial, las emisiones provienen principalmente de la producción de energía, representando un 25%, seguido por el sector Agricultura, Forestal y Uso del Suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) que corresponde aproximadamente un 24% de las emisiones globales (IPCC, 2014), el sector industrial (21%) y sector transporte (14%). Sin embargo, se estima que la participación de emisiones provenientes del sector Agricultura corresponde a un 11% del total global (Smith et al, 2014). En Chile, las emisiones se distribuyen de manera similar, siendo el sector más relevante Energía (incluyendo la generación de electricidad, la energía empleada en transporte y en producción industrial), seguido por el sector Agricultura, con una participación del 78% y 10,6% respectivamente (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a).

Para alcanzar los objetivos de Acuerdo de París, se deberá realizar un esfuerzo de reducción de emisiones transversal en todos los sectores. Las trayectorias de emisiones que limitarían el calentamiento a 1,5°C, consideran reducciones sustanciales de las emisiones agrícolas. La modelación que logran estas reducciones, lo realizan mediante la asignación de un precio al carbono agrícola, estando muy lejos de la realidad actual (Leahy et al., 2020). El sector ha recibido baja atención en el proceso de la CMNUCC y

su progreso e implementación ha sido lenta (FAO, 2013). Alrededor de 100 países se han comprometido a reducir sus emisiones asociadas al sector Agricultura, lo que suma una reducción de alrededor de 1GTtonCO<sub>2</sub>eq/año al 2030. Sin embargo, se estima que entre un 21% y 40% de estas reducciones son plausibles (Wollenberg et al., 2016), por lo que se hace urgente buscar alternativas más ambiciosas para la reducción de esas emisiones.

En Chile, los avances en políticas e investigación para mitigación se han enfocado principalmente en el sector Energía, sin embargo, los avances en estimar el potencial de reducción de emisiones y/o captura de GEI del sector Agricultura en Chile, han sido escasamente evaluados. Por una parte, recomendaciones del Comité Científico de Chile ante la COP 25 indican que el potencial de reducción de emisiones de los sectores no-energéticos, debiesen ser estudiados en mayor profundidad (Parma et al 2019; Masson-Delmotte et al., 2019) y por otra parte, en un futuro se requerirá de mayor investigación que alimente un análisis detallado para un potencial “Plan de Mitigación del Sector Agricultura” que se ha propuesto bajo el anteproyecto de Ley Marco sobre Cambio Climático (Senado de la República de Chile, 2020). Además, como parte del desafío, el compromiso realizado por Chile (a través de su NDC), establece una estrategia para avanzar en la descarbonización bajo principios de transición justa, transición que deberá presentar sinergias con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS’s), como avances en temas de equidad de género, empleo de calidad, entre otros. Asimismo, se explicita relevar las sinergias de adaptación y mitigación al cambio climático para alcanzar dichas metas, por lo que se hace relevante considerar diversos elementos y necesidades al priorizar medidas de mitigación (Gobierno de Chile, 2020).

Existen diversas metodologías o enfoques que se utilizan para evaluar y/o priorizar medidas o instrumentos de mitigación por los tomadores de decisiones, siendo la más ampliamente utilizada, las Curvas de Abatimiento Costos Marginales (MACC, por sus siglas en inglés), que son presentadas como un gráfico en que cada medida es ordenada de menor a mayor, indicando los costos (generalmente en USD/tCO<sub>2</sub>eq), asociado a la última unidad (costo-efectividad) de emisiones para diferentes medidas,

indicando además el potencial de mitigación de dicha medida en el periodo evaluado. Estas curvas MACC, si bien son ampliamente utilizadas ya que proporciona un análisis cuantitativo fácilmente interpretable, presentan varias limitaciones, puesto que carecen de una mirada holística, presentando dificultades en capturar interacciones entre medidas, costos, o barreras en la implementación (FAO, 2013; Kesicki, 2011; Kesicki & Ekins, 2012; Kesicki & Strachan, 2011; Vogt-Schilb & Hallegatte, 2014). Por ejemplo, en algunos análisis de costo-efectividad se pone el foco en las reducción de emisiones de GEI, que pueden no considerar otros impactos adicionales de otras cargas contaminantes (por ej. Impactos en agua y aire, como amoniaco o nitratos), generando resultados diferentes en los análisis de curvas de costos marginales de abatimiento (Eory et al., 2013).

Dado que los recursos son limitados y los objetivos que deben cumplir las medidas de mitigación a desarrollar son múltiples, considerando además, que las opciones de mitigación son variadas, distintas experiencias han considerado el uso de herramientas y métodos de Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés), como herramienta de priorización donde existen múltiples objetivos o criterios para la implementación de medidas efectivas (Borges & Villavicencio, 2004; Sugathapala, 2020).

El siguiente estudio busca estimar un potencial de reducción de emisiones de GEI de largo plazo para el Sector Agricultura y evaluar metodologías de priorización de medidas de mitigación al cambio climático mediante un Análisis de decisión Multicriterio para la toma de decisiones. Para esto se desarrolló un modelo de estimación de emisiones GEI bajo la metodología utilizada por el INGEI de Chile 2020 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), se proyectó la tendencia de emisiones GEI al 2050, y se caracterizaron y evaluaron nueve medidas de mitigación, considerando su potencial de reducción y costo de abatimiento. Se desarrolló una herramienta para optimizar la toma de decisiones mediante un Análisis de Decisión Multicriterio mediante el proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y posterior comparación con una curva MACC.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio busca estimar el potencial de reducción de emisiones de GEI en el sector Agricultura de Chile al 2050 y priorizar medidas de mitigación mediante un Análisis de Decisión Multicriterio, aplicando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), construido a partir de opinión expertos. Para ello, se desarrolla un modelo de estimación de emisiones de GEI para el sector Agricultura, considerando todas las categorías presentadas en el Informe del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a) y posterior proyección de las trayectorias de emisión al 2050, mediante una comparación de escenarios.

### **2.1 Construcción de Escenario de mitigación para el sector Agricultura al 2050**

Se realizó una estimación de las emisiones del Sector Agricultura para el periodo histórico y luego una proyección 2019-2050 bajo un escenario de trayectoria actual de emisiones, de aquí en adelante “Escenario BAU” (“Business A Usual, por sus siglas en inglés), un escenario de la trayectoria de emisiones aplicando medidas de mitigación, de aquí en adelante “Escenario de mitigación” y un “Escenario de Mitigación Plausible” aplicando medidas de mitigación plausibles, es decir, aquellas que tienen un costo-efectividad menor a la del Precio Social del Carbono. Se estimó el costo total de cada uno de estos escenarios. Para esto, se desarrolló un modelo de estimación de emisiones, reconstruyendo emisiones históricas (para la validación del modelo) y posterior proyección de los datos de actividad de principales categorías emisoras para el sector. Se realizó una búsqueda, caracterización y análisis de distintas medidas de mitigación aplicables al sector Agricultura para Chile, basados en revisión bibliográfica, y levantadas desde proceso participativo en el marco del proyecto “Apoyo en la elaboración de la Estrategia Climática de Largo Plazo para alcanzar la carbono neutralidad en Chile”. En las próximas secciones se describe la metodología utilizada.

### **2.2 Modelo y metodología de estimación de emisiones del Sector Agricultura**

El modelo del sector Agricultura ha sido desarrollado en el software Analytica de Lumina, utilizando la metodología de estimación de emisiones del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a) de aquí en adelante INGEI 1990-2018, que se basa en las Directrices Metodológicas del IPCC 2006. El actual modelo considera las actualizaciones del último reporte INGEI 1990-2018 para el sector hasta la fecha. Las emisiones que se consideran del sector se subdividen en 7 categorías, siendo ellas, siguiendo la nomenclatura del INGEI 1990-2017 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a); (3.A) Fermentación Entérica, (3.B) Gestión del estiércol, (3.C) Cultivo de arroz, (3.D) Suelos Agrícolas, (3.G) Encalado, (3.F) Quemas Agrícolas y (3.H) Aplicación de urea. Se reconstruyó las series históricas a escala regional, y se consideran Factores de Emisión nivel 1 y 2<sup>1</sup>.

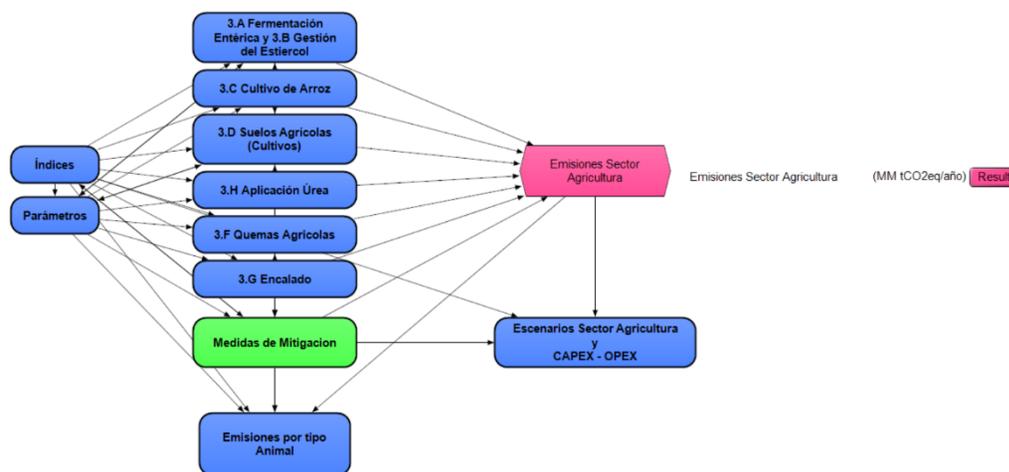


Figura 1 Módulos Categorías de emisiones Sector Agricultura en software Analytica

### 2.2.1 3.A Fermentación Entérica

Para el cálculo de emisiones de GEI de la categoría, se utilizó la metodología detallada en el INGEI 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), que incluye las

<sup>1</sup> Representan los niveles de complejidad metodológica en cuanto a requisitos de datos. Nivel 1, corresponde al método menos exacto, generalmente utiliza parámetros por defecto entregado por las directrices metodológicas del IPCC 2006 (IPCC, 2006).

emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) generadas por Fermentación Entérica que se produce en los sistemas digestivos de los animales, según lo siguiente:

$$E_T = FE_T \times \left( \frac{N_T}{10^6} \right) \times PCG_{CH_4}$$

$E_T$  = Emisiones en CO<sub>2</sub>eq por fermentación entérica del ganado de la categoría T, MMtCO<sub>2</sub>eq año<sup>-1</sup>

$FE_T$  = Factor de emisión para la población de ganado T, KG CH<sub>4</sub> cabezas<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>

$N_T$  = Cantidad de cabezas de ganado de la  $\frac{\text{especie}}{\text{categoría}}$  T del país cabeza año<sup>-1</sup>

T = Categoría  $\frac{\text{especie}}{\text{categoría}}$  de ganado

$PCG_{CH_4}$  = Potencial de Calentamiento global para metano

Se consideraron todas las categorías de ganado en Chile, y los datos de actividad corresponde a los datos utilizados por INGEI 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), obtenida de los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Se han utilizado factores de emisión Nivel 1 y Nivel 2 correspondientemente.

### **2.2.2 3.B Gestión del Estiércol**

Para el cálculo de emisiones de GEI de la categoría, se utilizó la metodología detallada en el INGEI 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), esta categoría incluye las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y (N<sub>2</sub>O) (directas e indirectas), generadas en los sistemas de almacenamiento de estiércol de los sistemas de producción animal. Las emisiones de metano se producen producto de la descomposición del estiércol bajo condiciones anaeróbicas durante el almacenamiento y tratamiento, así como el estiércol depositado en pasturas. Para el cálculo de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>), se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_T = FE_T \times \left( \frac{N_T}{10^6} \right) \times PCG_{CH_4}$$

$E_T$  = Emisiones en CO<sub>2</sub>eq por la gestión del estiércol, para población T, MMtCO<sub>2</sub>eq año<sup>-1</sup>

$FE_T$  = Factor de emisión para la población de ganado T, Kg CH<sub>4</sub> cabezas<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>

$N_T = \text{Cantidad de cabezas de ganado de la } \frac{\text{especie}}{\text{categoría}} \text{ T del país cabeza año}^{-1}$

$T = \text{Categoría } \frac{\text{especie}}{\text{categoría}} \text{ de ganado}$

$PCG_{CH_4} = \text{Potencial de Calentamiento global para metano}$

Las emisiones directas de óxido nitroso ( $N_2O$ ) se producen a través de la nitrificación y desnitrificación combinadas de nitrógeno contenido en estiércol, bajo condiciones aeróbicas. Para el cálculo de emisiones de  $N_2O$  se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_T = [(N_T \times Nex_T \times MS_{(T,S)})] \times FE_{(S)} \times \frac{44}{28} \times 10^{-9} \times PCG_{N_2O}$$

$E_T = \text{Emisión CO}_2\text{eq por las emisiones de N}_2\text{O directas por GE, población T, MMtCO}_2\text{eq año}^{-1}$

$N_T = \text{Cantidad de cabezas de ganado de la } \frac{\text{especie}}{\text{categoría}} \text{ T del país cabeza año}^{-1}$

$Nex_T = \text{Promedio anual de excreción de N por cabeza de población T, Kg N cabeza año}^{-1}$

$MS_{(T,S)} = \text{Fracción de la excreción total anual de N de la población T, bajo SGE}$

$FE_{(S)} = \text{Factor de emisión para emisiones directas de N}_2\text{O del SGE } \left( \frac{\text{Kg N}_2\text{O}}{\text{Kg N}} \right)$

$S = \text{Sistema de Gestión del Estiércol (SGE)}$

$T = \text{Categoría } \frac{\text{especie}}{\text{categoría}} \text{ de ganado}$

$\frac{44}{28} = \text{Conversión de emisiones N}_2\text{O – N a emisión de N}_2\text{O}$

$PCG_{N_2O} = \text{Potencial de Calentamiento global para N}_2\text{O}$

Las emisiones indirectas de óxido nitroso ( $N_2O$ ), son el resultado de pérdidas de nitrógeno volátil. Se consideraron los mismos datos de actividad de población animal utilizados para el cálculo de fermentación entérica. Los factores de emisión corresponden a Nivel 1 y Nivel 2 cuando corresponden.

### **2.2.3 3.C Cultivo de Arroz**

Para el cálculo de emisiones de GEI de la categoría, se utilizó la metodología detallada en el INGEI 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), esta categoría incluye las emisiones de  $CH_4$  generadas por descomposición anaeróbica de materia orgánica en arrozales inundados, en función de los periodos de inundación otras variables ambientales, utilizando la siguiente ecuación:

$$E_T = \sum (A_T * FE_j * D_j * PCG_{CH_4} * 10^{-6})$$

$E_T$  = Días de inundación (MM tCO<sub>2</sub>eq/año)

$A_T$  = Superficie de cosecha anual (ha )

$FE_j$  = Factor de emisión Diario (kg CH<sub>4</sub> há<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>)

(dependiente de regimen hidrico, tipo y cantidad de abonos, y ecosistema).

$PCG_{CH_4}$  = Potencial de Calentamiento global para CH<sub>4</sub>

$D_T$  = Días de inundación

Los datos de superficie de cosecha anual, obtenida de los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Los factores de emisión corresponden a Nivel 1.

#### **2.2.4 3.D Suelos Agrícolas**

Esta categoría incluye las emisiones directas e indirectas (volatilización y lixiviación) de N<sub>2</sub>O generadas desde la superficie de los suelos producto de procesos microbianos asociados a la aplicación de nitrógeno en forma sintética (Fertilizantes inorgánicos) y nitrógeno orgánico (estiércol animal), estiércol y orina depositado en pasturas, y nitrógeno de residuos de cultivos. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_j = \sum N_j * FE_j * \left(\frac{44}{28}\right) * PCG (N_2O)$$

$E_j$  = Emisiones de MMtCO<sub>2</sub>eq año<sup>-1</sup> de N<sub>2</sub>O directas, tipo de fertilizante j

$N_j$  = Cantidad anual de N del tipo de Fertilizante j (Kg N × año<sup>-1</sup>)

$FE_j$  = Factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O de aportes de N ( kg N<sub>2</sub>O – N x Kg N año<sup>-1</sup>)

$PCG$  = Potencial de Calentamiento Global N<sub>2</sub>O

$\frac{44}{28}$  = Conversión de emisiones N<sub>2</sub>O – N a emisión de N<sub>2</sub>O

Los datos utilizados para el uso de fertilizantes sintéticos en la Agricultura para períodos históricos se obtuvieron de ODEPA, con base en los datos de importación de fertilizantes que proporciona por el Servicio Nacional de Aduanas.

### 2.2.5 3.F Quema de residuos Agrícolas en Campo

Esta categoría considera las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>) generadas por la quema de residuos en campo, considerando la superficie cultivada de Cereales y otros Cultivos y Huertos Frutales. Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_T = \sum (A_i * M_i * C * FE_k * PCG_j * 10^{-3})$$

$E_T$  = Emisiones Totales a causa del fuego (MMtCO<sub>2</sub>eq año<sup>-1</sup>)

$A_i$  = Superficie quemada del cultivo  $i$

$M_i$  = Masa de combustible disponible para combustión del cultivo  $i$  (ton ha<sup>-1</sup>)

$C$  = Factor de Combustión

$FE_k$  = Factor de emisión de materia seca quemada Residuos Agrícolas (g kg<sup>-1</sup>)

$PCG_j$  = Potencial de Calentamiento Global para el Gas  $j$

Los datos de superficie de Cereales y otros Cultivos y Huertos Frutales, fueron obtenida de los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Los factores de emisión corresponden a Nivel 1.

### 2.2.6 3.G Encalado

Corresponden a las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el uso de calcita y dolomita en los suelos agrícolas, que al disolverse liberan carbonatos (2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), para el control del pH de suelos. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_T = \sum \left( M_i * FE_i * 10^{-6} * \left( \frac{44}{12} \right) \right)$$

$E_T$  = Emisiones Totales a por la aplicación de enmiendas cálcicas (MMtCO<sub>2</sub>eq año<sup>-1</sup>)

$M_i$  = Cantidad anual del tipo de enmienda  $i$  (ton año<sup>-1</sup>)

$FE_i$  = Factor de emisión del tipo de enmienda  $i$  (ton de C)

$\frac{44}{12}$  = Conversión de emisiones C<sub>2</sub>O – C a emisión de C<sub>2</sub>O

Los datos de actividad provienen de información entregada por el sector privado sobre estimaciones de producción y venta, sumado a los datos de importación proporcionados por el Servicio Nacional de Aduanas.

### **2.2.7 3.H Aplicación de urea**

Estima las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producto de la aplicación de Urea a los suelos cultivados, a través de la pérdida de CO<sub>2</sub> que se fija en el proceso de producción industrial, pasando de urea (C(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>), en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), ion Hidroxilo (OH<sup>-</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_T = M_U * FE_U * 10^{-6} * \left(\frac{44}{12}\right)$$

$E_T$  = Emisiones Totales por aplicación de urea (MMtCO<sub>2</sub>eq año<sup>-1</sup>)

$M_U$  = Cantidad anual de Úrea aplicada (ton año<sup>-1</sup>)

$FE_U$  = Factor de emisión para urea (ton de C)

$\frac{44}{12}$  = Conversión de emisiones C<sub>2</sub>O – C a emisión de C<sub>2</sub>O

Los datos de actividad utilizados para el uso de urea en la Agricultura para períodos históricos se obtuvieron de ODEPA, estimado en base en los datos de importación y exportación de urea que proporciona por el Servicio Nacional de Aduanas, generando una estimación del consumo aparente.

## **2.3 Modelos de proyección categorías principales**

Se estima que aproximadamente el 80% de las emisiones del Sector Agricultura, provienen principalmente de las emisiones asociadas al ganado bovino (55,8%), ganado porcino (12,3%), Aves de corral (2,8%) y Fertilizantes Inorgánicos (12%), en base a los datos del año 2018, por lo que se realizó un análisis en mayor profundidad para la proyección de datos de actividad de dichas categorías, explicadas en detalle en la siguiente sección.

### **2.3.1 Modelos de Stock de ganado**

Para la estimación de ganado bovino, se revisaron distintas experiencias, entre ellas, el Informe Final Proyección Escenario Línea Tendencial 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Silvoagropecuario y Cambio de Uso de Suelo (Ministerio de Agricultura, 2014), el cual presentan un modelo de proyección de stock de ganado para Chile. A partir de lo revisado y considerando la información disponible, se exploraron distintos modelos de proyección, tanto de modelos autorregresivos como econométricos. Se seleccionaron los modelos con mayor significancia para cada uno de los distintos tipos de ganado.

#### **2.3.1.1 Ganado Bovino**

Para el ganado bovino se utilizó una regresión lineal simple, utilizando los datos de Población de Ganado Bovino obtenida de los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) considerando el periodo 1990-2016, y el Precio al Productor de Carne Bovina (CLP/ton) como variable explicativa. Para la proyección, se utilizó el Precio al Productor de Carne Bovina, que fueron obtenidos de la base de datos de Perspectivas Agrícolas 2021-2030, del repositorio de OECD-FAO<sup>2</sup>. Para la proyección posterior al 2030, se mantuvo la tasa de crecimiento del periodo 2021-2030 al 2050. El modelo para la estimación del ganado bovino es la siguiente:

$$\ln(\text{Cabezas de Ganado Bovino})_t = 19,20849 - 0,28633 \ln(\text{PrecioProductor})_t + e_t$$

Mayor detalle del análisis de los principales drivers para la proyección de ganado porcino, las pruebas de diagnóstico de normalidad de los residuos y homocedasticidad se encuentra en el ANEXO I: Parámetros estadísticos Regresiones Proyección Ganado.

---

<sup>2</sup> <https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?QueryId=107196&vh=0000&vf=0&l&il=&lang=en>

### 2.3.1.2 Ganado Porcino

Para la proyección del ganado Porcino, se utilizó una regresión lineal simple, utilizando los datos de Población de Ganado Porcinos obtenida de los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), considerando el periodo 1990-2016, y el Precio al Productor de Maíz (CLP/ton) como variable explicativa. Los Precios al Productor del Maíz fueron obtenidos desde la base de datos de OECD. Los datos utilizados para la proyección de Precios al Productor de Maíz (CLP/ton), fueron obtenidos de la base de datos de Perspectivas Agrícolas 2021-2030, del repositorio de OECD-FAO<sup>3</sup>. Para la proyección posterior al 2030, se mantuvo la tasa de crecimiento del periodo 2021-2030 al 2050. El modelo para la estimación del ganado porcino es la siguiente:

$$\ln(\text{Cabezas de Ganado Porcino})_t = 5,62765 + 0,79716 \ln(\text{Precio Maíz})_t + e_t$$

Mayor detalle del análisis de los principales drivers para la proyección de ganado porcino, las pruebas de diagnóstico de normalidad de los residuos y homocedasticidad se encuentra en el ANEXO I: Parámetros estadísticos Regresiones Proyección Ganado.

### 2.3.1.3 Ganado Aves de Corral

Para Aves de Corral, se utilizó una regresión lineal simple en base al Precio al Productor de Soya (CLP/ton). Se utilizó los datos de Población de Aves de Corral, obtenida de los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), considerando el periodo 1990-2016. Los Precios al Productor de la Soya fueron obtenidos desde la base de datos de OECD. Los datos de proyección de Precios al Productor de la Soya (CLP/Ton), fueron obtenidos de la base de datos de Perspectivas Agrícolas 2021-2030, del repositorio de OECD-FAO<sup>4</sup>, para la proyección se mantuvo la tasa de crecimiento

---

<sup>3</sup> <https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?QueryId=107196&vh=0000&vf=0&l&il=&lang=en>

<sup>4</sup> <https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?QueryId=107196&vh=0000&vf=0&l&il=&lang=en>

del periodo 2021-2030 al 2050. El modelo para la estimación de las Aves de Corral es la siguiente:

$$\ln (\text{Cabezas Aves de Corral})_t = 13,44632 + 0,34684 \ln (\text{Precio Soya})_t + e_t$$

Mayor detalle del análisis de los principales drivers para la proyección de ganado porcino, las pruebas de diagnóstico de normalidad de los residuos y homocedasticidad se encuentra en el ANEXO I: Parámetros estadísticos Regresiones Proyección Ganado.

### **2.3.2 Modelo Fertilizante Inorgánico**

Para estimar la proyección futura de consumo de nitrógeno inorgánico de uso agrícola, se utilizó el enfoque utilizado por el proyecto MAPS (Ministerio de Agricultura, 2014), a través de la suma del consumos unitarios (dosis convencional (Kg N/ha)) por cultivo por superficie del tipo de cultivo, considerando las dosis por tipo de cultivos (Ulibarry, 2019).

$$\text{Consumo (Kg N)} = \sum_i \left( \text{Dosis Unitaria}_i \left( \frac{\text{Kg N}}{\text{ha}} \right) \times \text{Superficie Cultivo}_i (\text{ha}) \right)$$

Se realizó la estimación de superficie de cultivos según datos históricos en base a los Censos Agropecuarios y Forestales 1997 y 2007, de las estadísticas anuales o bienales publicadas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). La superficie futura por diferentes tipos de cultivo se estimó en base a su tendencia histórica (1990-2018) y se proyectó hasta 2030, manteniendo constante el valor del último año hasta el 2050.

### **2.3.3 Modelo de Proyección categorías menores**

Para la proyección de los datos de actividad para el resto de las categorías menores, se proyectó utilizaron los siguientes métodos de estimación.

### 2.3.3.1 Quemas de Residuos Agrícolas en Campo

Para la estimación de emisiones GEI de Quemas de Residuos Agrícolas en Campo provenientes de la superficie de Cereales y Otros cultivos, para el periodo 2019-2050, se mantuvo el valor del último año de Biomasa Total (ton MS/año) anual para dicha categoría, conteniendo constante el dato del último año (2018). Para la proyección de Biomasa de Frutales (ton/año) para el mismo periodo de proyección, se utilizó una regresión logarítmica en base a la tendencia histórica, considerando la Biomasa Frutal del periodo (1990-2016).

$$Biomasa\ Frutal\ (Kg\ MS) = -0,218 * \ln(año - 1990) + 0,9189 * 1000000$$

### 2.3.3.2 Superficie Cultivo de arroz

Para la proyección de la superficie de Cultivo de arroz para el periodo 2019-2050, se utilizó a una Regresión logarítmica Simple en base a la tendencia histórica, considerando como base la superficie del periodo 1990-2016.

$$Cultivo\ de\ arroz(ha) = -3020 \times \ln(año - 1989) + 33602$$

### 2.3.3.3 Encalado

Para la proyección de uso de cal y dolomita, se mantuvo el valor de último año al 2050.

### 2.3.3.4 Otras categorías de ganado

Para la proyección de Avestruces y Emúes, Ciervos, Camélidos, Equinos y Ovinos se mantuvo el valor de último año al 2050. Para Camélidos, Equinos y Caprinos, se multiplicó la diferencia del rezago del año anterior y previo al anterior, por un coeficiente de decaimiento del 90%, según la siguiente ecuación:

$$StockGanado_{jt} = StockGanado_{t-1} + FD * (StockGanado_{t-1} - Stock\ Ganado_{t-2})$$

$$StockGanado_{jt} = N^{\circ}\ de\ cabezas\ del\ gando\ j\ en\ el\ tiempo\ t$$

$$FD = Factor\ de\ decaimiento$$

### 2.3.3.5 Aplicación Urea

Para la proyección de cantidad de urea anual, se utilizó una ecuación cuadrática en base a la tendencia histórica del periodo 1990-2016.

$$\begin{aligned} \text{Cantidad anual de Úrea aplicada (ton año}^{-1}\text{)} = \\ -0,1106 \times (\text{año} - 1989)^2 + 11,53(\text{año} - 1989) + 165,06 \end{aligned}$$

## 2.4 Medidas de mitigación para el Sector Agricultura

Se seleccionaron medidas de mitigación para el sector Agricultura en base a las acciones consideradas en el estudio “Chilean NDC mitigation Proposal: Methodological Approach and Supporting Ambition”, elaborado por el Comité Científico para la COP25, y una selección levantadas en instancias de proceso participativos en el contexto del proyecto “Apoyo a la elaboración de la Estrategia Climática de Largo Plazo para alcanzar la carbono neutralidad al 2050 ” en las mesas de trabajo para el Sector Agricultura. (Benavides et al., 2021). Se caracterizaron técnica y económicamente 9 medidas de mitigación, evaluando su Costo de Abatimiento unitario (USD/tCO<sub>2</sub>eq), potencial de reducción (MtCO<sub>2</sub>eq) y creación de empleo (N° empleos).

El costo de abatimiento unitario (CA), se estimó a través de la sumatoria del CAPEX<sub>t</sub><sup>5</sup> anual, que corresponde valor presente de los gastos de Capital adicionales para la implementación de la medida, a una tasa de descuento del 6% (tasa social utilizada para proyectos de inversión pública (Sistema Nacional de Inversiones, 2021) y la sumatoria del OPEX<sub>t</sub><sup>6</sup> anual, que corresponde al de los gastos de operación adicional para la implementación de la medida, dividido por las reducciones de GEI ( $E_t$ ) para el tiempo  $t$ , para este caso:

$$CA(USD/tCO_2eq) = \sum_{t=ti}^T \left( \frac{\Delta CAPEX_t}{(1+r)^{t-ti}} + \frac{\Delta OPEX_t}{(1+r)^{t-ti}} \right) / \sum_{t=ti}^T \Delta E_t$$

El potencial de mitigación, es decir de reducción de emisiones para el periodo 2050 en toneladas de CO<sub>2</sub>eq, corresponde a la diferencia de emisiones entre el escenario de tendencias actuales, y el escenario de mitigación para cada medida respectiva aplicada para el periodo antes mencionado. La creación de empleo (N° empleos totales)

---

<sup>5</sup> Abreviación de Capital Expenditure

<sup>6</sup> Abreviación de Operational Expenditure

mediante modelo Macroeconómico MEMO<sup>7</sup> (Antosiewicz & Kowal, 2016), que se estima en base al CAPEX y OPEX para cada medida. En la Tabla 1, se presenta un breve resumen de cada una de las medidas, para mayor detalle sobre supuestos se han elaborado fichas descriptivas en el Anexo II: Medidas de Mitigación.

**Tabla 1 Descripción de las Medidas de mitigación consideradas en el análisis.**

Nombre medida	Descripción de la Medida
Cambio de Dieta Bovina	Aplicación de aditivo lipídico en alimento concentrado de ganado bovino lechero, para la disminución de las emisiones de metano en el proceso de fermentación entérica. Medida considera que se aplique a un 70% de la población bovina lechera al 2037, empezando el 2030.
Biodigestores de Purines Porcinos	Implementación de Biodigestores para purines porcinos, disminuyendo las de emisiones de metano, llegando a un 70% de las cabezas Porcinas al 2040.
Uso eficiente del Fertilizante	Disminución del uso de fertilizantes nitrogenados agregados a cultivos, a través de mejoras en la utilización, reduciendo las emisiones de Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O), considerando una reducción del 11% en la intensidad de uso al 2040 para ciertos cultivos.
Aplicación de Enmiendas orgánicas	Aumento en la captura de carbono en suelos producto de la aplicación de enmiendas orgánicas (guano de aves de corral) aplicadas en suelos de cereales, partiendo la implementación el año 2029, llegando a un 10% de la superficie al 2034, y manteniéndose constante hasta el 2050. Se consideran las emisiones asociadas al contenido de nitrógeno.

---

<sup>7</sup> Modelo ejecutado en colaboración por parte del profesor Luís González (CLAPES UC), en base a insumos de CAPEX y OPEX por medida.

Manejo Holístico de Ganado	de	Enfoque que busca optimizar la toma de decisiones, equilibrando consideraciones sociales, ambientales y financieras, regulando la planificación, monitoreo, control y replanificación de praderas y carga animal, mejorando la productividad de praderas, aumentando los contenidos de materia orgánica en suelos. La captura de carbono se produce por un aumento de los contenidos de materia orgánica en suelos. 20% Superficie Pastoreo de Ganado bovino en la Región de los Lagos al 2035, comenzando el 2030.
Biodigestores de Purines Bovinos		Implementación de Biodigestores para purines Bovinos, disminuyendo las emisiones de metano en la gestión del estiércol llegando a un 80% de las cabezas al 2037 (manteniéndose constante al 2050), comenzando el año 2030.
Reducción de quemas agrícolas.	de quemas	Reducción de la superficie agrícola en la cual se realizan quemas agrícolas, llegando a reducir un 80% de la superficie quemada actual al 2029, comenzando el 2025.
Planta de Producción Biocarbón		Implementación de una planta de Biocarbón de residuos vegetales y posterior aplicación del biocarbón en suelos agrícolas. La planta comienza a operar el 2025.
Impuesto a la Carne		Impuesto de 10% al consumidor en carnes, afectando el % de producción nacional, desde el 2022.

---

## 2.5 Priorización de medidas de mitigación para el sector Agricultura

Para llevar a cabo una priorización de medidas de mitigación para el sector se ha llevado a cabo un Análisis de Decisión Multicriterio, a través del Proceso Analítico Jerárquico, el que se describe a continuación. Para la determinar la ponderación de criterios y subcriterios, se realiza una encuesta a expertos sectoriales desde el Sector Público y

Academia. Se evalúan medidas de mitigación y posteriormente se realiza análisis de las diferencias entre la priorización mediante Análisis de Decisión Multicriterio versus la Curva de Costos Marginales de Abatimiento (Curvas MACC), detallados en las secciones siguientes.

### **2.5.1 Curvas de Costos de Abatimiento Marginal (MACC)**

Las Curvas de Costos de Abatimiento Marginales (MACC, por sus siglas en inglés), permiten representar la relación entre la costo-efectividad y el potencial de abatimiento de cada distintas opciones de mitigación, ordenadas en orden ascendentes en relación a los costos (Bockel et al., 2012), generalmente diseñadas a través de un gráfico de “barras” o “histograma”, en el cual el eje de las abscisas representa el potencial de abatimiento (MtCO<sub>2</sub>eq), y el eje Y de las ordenadas, representa el costo de abatimiento, expresado generalmente en \$USD/tCO<sub>2</sub>eq. Las medidas se encuentran ordenadas de izquierda a derecha, de acuerdo con el costo-efectividad de manera ascendente, permitiendo facilitar la interpretación de las opciones analizadas. Se utilizó el tipo de gráfico (Curvas MACC) para la comparación medidas de mitigación.

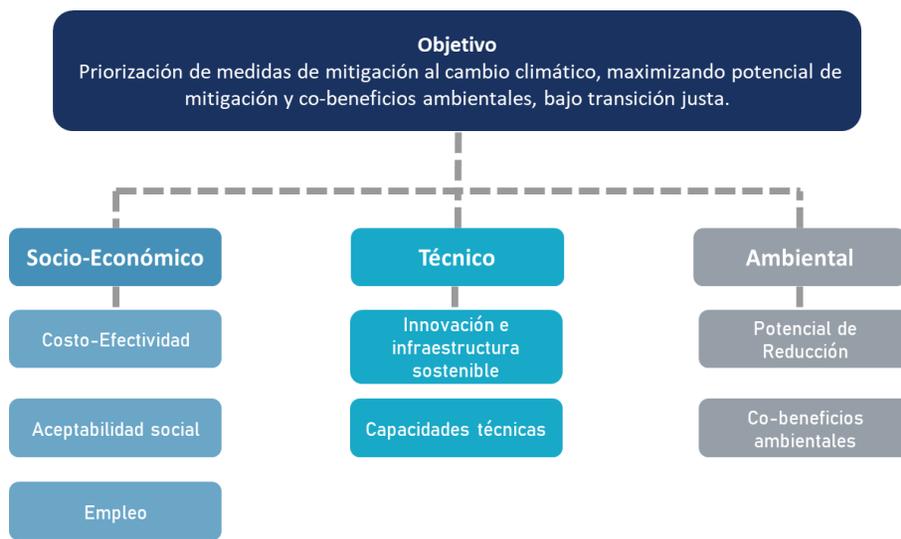
### **2.5.2 Análisis de Decisión Multicriterio mediante Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

Se utilizó el método Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) propuesto por Saaty (Saaty, 1977), en combinación con método SMART (Simple Multi-attribute Rating Technique) y el método MAUT (Multi-attribute Utility Theory) como parte de los métodos de Análisis de Decisión Multi-Atributo (MADM, por sus siglas en inglés), para la selección y/o priorización de la mejor alternativa de mitigación. (Alinezhad & Khalili, 2019). El método AHP facilita la toma de decisiones cuando existen múltiples criterios o atributos, esto mediante la descomposición en una estructura jerárquica. Lo que permite subdividir un atributo complejo en uno más sencillo, y determinar cómo influyen cada uno de estos atributos en el objetivo de decisión a través de la asignación de valores que se atribuye a cada uno de los subcriterios (Berumen & Redondo, 2007).

El AHP permite tomar decisiones entre múltiples alternativas o generar un ranking entre ellas al comparar la relevancia de elementos cualitativos y/o cuantitativos. Se siguieron los siguientes pasos:

**1. Definición del Modelo Jerárquico para la toma de decisiones con AHP:**

Implica la definición del objetivo, identificación de los criterios y subcriterios, y finalmente identificación de las alternativas a evaluar. El objetivo se definió en base a una revisión de los compromisos climáticos internacionales y sinergias con ODS, como parte de los compromisos. La definición de criterios y subcriterios se realizó sobre la base de una revisión bibliográfica (fundamentos de la definición en Anexo III: Definición de Objetivo y fundamentos elección criterios y subcriterios de Análisis de Decisión Multicriterio), juicio experto e información levantada bajo proceso participativo en el marco del proyecto “Apoyo a la elaboración de la Estrategia Climática de Largo Plazo para alcanzar la carbono neutralidad al 2050” (Benavides et al., 2021). El modelo jerárquico propuesto se muestra en la Figura 2 y la descripción de cada una los criterios y subcriterios se muestra en la Tabla 2.



**Figura 2 Modelo Jerárquico para la toma de decisiones con AHP, definido para la priorización de medidas de mitigación al cambio climático**

Para cada uno de los subcriterios se realizó una definición de los conceptos como se muestra en la Tabla 2

**Tabla 2 Definición de Subcriterios para el Modelo Jerárquico para la toma de decisiones**

Criterio	Subcriterio	Definición
Socio-económico	Costo-Efectividad	Se refiere al costo unitario de reducción de una USD/tCO <sub>2</sub> eq bajo el periodo analizado.
	Aceptabilidad social	Se refiere a nivel de aprobación de las comunidades locales como de los individuos afectados producto de la implementación de la medida.
	Empleo	Se refiere a la generación de empleo producto de la implementación de la medida.
Técnico	Innovación	Se define como el aporte en innovación al sector (entendemos

---

			<p>por innovación por cambio que introduce novedades, modificando elementos ya existentes con el fin de mejorarlos o implementando elementos totalmente nuevos).</p>
	Capacidades técnicas		<p>Se refiere a la existencia de capacidades técnicas relacionadas con la disponibilidad de la tecnología, de los expertos, y también del conocimiento práctico.</p>
	Facilidad de implementación	de	<p>Se refiere a la capacidad de implementación en el contexto del público objetivo al cual se quiere llegar, considerando la atomización del rubro al cual afecta.</p>
Ambiental	Potencial de Mitigación	de	<p>Se define como el potencial de reducción en tCO<sub>2</sub>eq total considerados en el periodo analizado (2019-2050).</p>
	Co-beneficios ambientales		<p>Se refiere al aporte transversal de beneficios ambientales, contribuyendo a la disminución de contaminantes locales, aumento de servicios ecosistémicos (favorece como una opción de Soluciones Basadas en Naturaleza), sinergias con adaptación, o reducción de olores.</p>

---

## 2. Determinación de coeficientes de Ponderaciones de Criterios y

**Subcriterios:** Se estableció la influencia (ponderación) de cada uno de los atributo (criterios y subcriterios) en la Matriz de Jerarquía para la toma de decisiones, mediante “comparación entre pares” entre un sub/criterios y otro, para cada uno de los criterios, según una Escala de Importancia de Saaty (que permite dar valores numéricos a juicios) como se muestra en la Tabla 3, a través de método del recíproco, que se detalla a continuación.

**Tabla 3 Escala de importancia de Saaty**

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

El método del recíproco supone una Matriz  $A$  de dimensión  $n \times n$  con los juicios relativos sobre los sub/criterios, y  $a_{ij}$  es el elemento  $(i, j)$  de  $A$ , para  $i = (1, 2.. n)$  y  $j = (1, 2... n)$ , entonces la Matriz  $A$ , es una matriz de comparaciones pareadas de  $n$  sub/criterios, si  $a_{ij}$  es el nivel de intensidad de importancia del criterio de la fila  $i$  cuando se compara con la columna  $j$ . Cuando  $i=j$ , el valor de  $a_{ij}$ , es igual a , pues se está comparando el criterio consigo mismo.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz  $A$  cumple con la propiedad de reciprocidad, es decir, si  $A$  es una matriz de comparaciones pareadas, se cumple que  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ , para todas las  $i, j = 1, 2.. n$ .

Para el cálculo de representatividad por criterio, se calcula la matriz normalizada de la Matriz  $A$ , en el cual se divide el elemento  $a_{ij}$  por la suma de los resultados por columna de la Matriz  $A_{\text{normalizada}}$ .

$$A_{Normalizada} = \begin{bmatrix} 1/v_1 & a_{12}/v_2 \dots & a_{1n}/v_n \\ a_{21}/v_1 & 1/v_2 \dots & a_{2n}/v_n \\ a_{n1}/v_1 & a_{n2}/v_2 \dots & 1/v_n \end{bmatrix}$$

$$\text{Donde, } v_1, v_2 \dots v_n = \sum_{i=1}^n a_j$$

Una vez calculada la Matriz  $A_{Normalizada}$ , se calcula el promedio de  $a_i$ , generando el vector columna  $P$ . Este valor corresponde a la ponderación del sub/criterio en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

$$P_j = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{2j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{nj} \end{bmatrix}$$

Adicionalmente, es necesario comprobar consistencia de las respuestas para cada Matriz. Para esto, se utiliza la Razón de Consistencia (RC), que es la razón entre el Índice de Consistencia (IC) y el Índice de Aleatoriedad (IA)

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Para el cálculo del Índice de Consistencia (IC), se debe considerar la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{(n_{max} - n)}{(n - 1)}$$

$n_{max}$  = a la suma de la matriz producto entre  $P$  y la Matriz  $A$ .

$n$  = dimensión Matriz

Para el cálculo de la Razón de Consistencia (RC), se debe considerar la siguiente ecuación.

$$IA = \frac{1.98 (n - 2)}{n}$$

Se considera que la consistencia del encuestado es aceptable cuando la RC es <10%. Este valor está sujeto a la dimensión de la matriz de Jerarquías (Matriz A); es decir, del mismo número de elementos que se comparan para completar la matriz. El resultado de este paso, se obtiene el Modelo Jerárquico ponderado para cada uno de los criterios y subcriterios para la toma de decisiones.

**3. Evaluación de las medidas de mitigación bajo cada subcriterio:** Para la asignación de un puntaje o nota, de cada una de las medidas de mitigación analizadas respecto a cada uno de los subcriterios, se utilizó las siguientes metodologías:

a. En el caso de los subcriterios **cuantitativos**, se utiliza el método de la **Teoría de Utilidad de Atributos Múltiples** (MAUT, por sus siglas en inglés), para llevar a una métrica común los valores de cada subcriterio para cada una de las medidas. Método MAUT, fue introducida por y Keeney and Raiffa in 1976 (Alinezhad & Khalili, 2019), y permite la evaluación de cada alternativa para un cierto criterio. Se aplica cuando los datos están disponibles y representativos de la escala a evaluar. Este método se apoya sobre la teoría económica de utilidades, representado en la función de utilidad:

$$U_{i,j} = a_i \times p_{i,j} + b_i$$

Donde:  $a_i$  y  $b_i$  para el subcriterio  $i$  tienen un valor tal que la peor nota sea 0 y la mejor nota sea 100.

$p_{i,j}$  el valor cuantitativo en escala original de la alternativa de estrategia  $j$  bajo el subcriterio  $i$ .

b. En el caso de los subcriterios **cualitativos**, se utiliza el método de **Teoría Simple de Clasificación de Atributos** (SMART, por sus siglas en inglés), propuesta por Winterfeldt & Edwards (Edwards & Barron, 1994), valorizando las puntuaciones en base a evaluación

expertos. En cada caso, el experto evalúa el resultado  $p_{i,j}$  de una alternativa  $j$  bajo un subcriterio  $i$ , otorgando un puntaje entre 1 a 7, siendo 1 el peor puntaje y 7 la mejor. Luego ese puntaje se transforma utilizando la función del método MAUT, quedando en la misma escala de 0 a 100, pudiendo obtener un puntaje máximo de 100 y mínimo de 0.

Para cada uno de los subcriterios definidos, cuando la información es objetiva, medible y disponible se utilizó la metodología MAUT, y aquellos que no se contó con información se utilizó método SMART, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4 Método de evaluación (MAUT o SMART) y Unidad de medida para cada Subcriterio del Modelo de Jerarquías a través del AHP.**

Subcriterio	Unidad de medida / Dato de Apoyo a notación	Método de Evaluación
Costo-Efectividad	USD/tCO <sub>2</sub> eq	MAUT
Aceptabilidad social	Escala de 1 a 7, donde 1 es bajísimo y 7 es altísimo	SMART
Empleo	N° Empleos totales en periodo 2019-2050	MAUT
Innovación	Escala de 1 a 7, donde 1 es bajísimo y 7 es altísimo	SMART
Capacidades técnicas	Escala de 1 a 7, donde 1 es bajísimo y 7 es altísimo	SMART
Facilidad de implementación	Escala de 7 a 1, donde 7 es bajísimo y 1 es altísimo	SMART
Potencial de Mitigación	MtCO <sub>2</sub> eq en periodo 2019-2050	MAUT
Co-beneficios ambientales	Escala de 1 a 7, donde 1 es bajísimo y 7 es altísimo.	SMART

### **2.5.3 Proceso de ponderación de Matriz de Jerarquías y Evaluación de Medidas, mediante entrevista a Expertos.**

Para definir la importancia relativa, es decir la definición de los “pesos” o “ponderación” de cada uno de cada subcriterio y criterio en el Modelo de Jerarquías, se llevaron a cabo 7 entrevistas a dos grupos de actores expertos en emisiones del Sector Agricultura, sector público (1) y Academia (2), y posterior evaluación de los subcriterios cualitativos. La encuesta constó de dos procesos principales:

- 1. Determinación de los pesos relativos de cada subcriterio y criterio:** Mediante una “comparación entre pares” entre los subcriterios y criterios, el encuestado determina la importancia relativa a través de la escala de Saaty (aplicando la metodología mencionada en la sección), lo que se obtiene como resultado, una ponderación de cada subcriterio a la Matriz de Jerarquía. Se realizó un análisis diferenciado por grupo de actor (Sector Público y Academia), y se promedió el peso relativo de todas las respuestas para cada criterio y subcriterio obtenidos durante la entrevista, generando la Matriz de Jerarquías final para ambos grupos, como también un promedio considerando todos los actores.
- 2. Evaluación de Medidas:** Mediante las entrevistas, se solicitó evaluar cada una de las medidas de mitigación analizada en el estudio, según los criterios previamente priorizados (solo aquellos cualitativos), mediante la calificación del nivel o escala de puntuación para el subcriterio. Por ejemplo, para el subcriterio Co-Beneficios Ambientales, cada experto debió calificar la existencia relativa de co-beneficios ambientales para cada una de las medidas analizadas, tal como se muestra en la Figura 3.

Se realizó un análisis diferenciado por grupo de actor (Sector Público y Academia), promediando la calificación entregada por cada experto durante la encuesta, obteniendo una calificación promedio para cada medida, en cada uno

de los subcriterios cualitativos de la matriz de Jerarquía, como también un promedio considerando todos los actores.

Evaluación de Criterios Ambientales

**Co-beneficios ambientales:**

Califique la existencia co-beneficios ambientales, referido al aporte transversal de beneficios ambientales, como por ejemplo, disminución de contaminantes locales, aporte en servicios ecosistémicos, sinergias con adaptación o que favorece como una opción de Soluciones Basadas en Naturaleza (SBN).

Medidas de Mitigación	Bajísimo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Altísimo
1 Cambio Dieta Bovina							
2 Uso eficiente del Fertilizante							
3 Biodigestores de Purines Porcinos							
4 Aplicación de Enmiendas Orgánicas							
5 Impuesto a la Carne							
6 Manejo Holístico de Ganado							
7 Biodigestores de Purines Bovinos							
8 Reducción de Quemadas Agrícolas							
9 Planta de Producción Biocarbón							

**Figura 3** Planilla ejemplo de Evaluación Cualitativa de Medidas para el Subcriterio Co-beneficios Ambientales, del Criterio Ambiental de la matriz de decisión.

**2.5.4 Ranking de medidas de mitigación mediante Análisis de Decisión Multicriterio**

Una vez generadas las Matriz de Jerarquía para la toma de decisiones por grupo de actor, y la evaluación cualitativa y cuantitativa de cada de las medidas, se obtiene un valor para cada medida  $j$  ( $V_j$ ), a través de la sumatoria de la multiplicación del valor ponderado ( $P_{ij}$ ) de cada subcriterio de la Matriz de Jerarquías, por el puntaje obtenido de la medida para ese subcriterio ( $U_{ij}$ ), siendo la medida con mayor puntaje la mejor evaluada, y la de menor puntaje, la peor evaluada, generando una lista priorizada de medidas.

$$V_j = \sum (P_{ij} \times U_{i,j})$$

Para la generación del ranking de los grupos de actores, se promedió el valor ponderado de los pesos para cada uno de los subcriterios por grupo de actor. Se realizó el mismo ejercicio para el análisis del promedio total.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio estimó las emisiones históricas para cada una de las categorías del sector Agricultura en Chile para el periodo 1990-2018, y proyección de los datos de actividad de las principales categorías emisoras al 2050, con el objetivo de estimar un potencial de mitigación bajo una serie de medidas de mitigación, y definición de un escenario de mitigación. Se analiza adicionalmente un escenario plausible en base a la consideración de costos de abatimiento de las medidas.

Adicionalmente, se realiza una priorización de medidas de mitigación mediante un Análisis de Decisión Multicriterio como herramienta para la toma de decisiones, y se compara con las Curvas de Costos Marginales de Abatimiento.

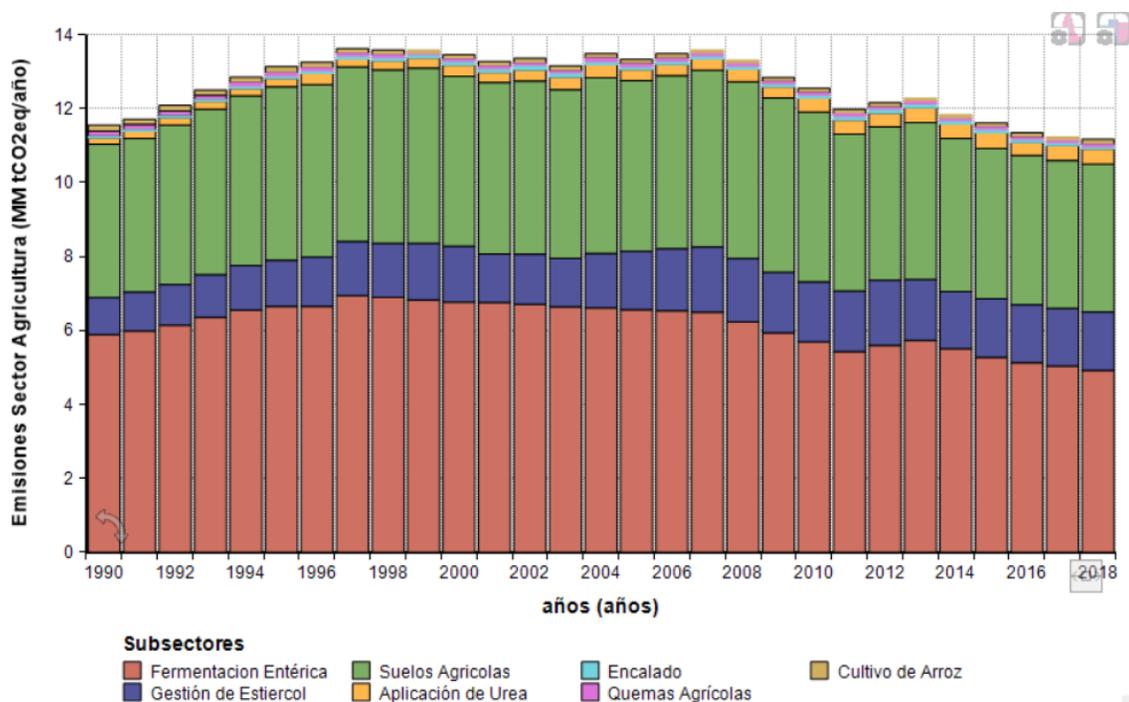
#### 3.1 Modelo de estimación de emisiones del Sector Agricultura Histórico

Las emisiones históricas del Sector Agricultura representan aproximadamente un 10,6% de las emisiones totales a nivel nacional (2018, según último año del INGEI 2020). Los resultados entregados por el modelo desarrollando en Analytica, se muestra en la Tabla 5. La categoría que aporta mayores emisiones GEI para el último año de estimación (2018), corresponde a Fermentación entérica, con un 44% de las emisiones totales, seguido por Suelos Agrícolas, con un 35,85%, y Gestión del Estiércol, contribuyendo con un 14%, solo estas 3 categorías aportan alrededor de un 93,9% de las emisiones totales del sector. Luego, las emisiones asociadas a la categoría Aplicación de urea, cultivo de arroz, Encalado, y Quemas de Residuos Agrícolas, aportan con un 3,64%, 1,33%, 0,64% y 0,4%, respectivamente.

Tabla 5 Estimación de emisiones mediante Modelo en MtCO<sub>2</sub>eq por año.

Categorías	1990	2000	2010	2016	2018
3.A Fermentación Entérica	5,88	6,77	5,69	5,13	4,92
3,B Gestión de Estiércol	1,00	1,50	1,61	1,56	1,58
3.C Cultivo de Arroz	0,16	0,13	0,12	0,13	0,15
3.D Suelos Agrícolas	4,15	4,60	4,60	4,04	4,01

3.F Quemadas Agrícolas	0,15	0,09	0,05	0,03	0,04
3.G Encalado	0,03	0,06	0,09	0,09	0,08
3.H Aplicación de Urea	0,17	0,30	0,38	0,36	0,41
<b>Total</b>	<b>11,55</b>	<b>13,46</b>	<b>12,55</b>	<b>11,34</b>	<b>11,17</b>



**Figura 4 Distribución anual de emisiones estimadas, según categorías del sector Agricultura, mediante Modelo, en MtCO<sub>2</sub>eq por año.**

Al comparar las emisiones estimadas a través del modelo desarrollado en Analytica, con el INGEI 1990-2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), las emisiones difieren levemente, principalmente por actualizaciones en la metodología, factores de emisión y ajustes en los datos de actividad (como se puede ver en la Tabla 6). La categoría que presenta mayor subestimación corresponde a la categoría Suelos Agrícolas, con una diferencia promedio de un 15% para el último año utilizado. Esta diferencia corresponde

al Factor de Emisión (País específico<sup>8</sup>) utilizado para un grupo de regiones dominados por cenizas volcánicas en suelos (Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos), en comparación para el resto de las regiones que utilizan los valores de Factor de Emisión por defecto de las *Directrices del IPCC 2006*, siendo este último utilizado en el modelo desarrollado. La categoría que presenta una mayor sobrestimación corresponde a la categoría Gestión del Estiércol (5% para el último año), que corresponde principalmente a una actualización del Factor de emisión del ganado Bovino lechero, los factores de emisión utilizados en el modelo Analytica, corresponden a los factores de emisión utilizados en el INGEI – 2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2018). La categoría que presenta mayor variabilidad de sobre y subestimación, corresponde a la categoría Quemadas de Residuos Agrícolas, con una sobrestimación de un 30% para el último año, y además presenta subestimación para los años intermedios, sin embargo, se consideran poco relevantes dado su aporte en el total de emisiones para el sector.

**Tabla 6 Comparación de emisiones estimadas (Analytica) v/s INGEI (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a) de GEI en MtCO<sub>2</sub>eq Sector Agricultura por categoría.**

	1990		2000		2010		2016		2018	
	Estim.	INGEI								
<b>Fermentación Entérica</b>	5,88	6,01	6,77	6,79	5,69	5,70	5,13	5,18	4,92	4,97
<b>Gestión de Estiércol</b>	1,00	0,85	1,50	1,33	1,61	1,53	1,56	1,50	1,58	1,50
<b>Cultivo de Arroz</b>	0,16	0,16	0,13	0,01	0,12	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15
<b>Suelos Agrícolas</b>	4,15	4,49	4,60	5,02	4,60	5,05	4,04	4,58	4,01	4,70
<b>Quemas Agrícolas</b>	0,15	0,12	0,09	0,08	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03
<b>Encalado</b>	0,03	0,03	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
<b>Aplicación de Urea</b>	0,17	0,17	0,30	0,30	0,38	0,38	0,36	0,36	0,41	0,37
<b>Total</b>	11,55	11,83	13,46	13,59	12,55	12,92	11,34	11,88	11,17	11,79

<sup>8</sup> Especificados en la Sección 5.5.4.3.2 Factor de Emisión, del INGEI 2020, que considera un valor promedio de 0.0025 [kg N<sub>2</sub>O–N (kg N)<sup>-1</sup>], en comparación al valor por defecto para Tier 1 que considera un valor de 0.01 [kg N<sub>2</sub>O–N (kg N)<sup>-1</sup>].

## 3.2 Proyecciones Categorías Principales

La participación de las fuentes de emisiones principales corresponde a Ganado Bovino, con un 56,68% del total de emisiones del sector, seguido por Ganado Porcino con una participación de 12,3%, Fertilizantes Inorgánicos con una participación de 8,27% y Aves de corral con una participación del 2,89%, que en total representan el 80,14% de las emisiones totales para el año 2016<sup>9</sup>. La siguiente sección describe y discute los resultados de la proyección de los datos de actividad de estas categorías.

### 3.2.1.1 Ganado Bovino

Las cabezas de ganado bovino fueron proyectadas en base al precio de la carne (CLP/ton), considerando el total de stock de ganado, sin diferenciar ganado bovino de ganado lechero. Para la estimación de Vacas Lecheras, se mantuvo el porcentaje del total del ganado bovino considerando para el último año siendo este un 18% del total aproximadamente. Los resultados muestran una tendencia a la baja disminuyendo levemente un 9%, en el periodo 2019 al 2050, considerando 3.041.119 y 2.793.189 cabezas respectivamente (Modelo Econométrico en Figura 5). Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con 3 estudios a nivel nacional, como además con las estadísticas de FAO<sup>10</sup>, que han proyectado cabezas de ganado bovino al 2030 y 2050.

El estudio “Proyección de la Línea tendencial 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Silvoagropecuario y Uso y Cambio de Uso del Suelo”, como parte del estudio “Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático: resultados de Fase 2” (MAPS Chile, 2014), ha utilizado un modelo econométrico en base al rezago del stock del ganado (1961-2011), precio del maíz (1973-2010), precio de la carne bovina (1973-2010) y

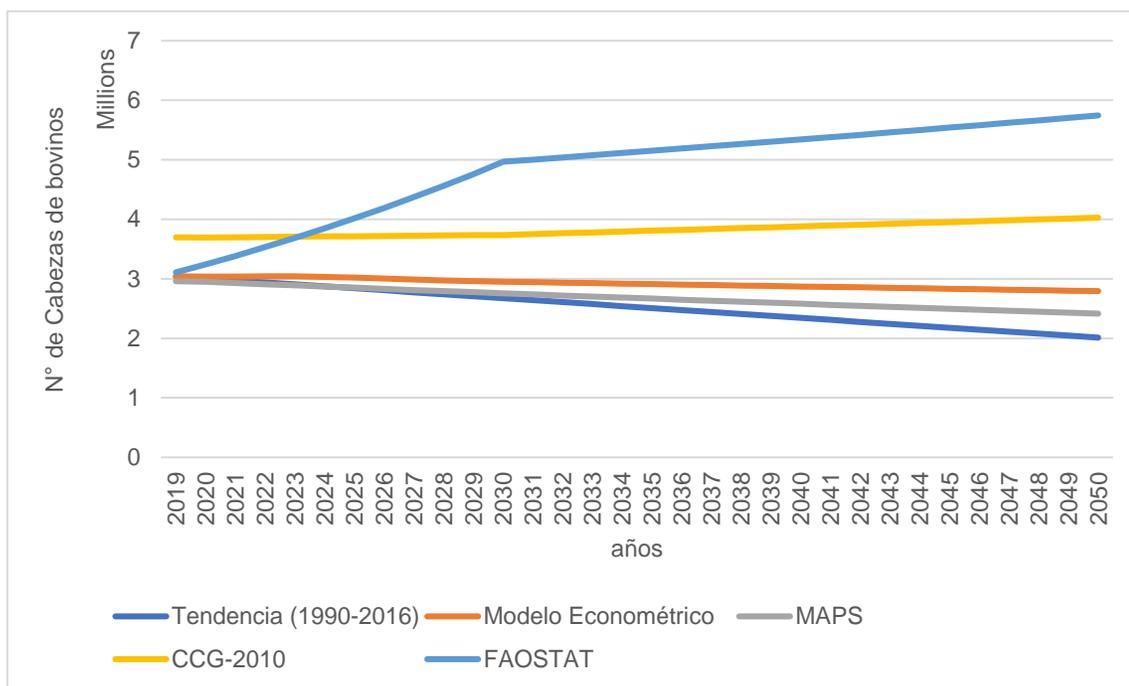
---

<sup>9</sup> Ganado ovino representa un 7.47% del total de emisiones del sector, pero su proyección no fue considerada en el análisis.

<sup>10</sup> <http://www.fao.org/faostat/en/#data/GE>

precio de la leche (1973-2010). Los resultados del estudio muestran una proyección a la baja del stock de cabezas de ganado al 2050 (MAPS en Figura 5).

El estudio “Análisis de opciones futuras de mitigación de GEI para Chile asociadas a programas de fomento en el sector silvoagropecuario” realizado por el Centro de Cambio Global UC el 2010, proyecta un leve aumento (CCG-2010, en Figura 5). Esta diferencia radica principalmente en la escasa información de línea de base considerada en el estudio, a partir de los Censos Agropecuarios de 1979, 1997 y 2007. En base a esta información se estimó una tasa de cambio de stock de ganado bovino anual regional ponderada, prevaleciendo en la ponderación la tasa de cambio anual del periodo 1997-2007 para reflejar la tendencia del último periodo, para el caso del ganado bovino para carne, y no para vacas lecheras, ya que se subestimó mucho, según lo indicó el gremio lechero. Para el caso de las vacas lecheras, se realizó una proyección de la producción regional en base a la recepción de leche, utilizando la tasa de crecimiento de producción del periodo 2002-2008. Se estimó el stock de vacas de leche en base al rendimiento promedio regional por la producción proyectada. Las proyecciones de FAOSTAT para el 2030 y 2050, se calculan con respecto a una línea base definida como el promedio de 2005-2007, y aplicando una tasa de crecimiento porcentual de estudios de FAO (FAO, 2021).



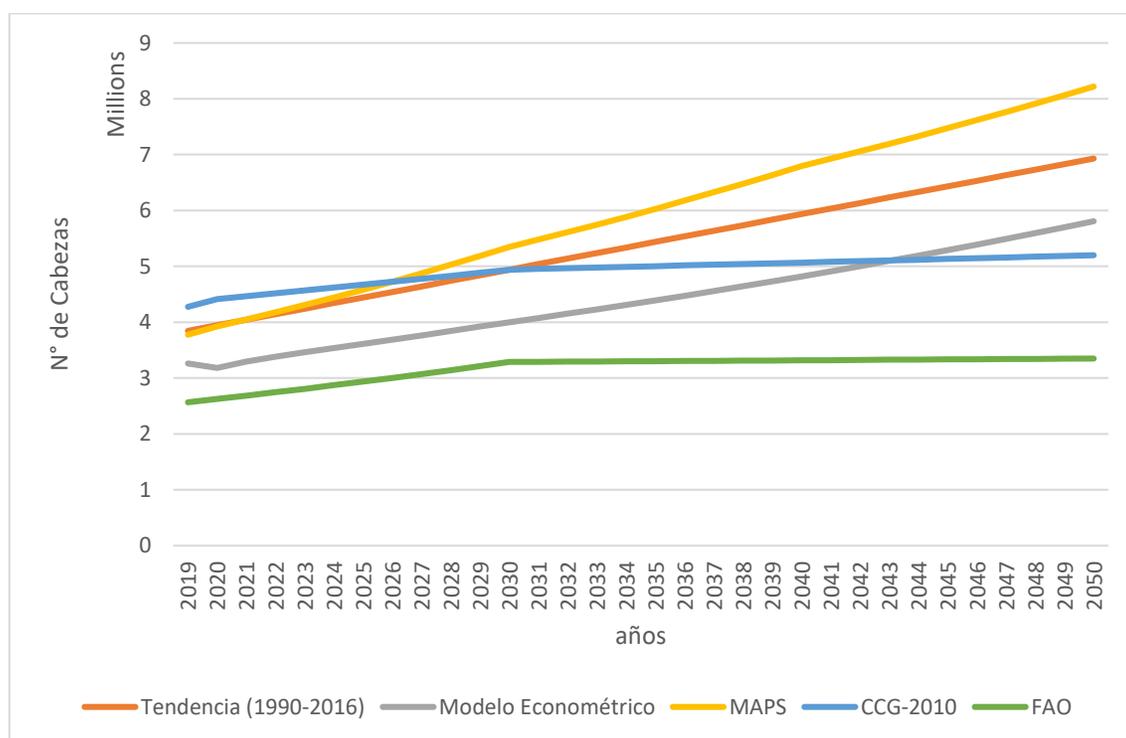
**Figura 5 Comparación de la proyección del Stock de ganado Bovino (N° de cabezas) en Chile al 2050**

Los resultados del Modelo Econométrico desarrollado para el presente estudio se asemejan a los resultados del Proyecto MAPS, posiblemente por basarse en un modelo econométrico, bajo drivers similares, sin embargo, a diferencia de MAPS, no se consideró el rezago del stock del ganado como lo hace dicho estudio. Los resultados de MAPS, son más conservadores en comparación con el estudio CCG, considerando su similitud con los resultados de la tendencia histórica (1990-2016).

Los resultados del estudio CCG-2010, presenta importantes diferencias. Es importante mencionar, que posterior al análisis de este estudio, el stock de ganado bovino ha disminuido en un 40%, pasando de 3.789.697 cabezas a 2.285.597 según los datos entregado por ODEPA (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a). La principal causa de esta disminución, se ha debido principalmente a los efectos de la crisis climática (sequía que afectaron al país), y económica, que generó una menor rentabilidad de los sistemas productivos, como resultado del alto costo de los insumos empleados en la producción (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

### 3.2.1.2 Ganado Porcino

Las cabezas de ganado Porcino fueron proyectadas en base al Precio al Productos del Maíz (CLP/ton). Los resultados muestran una tendencia al alza, aumentando considerablemente un 9%, en el periodo 2019 al 2050, con un total de 3.258.725 y 5.807.768 cabezas respectivamente (Modelo Econométrico en Figura 6). Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos, con 3 estudios a nivel nacional, como además con las estadísticas de FAO<sup>11</sup>, que han proyectado cabezas de ganado porcino al 2030 y 2050.



**Figura 6 Comparación de la proyección del Stock de ganado Porcino en Chile para el 2050, para diferentes estudios.**

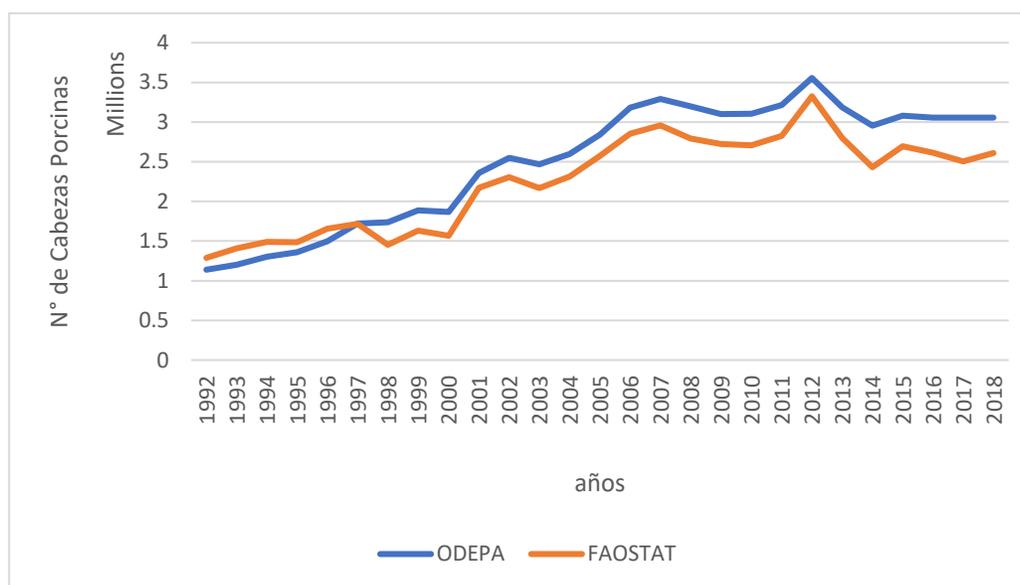
El estudio “Proyección de la Línea tendencial 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Silvoagropecuario y Uso y Cambio de Uso del Suelo”, como parte del estudio “Opciones

<sup>11</sup> <http://www.fao.org/faostat/en/#data/GE>

de mitigación para enfrentar el cambio climático: resultados de Fase 2” (MAPS Chile, 2014), ha utilizado un modelo econométrico en base al rezago del stock del ganado porcino (1961-2011), precio de la carne de cerdo (1973-2010) y el PIB (1973-2010). Los resultados del estudio muestran una fuerte proyección al alza del stock de cabezas de ganado porcino al 2050 (MAPS en la Figura 6).

El estudio “Análisis de opciones futuras de mitigación de GEI para Chile asociadas a programas de fomento en el sector silvoagropecuario” realizado por el Centro de Cambio Global UC el 2010, proyecta un leve aumento (CCG-2010, en Figura 6. Para el caso del ganado porcino, la proyección se realizó por medio de un modelo de Regresión logístico, considerando los datos de existencias nacionales de los últimos 25 años (1985-2010). Las proyecciones de FAOSTAT para el 2030 y 2050, se calculan con respecto a una línea base definida como el promedio de 2005-2007, y aplicando una tasa de crecimiento porcentual de estudios de FAO (FAO, 2021).

Los resultados del Modelo Econométrico, se ajusta de manera más cercana a los resultados del estudio CCG-2010, posiblemente debido a que el modelo utilizado en dicho estudio corresponde a un modelo de regresión logístico, que tiene a atenuar las diferencias al aumentar la proyección, generando una estabilización en el tiempo. Además, es relevante mencionar, que el modelo se construyó en base a las existencias para el periodo 1985-2010, a diferencia del proyecto MAPS, que basó sus proyecciones en el desarrolló un modelo econométrico. Este último consideró un periodo más amplio en las series históricas, pudiendo influenciar de manera importante la fuerte alza ocurrida en los últimos 10 años (40% de aumento entre 2000 al 2010, pasando de 1.868.054 cabezas a 3.106.161 respectivamente), con las variables econométricas. Las estimaciones de FAO probablemente son menos comparables, ya que existe una diferencia respecto a las series históricas entregadas por ODEPA, con un 14% para el 2016, como se ve en la Figura 7.

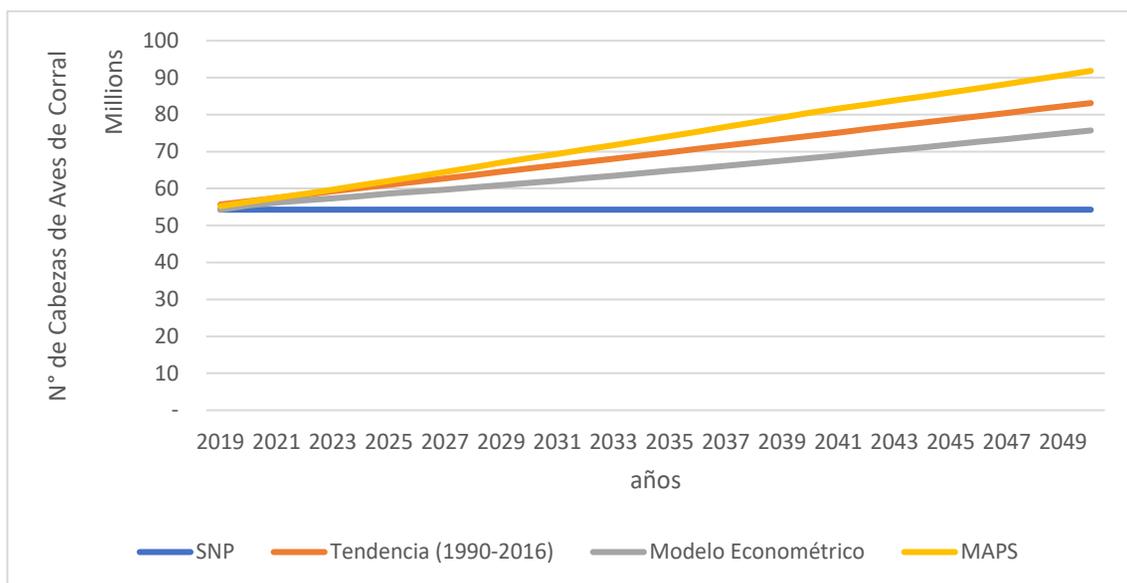


**Figura 7 Stock de Ganado Porcino Histórico de distintas fuentes, en millones de cabezas.**

### 3.2.1.3 Ganado Aves de Corral

Se estima que las emisiones asociadas a las Aves de Corral no sobrepasan el 3% del total del sector (para el año 2016), sin embargo, se realizó una modelación de la proyección de estas por su alto aumento en los últimos 3 años. Las cabezas de Aves de Corral fueron proyectadas en base al Precio al Producto de la Soya (CLP/ton). Los resultados muestran una tendencia al alza, aumentando en un 28% en el periodo 2019 al 2050, considerando 54.266.920 y 75.714.288 cabezas respectivamente (Modelo Econométrico en Figura 8). Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con 1 estudio a nivel nacional, y la tendencia histórica. No se comparó con las estadísticas de FAO<sup>12</sup>, ya que presentan mucha diferencia en las series.

<sup>12</sup> <http://www.fao.org/faostat/en/#data/GE>



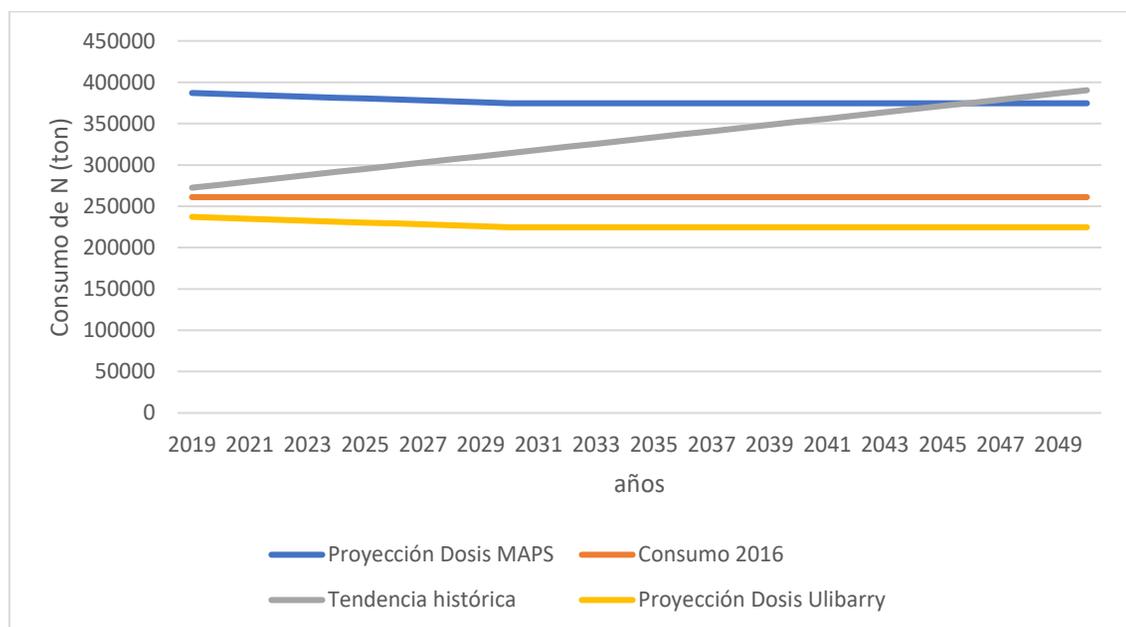
**Figura 8 Comparación de la proyección del Stock Aves de Corral en Chile para el 2050, para diferentes estudios.**

El estudio “Proyección de la Línea tendencial 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Silvoagropecuario y Uso y Cambio de Uso del Suelo”, como parte del estudio “Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático: resultados de Fase 2” (Ministerio de Agricultura, 2014), ha utilizado un modelo econométrico en base al rezago del stock de Aves de Corral (1961-2011), precio del maíz (1973-2010), y el PIB nacional (1973-2010). Los resultados del estudio muestran una proyección al alza de un 40% desde el 2019 al 2050 (MAPS en Figura 8).

Los resultados del Modelo Econométrico presentan valores menores en el stock nacional hacia el 2050 en comparación a la tendencia histórica, como también difiere levemente de las proyecciones de crecimiento en la producción para el 2030 de la OECD-FAO en su reporte anual de perspectivas agrícolas, estimando una tasa de crecimiento anual del 1,61%, en comparación con la tasa de crecimiento anual de 0,91% estimado en el Modelo Econométrico. Sin embargo, se cree que existen barreras físicas que pueden no ser captados por los modelos econométricos.

### 3.2.1.4 Fertilizantes Inorgánicos

Los resultados de proyección de uso de fertilizante al 2050, muestran una tendencia a la disminución al 2030, manteniéndose constante al 2050, presentando una disminución del 5,3% al 2030 respecto al 2019, pasando de un consumo anual de nitrógeno de 237,138 ton de N a 224.583 ton de N respectivamente. La proyección se realizó en base a Dosis de N (Kg N/ha) por tipo de cultivos. Para la proyección de las distintas tierras de cultivos, se mantuvo la tendencia histórica al 2030, manteniéndola constante el valor del último año al 2050, como se puede ver en la Figura 9.



**Figura 9 Comparación de Proyección de Consumo de Nitrógeno a nivel nacional para el periodo 2019 – 2050.**

Se estimó el consumo de N, basado en la metodología utilizada en el proyecto MAPS (Ministerio de Agricultura, 2014), sin embargo, las dosis utilizadas por tipo de cultivo, sobrestimaban el consumo de N para el año base, difiriendo de manera significativa. El valor estimado de consumo según las dosis de N por distintos cultivos en se acercaban a los valores para el año base (Ulibarry, 2019)

### 3.3 Medidas de mitigación y Curva MACC

Los resultados de costo de abatimiento unitario y detalle de cada una de las medidas de mitigación, y los supuestos utilizados para realizar el cálculo, se explica en el Anexo II: Medidas de Mitigación. Se analizaron 9 medidas de mitigación para la reducción de emisiones del sector Agricultura. Los resultados de costo-efectividad y potencial de mitigación se presentan en la Tabla 7.

La medida que presenta un mayor potencial de mitigación es la implementación de biodigestores de purines porcinos, con una reducción potencial de 19,7 MtCO<sub>2</sub>eq para el periodo 2021-2050. La magnitud de reducción de esta medida, radica principalmente en el nivel de ambición del supuesto, el cual considera que se alcanzará un 70% de los planteles porcinos a nivel nacional gestionen sus purines bajo este sistema (se considera como línea base, que al menos un 26% de los planteles actuales gestionan sus purines bajo este sistema), siendo esta una de las medidas más recomendadas para el sector en base a su éxito a nivel internacional (Fekete et al., 2021). Según las proyecciones estimadas, se espera que la industria porcina tenga un fuerte crecimiento al 2050, este crecimiento pudiera verse afectado por barreras socio-ambientales, como principal limitante, sin embargo, las proyecciones coinciden con lo esperado por la industria.

La medida que presenta un menor potencial de mitigación corresponde a la implementación de una planta de producción de Biocarbón, con una reducción acumulada para el periodo de 0,34 MtCO<sub>2</sub>eq al 2050. El pequeño aporte de esta medida radica principalmente en el nivel de ambición del supuesto, ya que considera la implementación de una planta de producción de biocarbón para todo el periodo, como un supuesto conservador ante la incertidumbre de la inexperiencia de dicha tecnología en el país, efectividad en la apropiación de los usuarios en su implementación y la eficacia de la retención de carbono en suelos dado que no existen mayores estudios sobre aplicación de biocarbón en Chile.

Respecto al costo de abatimiento, la medida que presenta el costo-efectividad más bajo, es la Reducción de Quemadas Agrícolas, con un costo negativo o “ahorro” de -344 USD/tCO<sub>2</sub>eq, principalmente asociado a las pérdidas de N<sub>2</sub> por volatilización que se producen al quemar el rastrojo, que posteriormente el agricultor debe costear para devolver los niveles nitrógeno en suelos necesarios para el cultivo siguiente. Además, se consideró un menor laboreo de suelos, bajo el concepto de labranza mínima, lo que disminuye los costos de operación. Los supuestos fueron basados en un cultivo de trigo, como principal cultivo asociado a quemadas agrícolas.

La medida que presenta una costo-efectividad más alta, es el “Cambio de Dieta Bovina”, esto es principalmente debido a los altos costos de los aditivos lipídicos a aplicar en el alimento concentrado para ganado bovino lechero, y que además la reducción de un 17% de emisiones de metano son relativamente bajas. Según recomendaciones internacionales, la optimización de la productividad animal, puede ser una estrategia muy exitosa para la mitigación de las emisiones GEI del sector pecuario (Gerber et al., 2013).

**Tabla 7 Costo de abatimiento y reducción de emisiones de las medidas de mitigación asociada al futuro de referencia.**

<b>Nombre medida</b>	<b>Costo Abatimiento (USD/t CO<sub>2</sub>eq)</b>	<b>Potencial de Reducción 2020-2050 (MtCO<sub>2</sub>eq)</b>
Cambio de Dieta Bovina	359,7	1,65
Biodigestores de Purines Porcinos	2,64	19,7
Uso eficiente del Fertilizante	-123	4,5
Aplicación de Enmiendas orgánicas	148	1,18
Manejo Holístico de Ganado	99,5	2,1
Biodigestores de Purines Bovinos	193,1	0,34
Reducción de quemadas agrícolas	-344	0,57
Planta de Producción Biocarbón	-26,4	0,34
Impuesto a la Carne	0	3,8

Los resultados de la caracterización de cada una de las medidas de mitigación demuestran que existe un potencial de mitigación de 34,42 MtCO<sub>2</sub>eq al 2050. Este valor considera aquellas medidas de tienen un alto costo por unidad de emisión de CO<sub>2</sub>eq emitida, por lo que se considera poco viable o factible de implementar. Actualmente Chile considera un Precio Social del Carbono de 32,5USD/tCO<sub>2</sub>eq, este precio estima el costo global actual de una unidad incremental de carbono emitida sumando los costos globales de los daños que impone en la totalidad del tiempo que permanecerá en la atmósfera, desde la perspectiva de la externalidad negativa que genera (Sistema Nacional de Inversiones, 2017, 2021). Este valor implica, entre otras cosas, que un costo mayor a esa estimación en una medida específica resulta menos beneficioso que el impacto de abatimiento que esta pudiera generar.

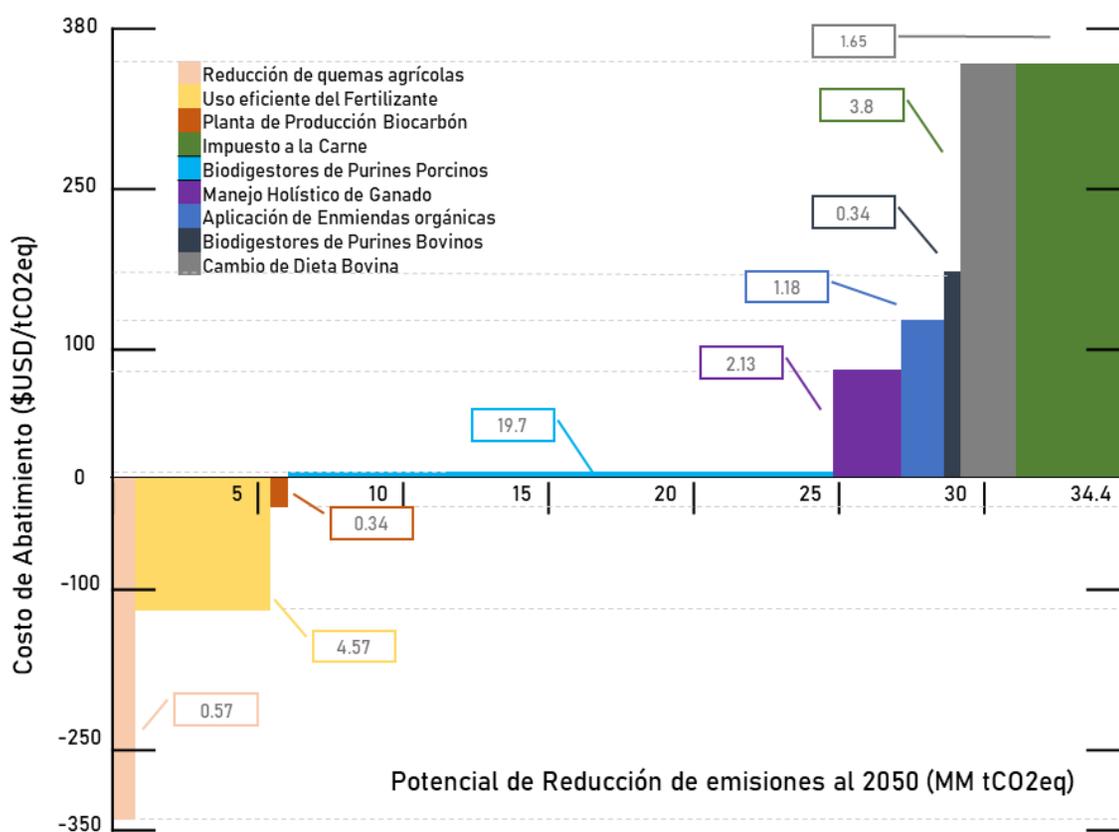


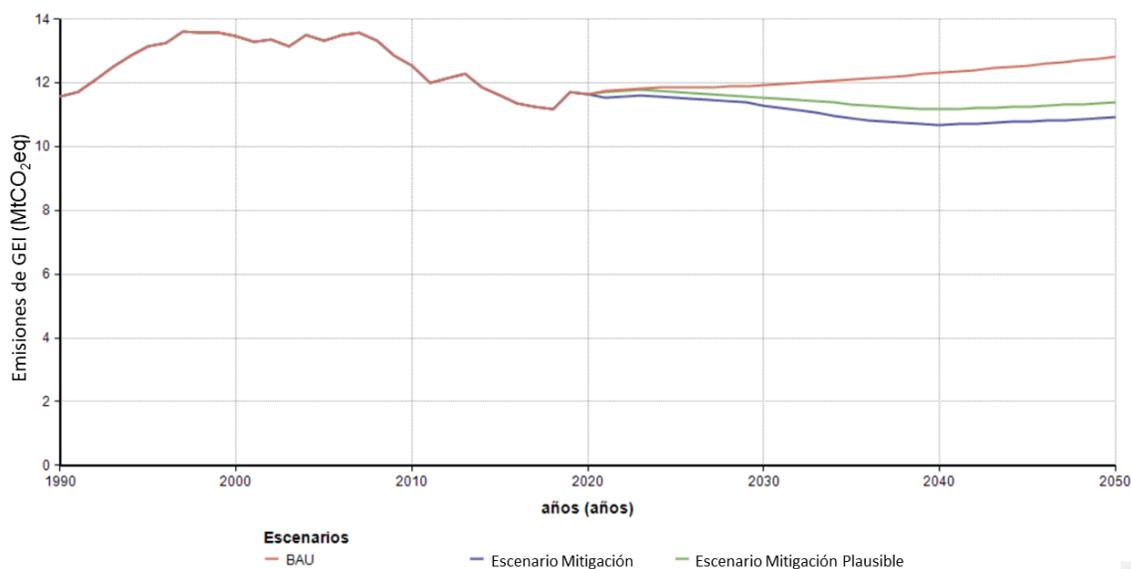
Figura 10 Curva de Costos Marginales de Abatimiento

### 3.4 Escenarios de emisiones GEI del Sector Agricultura

Los resultados de proyección de emisiones de ambos escenarios se presentan en la Tabla 8. Para el “Escenario BAU” un total de 12,8 MtCO<sub>2</sub>eq para el año 2050, en comparación al “Escenario de Mitigación” de 10,9 MtCO<sub>2</sub>eq para el año 2050, que considera todas las medidas de mitigación mencionadas, que representa una diferencia del 14,6% en el total de emisiones para el último año analizado en comparación con “Escenario BAU”, tal como se puede ver en la Figura 11 y en Tabla 8.

**Tabla 8 Comparación de emisiones totales para “Escenario BAU” “Escenario de mitigación” y “Escenario de mitigación Plausible”, para los años 2018, 2020, 2030, 2040 y 2050, en MtCO<sub>2</sub>eq.**

	2018	2020	2030	2040	2050
<b>Escenario BAU</b>	11,17	11,65	11,92	12,31	12,8
<b>Escenario Mitigación</b>	11,17	11,65	11,29	10,69	10,92
<b>Escenario Mitigación Plausible</b>	11,17	11,65	11,53	11,16	11,38
<b>% de Reducción BAU/Miti</b>	-	0%	5,28%	13,16%	14,6%
<b>% de Reducción BAU/Miti Plausible</b>	-	0%	3,27%	9,34%	11,09%



**Figura 11 Emisiones totales para el sector Agricultura periodo 1990-2050 para “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” y “Escenario de Mitigación Plausible”, en MtCO<sub>2</sub>eq/año**

Las emisiones totales acumuladas para el periodo 2019-2050 para el “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” suman a un total de 388,8 MtCO<sub>2</sub>eq y 355,90 MtCO<sub>2</sub>eq respectivamente, lo que equivale a una disminución de un 8,6% del total de emisiones para todo periodo bajo el “Escenario de Mitigación”.

Para el 2050 en el “Escenario BAU” se proyecta un aumento del 9% de las emisiones totales respecto a año base (2019). La principal categoría emisora corresponde a “Fermentación entérica”, representando un 39,5% de las emisiones del sector, aportando con 5,03 MtCO<sub>2</sub>eq, disminuyendo un 4,23% desde 2019, siendo la principal causa la disminución de las cabezas de ganado proyectadas. La segunda categoría emisora, corresponde a “Suelos Agrícolas”, representando un 33,1% de las emisiones del sector, aportando 4,24 MtCO<sub>2</sub>eq, aumentando un 2,94% desde el 2019, debido principalmente al aumento de cabezas porcinas y su aporte de nitrógeno aplicados como “Fertilizantes orgánicos”. La tercera categoría emisora corresponde a “Gestión del Estiércol”, representando un 22,2% de las emisiones del sector, aportando 2,84 MtCO<sub>2</sub>eq, aumentando un 72,34% desde el 2019, por un aumento de cabezas porcinas considerando que sus purines se manejan bajo sistemas de gestión de estiércol distinto a Biodigestores. Estas 3 categorías principales aportan el 94,8% de las emisiones del sector. Luego, le siguen “Aplicación de urea”, “Cultivo de arroz”, “Encalado” y “Quemas Agrícolas”, representando un 3,6%, 0,8%, 0,6% y 0,3% respectivamente.

**Tabla 9 Emisiones Escenario "BAU" proyectadas por categoría para los años, 2019, 2020, 2030, 2040 y 2050 en MtCO<sub>2</sub>eq \* año<sup>-1</sup>**

	2019	2020	2030	2040	2050
Fermentación Entérica	5,28	5,27	5,19	5,12	5,06
Gestión de Estiércol	1,64	1,62	1,93	2,34	2,84
Cultivo de Arroz	0,11	0,11	0,11	0,11	0,107
Suelos Agrícolas	4,11	4,11	4,12	4,17	4,24
Quemas Agrícolas	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
Encalado	0,075	0,07	0,07	0,08	0,08
Aplicación de Urea	0,411	0,41	0,45	0,47	0,46
Captura de C en Suelos	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>11,69</b>	<b>11,66</b>	<b>11,93</b>	<b>12,31</b>	<b>12,81</b>

Para el 2050 en el “Escenario Mitigación”, se proyecta una disminución del 6,6% de las emisiones totales respecto a año base (2019). La principal categoría emisora corresponde a “Fermentación entérica”, representando un 44,3% de las emisiones del sector, aportando con 4,84 MtCO<sub>2</sub>eq, disminuyendo un 8,3% desde 2019. La segunda categoría emisora, corresponde a “Suelos Agrícolas”, representando un 37,7% de las emisiones del sector, aportando 4,12 MtCO<sub>2</sub>eq, aumentando un 0,1% desde el 2019. La tercera categoría emisora corresponde a “Gestión del Estiércol”, representando un 14% de las emisiones del sector, aportando 1,53 MtCO<sub>2</sub>eq, disminuyendo un -7,4% desde el 2019. Estas 3 categorías principales representan el 96% de las emisiones del sector. Luego, le siguen “Aplicación de urea,” Cultivo de arroz”, “Encalado” y “Quemas Agrícolas”, representando un 4,2%, 1%, 0,7% y 0,1% respectivamente.

**Tabla 10 Emisiones “Escenario Mitigación” proyectadas por categoría para los años, 2019, 2020, 2030, 2040 y 2050 en MtCO<sub>2</sub>eq**

	2019	2020	2030	2040	2050
Fermentación Entérica	5,28	5,27	5,07	4,90	4,84
Gestión de Estiércol	1,65	1,62	1,63	1,29	1,53
Cultivo de Arroz	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11
Suelos Agrícolas	4,12	4,11	4,04	4,05	4,12
Quemas Agrícolas	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01
Encalado	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Aplicación de Urea	0,41	0,42	0,45	0,47	0,46
Captura C en Suelos	0,00	0,00	-0,06	-0,21	-0,21
<b>Total</b>	<b>11,69</b>	<b>11,66</b>	<b>11,33</b>	<b>10,69</b>	<b>10,93</b>

Al comparar los escenarios de emisiones al 2050, la diferencia entre “BAU” y “Mitigación” para la categoría de emisiones “Fermentación entérica” presenta una diferencia del 4,2%, por las medidas “Cambio de Dieta Bovina” y “Impuesto a la carne”, afectando, por un lado, el factor de emisión de CH<sub>4</sub> por adición de aditivo lipídico, complementado por una disminución del stock de ganado producto del impuesto a la carne (al consumidor), afectando la producción nacional. Las emisiones del sector Agricultura, provienen

principalmente de la ganadería, siendo el principal contribuyente, el ganado bovino, representando en promedio, un 57% de las emisiones totales del sector.

Las emisiones entre los distintos escenarios de la categoría “Suelos Agrícolas”, presenta una diferencia del 2,8%, con 4,24 y 4,12 MtCO<sub>2</sub>eq “BAU” y “Mitigación” respectivamente. Las emisiones de esta categoría se ven reducida por la medida “Impuesto a la Carne” al afectar a la producción nacional de ganado, considerando que un 46,9% de las emisiones de la categoría “Suelos Agrícolas” proviene del ganado bovino a través de nitrógeno depositado por estiércol y orina en pasturas, por lo que una disminución del stock afecta directamente. Adicionalmente, la medida “Uso eficiente del fertilizante”, reduce en un 11% el uso de fertilizantes Inorgánicos en comparación al “Escenario BAU”, reduciendo en 1,76% las emisiones totales de la categoría (pasando desde 0,97 a 0,89 MtCO<sub>2</sub>eq). Sin embargo, estas dos medidas que reducen de manera considerable sus emisiones se ven contrarrestadas por el aumento considerable de ganado porcino con la consecuencia de un aumento de nitrógeno depositado como Fertilizante Orgánico a partir del estiércol generado, generando emisiones de N<sub>2</sub>O.

Las emisiones de la categoría “Gestión del Estiércol”, entre los distintos escenarios presenta una diferencia relevante de un 46,3%, con 2,84 y 1,53 MtCO<sub>2</sub>eq “BAU” y “Mitigación” respectivamente, siendo la categoría que presenta la mayor reducción de 1,31 MtCO<sub>2</sub>eq para el 2050. Las emisiones de esta categoría se ven reducida por la medida “Biodigestores de Purines Porcinos”, en el cual se considera una alta penetración de esta tecnología en la industria, que a través de la gestión del CH<sub>4</sub> producido por las grandes cantidades de purines, se considera que estas emisiones se anulan.

Adicionalmente, se consideró la captura de carbono en suelos, como parte de las reducciones del sector Agricultura, sin embargo, estas debiesen ser consideradas dentro de la categoría 4. Sector UTCUTS subcategoría 4.B.1.Tierras de Cultivos, según las directrices metodológicas del IPCC 2006. Actualmente, en el INGEI 1990-2018, considera que estas emisiones son cero, debido a no existe la información suficiente

que permita determinar los cambios, se considera que el carbono en el suelo no presenta cambios (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a), por lo que se requiere de mayor desarrollo en investigación en esta línea para no sobre o subestimar estas emisiones. Las capturas estimadas en esta categoría provienen de las medidas “Aplicación de enmiendas orgánicas”, “Manejo Holístico del Ganado” y “Planta de Producción Biocarbón”, con una absorción anual de -0,21 MtCO<sub>2</sub>eq para el 2050.

Finalmente, la categoría “Quemas Agrícolas”, entre los distintos escenarios presenta una diferencia relevante de un 75,5%, con 0,0321 y 0,0079 MtCO<sub>2</sub>eq “BAU” y “Mitigación” respectivamente, con una reducción de 0,0242 MtCO<sub>2</sub>eq para el 2050. Si bien en términos porcentuales la diferencia es muy alta, el aporte en reducción es relativamente bajo, considerando que las emisiones de quemas agrícolas representan el 0,1% de las emisiones totales del sector. La reducción de emisiones proviene de la medida “Reducción de quemas Agrícolas”, que considera un supuesto ambicioso de reducción del 80% de la superficie de quema actual al futuro, sin embargo, se considera un supuesto realista, ante el eventual riesgo de incendios que presenta dicha actividad, y además los co-beneficios sociales y ambientales producto de su restricción.

**Tabla 11 Comparación de emisiones por categoría al 2050 para “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” al 2019, en MtCO<sub>2</sub>eq**

Categoría	2019	2050		Diferencia entre BAU - Mit
	Año base	BAU	Mit.	
Fermentación Entérica	5,28	5,06	4,84	0,21
Gestión de Estiércol	1,65	2,84	1,53	1,31
Cultivo de Arroz	0,12	0,11	0,11	0,00
Suelos Agrícolas	4,12	4,24	4,12	0,12
Quemas Agrícolas	0,04	0,03	0,01	0,02
Encalado	0,08	0,08	0,08	0,00
Aplicación de Urea	0,41	0,46	0,46	0,00
Captura de C en Suelos	0,00	0,00	-0,21	0,21
<b>Total</b>	<b>11,69</b>	<b>12,81</b>	<b>10,92</b>	<b>1,88</b>

**Tabla 12 Variación porcentual de emisiones bajo “Escenario BAU” y “Escenario Mitigación” al 2050**

<b>Categoría</b>	<b>2050</b>
Fermentación Entérica	-4%
Gestión de Estiércol	-46%
Cultivo de Arroz	0%
Suelos Agrícolas	-3%
Quemas Agrícolas	-75%
Encalado	0%
Aplicación de Urea	0%
Captura de C en Suelos	-4%
<b>Total</b>	<b>14,7%</b>

Chile se ha comprometido en una reducción de emisiones para el 2030, en un orden estimado de un 30% de sus emisiones al 2030, respecto al 2016. Específicamente, se establece no superar las 1.100 MtCO<sub>2</sub>eq entre el año 2020 y 2030, alcanzando un nivel de 95 MtCO<sub>2</sub>eq al 2030 y hace mención al compromiso futuro de lograr la carbono neutralidad al 2050 (Gobierno de Chile, 2020). Este compromiso es transversal a todos los sectores, poniendo especial foco en reducción de emisiones desde el sector Energía, sin embargo, estudios recientes manifiestan que existen dificultades para alcanzar dicho objetivo, incluso considerando medidas adicionales a las analizadas para alcanzar el compromiso. Se analizó una combinación de 1001 futuros bajo incertidumbre, considerando medidas adicionales, en el cual solo un 25% de dichos futuros alcanzarían los objetivos de la NDC al 2030 (Benavides et al., 2021). Según Climate Action Tracker <sup>13</sup>, de 37 NDC actualizadas (incluye unión europea, con 27 países miembros), que suman el 53% de las emisiones globales, solo 1 es suficientes o compatibles con los objetivos propuestos en el Acuerdo de París para no sobrepasar en 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales.

Si las trayectorias se mantienen a las tasas actuales de emisiones, ese límite se estaría alcanzando aproximadamente el año 2040 (IPCC, 2018), o incluso antes (Xu et al., 2018), por lo que la aceleración en la implementación y ambición de las medidas de

<sup>13</sup> <https://climateactiontracker.org/countries/>

mitigación es urgentes y deberán ser efectivas. Actualmente las trayectorias presentadas por el IPCC, considera trayectoria para los gases no-CO<sub>2</sub> por debajo de las trayectorias actuales, requiriendo esfuerzos adicionales a las trayectorias de descarbonización ajustadas para combustibles fósiles difíciles de cumplir (Leahy et al., 2020), incluso los actuales compromisos de reducción del sector Agricultura a nivel mundial, solo entre un 21% y 40% de estas reducciones se estiman que son plausibles al 2030. Actualmente, a nivel mundial, la meta de reducción al 2030 representa entre un 11% y 18% para las emisiones de no-CO<sub>2</sub> anuales de la Agricultura. (Wollenberg et al., 2016). Para el “Escenario de Mitigación” en caso de analizado al 2030 la reducción corresponde a 5,35% en comparación al escenario de referencia, quedando por lejos al promedio mundial esperado para el Sector.

Además, para el caso de estudio, se analizó el potencial de mitigación plausible, es decir, considerando las medidas de mitigación que tienen un costo de abatimiento bajo (menor a 32,5USD/ton), estimando una reducción de 1,46 MtCO<sub>2</sub>eq/año para el 2050 en comparación al “Escenario BAU”, pasando desde 12,81 (“BAU”) a 11,38 (“Mitigación Plausible”) en MtCO<sub>2</sub>eq, a diferencia del “Escenario de Mitigación”, que considera todas las medidas de mitigación independiente de su costo, una reducción de 1,87 MtCO<sub>2</sub>eq para dicho año. Estas reducciones plausibles reducirían en un 5,9% las emisiones totales acumuladas para el periodo 2019-2050, pasando de 388,8 MtCO<sub>2</sub>eq para “BAU” a 368,99 MtCO<sub>2</sub>eq, en comparación a la reducción de 8,6% al analizar el conjunto de medidas para el mismo periodo. Esta pequeña diferencia entre el “escenario de mitigación plausible” versus el “Escenario de mitigación” radica principalmente en el potencial de reducción de la medida “Impuesto a la Carne” que tiene sobre el stock nacional de ganado bovino, es decir en el escenario plausible, las emisiones asociadas al ganado bovino se ven aumentadas debido a que no se restringe la producción nacional de ganado bovino. El costo de abatimiento promedio para el “Escenario de Mitigación” es de 17,447 USD/tCO<sub>2</sub>eq y para el “Escenario de Mitigación Plausible” es de -28,14 USD/tCO<sub>2</sub>eq.

Dicha medida se basa en el supuesto de que la reducción en el consumo de carne impacta de manera proporcional a la importación de carne, como también a la producción nacional, considerando que en promedio un 50% del consumo nacional proviene de la importación de carne. La capacidad de producción nacional en el futuro se verá relegada en su capacidad de exportar dado los bajos precios de importación de países vecinos (Cofré, 2019). Esto podría tener un incentivo perverso en términos de emisiones globales, debido a que Chile podría limitar su capacidad de producción, sin embargo, la tendencia de consumo ha aumentado en un 28% de carne bovina per cápita<sup>14</sup>, y se espera que esta tendencia continúe en el tiempo, provocando un aumento de la demanda de carne importada, produciendo la emisión en otro país. Es relevante mencionar que actualmente, ningún país cuenta con impuesto a la carne, siendo Nueva Zelanda, el único país que ha llegado a discutir y considerar un posible impuesto, siendo la medida “Impuesto a la Carne” una medida poco realista.

A nivel mundial, se está poniendo especial foco en la captura de carbono en suelos (Rumpel et al., 2018), sin embargo para Chile en su INGEI 1990-2018, como se mencionó anteriormente, considera que estas emisiones son cero, debido a no existe la información suficiente que permita determinar los cambios, y se considera que el carbono en el suelo no presenta cambios (Ministerio del Medio Ambiente, 2021a). Según la metodología IPCC 2006, en su Volumen 4, Capítulo 2, Ecuación 2.25, establece un método de estimación nivel 1, parcialmente factible de aplicar en Chile para Tierras de Cultivo que permanecen como tales, para la estimación de cambio anual de existencias de carbono orgánico en suelos, a través de la variación del contenido de carbono orgánico de referencia, por factores relativos de cambio de existencia, según uso de la tierra (ej. Cultivo anual, cultivo perenne, entre otros), tipo de laboreo (total, reducido, o nulo) y entrada (dependerá de la incorporación de rastrojo, aplicación de estiércol animal, entre otros) siendo la principal limitante la información base sobre dichas prácticas en las tierras de cultivos. Se sugiere realizar un estudio más profundo sobre

---

<sup>14</sup> <https://data.oecd.org/agroutput/meat-consumption.htm>

las capacidades existentes actuales para el levantamiento de información en Chile y la evaluación de la incorporación de dicha categoría dentro del INGEI Nacional.

Del análisis que se llevó a cabo en el presente estudio respecto al potencial de mitigación del sector Agricultura bajo nueve medidas de mitigación, queda limitado a las capacidades de caracterizar distintas medidas de mitigación, sin embargo, existe una gran variedad de acciones de reducción de emisiones para el sector Agricultura que debieran explorarse en mayor profundidad para el contexto chileno.

Por otra parte, el sector Agricultura presenta importantes desafíos en términos de mitigación, debido a que limitar la producción en algún sentido, puede poner en riesgo la seguridad alimentaria de las naciones y las opciones actuales son relativamente costosas en comparación con otros sectores. Al aplicar políticas basados en precios, como también el impacto de subsidios en la Agricultura, pueden generar una distorsión de precios a nivel internacional, dada la actual globalización de los mercados, impactando a países menos desarrollados en sus capacidades de producción. Se debe realizar un esfuerzo adicional a nivel mundial para analizar alternativas distintas, poniendo especial foco en una mejoras de la productividad a través de la tecnología e innovación (Valin et al., 2013). En este sentido, es relevante destacar que en Chile, el gasto público en Investigación y Desarrollo en Agricultura, ha sido significativo en la última década, pero todavía existe un número reducido de investigadores y la inversión es insuficiente para los desafíos urgentes de la Agricultura en Chile (del Pozo et al., 2021)

### **3.5 Análisis de Decisión Multicriterio, a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

En la siguiente sección se describen los resultados del Análisis de Decisión Multicriterio a través del Proceso Analítico Jerárquico, a través de la aplicación de 7 entrevistas a expertos que tienen conocimientos profundos en emisiones del sector Agricultura, agrupados considerados de aquí en adelante, (1) Entrevistados Sector Público (3 entrevistados) y un segundo grupo considerados de aquí en adelante, (2) Entrevistados Academia (4 entrevistado), respondiendo mediante la “Comparación entre pares”, para estimar la ponderación de los criterios y subcriterios para la definición de la Matriz de Jerarquías para la toma de decisiones, y posteriormente, una evaluación a las medidas respecto a los subcriterios cualitativos.

#### ***3.5.1 Ponderación Matriz de Jerarquías para la toma de decisiones***

En la siguiente sección se describen los puntajes promedio para cada subcriterio y criterios de evaluación, diferenciado por tipo de actor, y promedio general. Se analiza las preferencias por tipo de actor. Finalmente se analiza el puntaje ponderado para cada respuesta, por tipo de actor y promedio general de ambos grupos. Es importante tener en consideración, que el objetivo de la matriz de jerarquías para la toma de decisiones, es identificar como influyen cada uno de estos criterios en la priorización de medidas de mitigación para el sector Agricultura efectivas, bajo transición justa.

Para el subcriterio “Socio-económico”, los entrevistados del sector Público tienden a darle mayor importancia al costo efectividad por sobre la aceptabilidad social y el empleo que pudiera presentar una medida de mitigación, con un puntaje promedio de 70%, 15% y 14% respectivamente. Para los entrevistados de la Academia, tienden a darle mayor importancia a la aceptabilidad social por sobre la costo-efectividad y el empleo que pudieran generar una medida de mitigación, con un puntaje promedio de 48%, 29% y 22% respectivamente. El grupo a, es más consistente, dado que presenta una menor desviación estandar en sus respuestas, tal como se puede ver en la Tabla 13.

**Tabla 13 Puntaje Promedio y desviación estándar para “Subcriterios Socio-Económicos”, para Entrevistados (a)Sector Público y (b)Academia**

Subcriterio	Costo-Efectividad	Aceptabilidad Social	Empleo
Sector Público	70%	15%	14%
	4%	5%	3%
Academia	29%	48%	22%
	22%	25%	8%
Promedio Total	47%	34%	19%
	27%	25%	7%

Para el subcriterio “Técnico”, los entrevistados del sector Público tienden a darle mayor importancia al Facilidad de Implementación por sobre la Innovación y el Capacidades técnicas que pudiera presentar una medida de mitigación, con un puntaje promedio de 36%, 33% y 31% respectivamente, presentando resultados bastantes homogéneos para todos los subcriterios. Para los entrevistados de la Academia, tienden a darle mayor importancia a las Capacidades Técnicas, por sobre la Facilidad de implementación e Innovación, con un puntaje promedio de 49%, 37% y 14% respectivamente. El grupo (b), es más consistente, dado que presenta una menor desviación estándar en sus respuestas, tal como se puede ver en la Tabla 14.

**Tabla 14 Puntaje Promedio y desviación estándar para “Técnicos”, para Entrevistados (a)Sector Público y (b)Academia**

Subcriterio	Innovación	Capacidades Técnicas	Facilidad de implementación
Sector Público	33%	31%	36%
	12%	19%	7%
Academia	14%	49%	37%
	4%	8%	7%
Promedio Total	22%	41%	37%
	13%	16%	6%

Para el subcriterio “Ambiental”, los entrevistados del sector Público tienden a darle mayor importancia al “Potencial de Reducción” por sobre los “Co-beneficios Ambientales” que pudiera presentar una medida de mitigación, con un puntaje promedio de 79% y 21% respectivamente. Al igual que los entrevistados del Sector Público, los

entrevistados de la Academia, tienden a darle mayor importancia a las “Potencial de Reducción” por sobre los “Co-beneficios Ambientales”, con un puntaje promedio de 80% y 20% respectivamente. El grupo Academia, es levemente más consistente, pero en general ambos grupos tienden a dar más importancia al potencial de mitigación, tal como se puede ver en la Tabla 15.

**Tabla 15 Puntaje Promedio y desviación estándar para subcriterios “Ambientales”, para Entrevistados (a) Sector Público y (b) Academia**

Subcriterio	Potencial de Reducción	Co-beneficios ambientales
Sector Público	79%	21%
	11%	11%
Academia	80%	20%
	9%	9%
Promedio Total	79%	21%
	9%	9%

Para el los Criterios de la Matriz de Jerarquías, los entrevistados del sector Público tienden a darle mayor importancia a los aspectos “Técnicos” y “Ambientales, por sobre los “Socio-económicos” para la priorización de medidas de mitigación efectivas, con un puntaje promedio de 36%, 36% y 29% respectivamente. Los entrevistados de la Academia, tienden a darle mayor importancia a los aspectos “Socio-económicos” por sobre los criterios “Ambientales” y “Técnicos”, con un puntaje promedio de 54%, 31% y 15%, respectivamente. El grupo Sector Público, es levemente más consistente entre ellos, sin embargo, difieren en la importancia relativa para los criterios, siendo el grupo Academia, levemente más inconsistente entre la muestra Tabla 15.

**Tabla 16 Puntaje Promedio y desviación estándar para Criterios “Socio-económico”, “Técnico” y “Ambientales”, para Entrevistados (a) Sector Público y (b) Academia**

Subcriterio	Socio-Económico	Técnico	Ambiental
Sector Público	29%	36%	36%
	8%	4%	4%
Academia	54%	15%	31%
	15%	6%	20%
Promedio Total	43%	24%	33%
	18%	12%	14%

Finalmente, como parte de la metodología, los valores ponderados para cada uno de los subcriterios, se muestran en la Tabla 17. El subcriterio más valorado para los entrevistados del Sector Público, es el “Potencial de Mitigación” con un puntaje ponderado de 28,2%, seguido de la “Costo-Efectividad”, con un valor de 20,3%. Los criterios menos valorados, fue la generación de “Empleo” y “Aceptabilidad Social”, con una valoración de 4,2% y un 4,4% respectivamente.

Para los entrevistados de la Academia, el subcriterio mas valorado fue “Aceptabilidad Social” y “Potencial de Reducción”, con un puntaje promedio ponderado de 26,2% y 24,3% respectivamente. Los subcriterios menos valorados fueron “Innovación” y “Facilidad de implementación”, con una valoración de 2,1% y 5,6%, respectivamente.

El promedio total, los valores de los subcriterios para la Matriz de Jerarquía, los subcriterio más valorado fueron “Potencial de reducción”, “Costo-Efectividad” y “Aceptabilidad Social”, con un puntaje promedio ponderado, de 26%, 20,3% y 14,8%, respectivamente, sumando aproximadamente el 61,1% de influencia en la toma de decisiones para la priorización de medidas de mitigación del sector, bajo transición justa. Los subcriterios menos valorados, fueron “Innovación”, “Co-beneficios Ambientales” y “Empleo”, con un puntaje promedio ponderado de 5,3%, 6,7% y 8,2%, respectivamente, sumando un 20,2% de influencia en la toma de decisiones.

**Tabla 17 Puntaje ponderado para Subcriterios de la Matriz de Jerarquías**

<b>Subcriterio</b>	<b>Sector Público</b>	<b>Academia</b>	<b>Promedio Total</b>
Costo-Efectividad	20,3%	15,9%	20,3%
Aceptabilidad Social	4,4%	26,2%	14,8%
Empleo	4,2%	12,2%	8,2%
Innovación	11,6%	2,1%	5,3%
Capacidades Técnicas	11,1%	7,4%	9,9%
Potencial de Reducción	28,2%	24,3%	26,0%
Co-beneficios ambientales	7,3%	6,3%	6,7%
Facilidad de implementación	12,9%	5,6%	8,8%

Los resultados anteriores muestran una tendencia a relevar la importancia de los elementos claves desde el punto de vista de la mitigación, como lo son “Potencial de mitigación” y “Costo-efectividad”, cuando analizamos el puntaje promedio ponderado, sin embargo, existe una diferencia que puede ser significativa al momento de priorizar medidas de mitigación desde la perspectiva de los distintos actores.

Es importante mencionar, que, bajo el transcurso de las entrevistas, se realizaron observaciones a los criterios y subcriterios definidos. Desde los entrevistados del Sector Público, se recomendó la incorporación de un criterio y/o subcriterios Institucional y financiero, que permita visualizar los mecanismos actuales existentes para operativizar y ejecutar las medidas propuestas. Como contra argumento a dicha observación, se basa en que el foco de la “Matriz de Jerarquías” propuesto para la priorización de medidas de mitigación del presente estudio, tiene un enfoque desde el punto de vista técnico-social, sin considerar realmente la viabilidad actual de la implementación de dichas medidas, y no pretende hacerse cargo de las barreras financieras, institucionales y regulatorias, sin embargo, se consideran relevantes como una acción posterior a lo propuestos. A través de este análisis se busca identificar el ¿Qué medidas serán las que debiesen implementar?, y no busca resolver el ¿Cómo se llevará a cabo la implementación y ejecución de dichas medidas propuestas?

Una segunda entrevistada comentó que no se encuentra de acuerdo con lo propuesto en la “Matriz de Jerarquía”, respecto a los conceptos Socio-económicos y Técnicos, relevando la importancia de disociar los elementos sociales de los económicos, como también comenta que dentro del valor de costo-efectividad, debería estar implícito los costos técnicos, tales como capacidades técnicas y facilidad de implementación. En relación con lo anterior, se toman las observaciones como elemento relevante para considerar en eventuales futuros análisis.

En vista de lo anterior, las recomendaciones metodológicas en la definición de los criterios y subcriterios, debiesen ir acompañadas de procesos participativos, involucrando a los distintos stakeholders involucrados, que consideren todos los puntos

de vista, como elemento relevante dentro del proceso de Análisis de Decisión Multicriterio (Villar & Kuhlmann, 2015).

### **3.5.2 Evaluación medidas de mitigación**

En la siguiente sección se describen los resultados obtenidos para la evaluación de las medidas mediante el método MAUT para aquellos subcriterios cuantitativos y SMART para subcriterios cualitativos. El análisis se separa por tipo de actor.

#### **3.5.2.1 Notas obtenidas mediante método de la Teoría de Utilidad de Atributos Múltiples (MAUT)**

En cuanto a las notas de evaluación de las medidas mediante el método MAUT para los subcriterios cuantitativos, “Costo-efectividad”, “Potencial de reducción” y “Empleo”, fueron estimados en el proceso de caracterización de medidas de mitigación, detalladas en las próximas secciones: Se normalizaron los valores, ajustando el valor mínimo y máximo, quedando en escala 0 a 100, por lo que para cada evaluación de un subcriterio, al menos una medida siempre tomará el peor valor (0) y la medida que presente mejor desempeño, tomará el valor más alto (100), ajustando la escala de 0 a 100.

$$X_{normalizada} = \frac{X_{max} - X_{ij}}{X_{min} - X_{max}}$$

##### **3.5.2.1.1 Subcriterio “Costo-Efectividad”**

La evaluación de utilidad ( $U_{i,j}$ ) se realizó mediante el valor estimado del costo de abatimiento para cada medida, está dada por la siguiente función de utilidad. La medida que presenta un costo de abatimiento menor obtiene una nota 100, y la medida que presenta un mayor costo de abatimiento, obtiene una nota 0.

$$U_{i,j} = -0,1422 p_{i,j} + 100,03$$

Para el caso de Impuesto a la carne, dado que el costo de abatimiento no fue estimado dada la complejidad de la estimación, se le entrego el valor máximo, dejándolo con una nota 0, al igual de Cambio de Dieta Bovina, por su alto costo

**Tabla 18 Nota de evaluación subcriterio "Costo-efectividad" bajo método MAUT para las medidas analizadas**

Medida de Mitigación	USD/tCO <sub>2</sub> eq	Escala min-max ( $p_{i,j}$ )	Nota ( $U_{i,j}$ )
Cambio Dieta Bovina	359,7	703,7	0,0
Uso eficiente del Fertilizante	-123	221	68,6
Biodigestores Porcinos	2,64	346,64	50,7
Aplicación de Enmiendas Org.	154,2	498,2	29,2
Impuesto a la Carne	359,7	703,7	0,0
Manejo Holístico de Ganado	99,5	443,5	37,0
Biodigestores Bovinos	193,1	537,1	23,7
Reducción de Quemadas Agrícolas	-344	0	100,0
Biocarbón	-26,4	317,6	54,9

### 3.5.2.1.2 Subcriterio "Potencial de Mitigación"

La evaluación de utilidad ( $U_{i,j}$ ) se realizó mediante el valor estimado del potencial de mitigación de cada medida para el periodo 2019-2050, que está dada por la siguiente función de utilidad.

$$(U_{i,j}) = 24,622 (p_{i,j}) + 26,562$$

Dado que la diferencia entre el potencial de mitigación de las medidas era demasiado amplia, de ajustaron los valores a través de la aplicación de logaritmo natural de los valores crudos, para ajustar la escala. La medida que tiene un mayor potencial de mitigación obtiene una nota de 100, y la medida que tiene un menor potencial toma la nota 0.

**Tabla 19 Nota Evaluación subcriterio "Potencial de mitigación" bajo método MAUT para las medidas analizadas**

Medida de Mitigación	MtCO <sub>2</sub> eq	Escala ln min-max ( $p_{i,j}$ )	Nota ( $U_{i,j}$ )
Cambio Dieta Bovina	1.66	0,51	39,0

Biodigestores Porcinos	19,74	2,98	100,0
Uso eficiente del Fertilizante	4,58	1,52	64,0
Aplicación de Enmiendas Org	1,19	0,17	30,8
Impuesto a la Carne	3,87	1,35	59,9
Manejo Holístico de Ganado	2,13	0,76	45,2
Biodigestores Bovinos	0,34	-1,07	0,3
Reducción de Quemadas Agrícolas	0,57	-0,56	12,8
Biocarbón	0,34	-1,08	0,0

### 3.5.2.1.3 Subcriterio “Empleo”

La evaluación de utilidad ( $U_{i,j}$ ) se realizó mediante el valor estimado de la potencial generación de empleo de cada medida para el periodo 2019-2050, que está dada por la siguiente función de utilidad:

$$(U_{i,j}) = 0,0292 (p_{i,j}) - 0,0292$$

La medida que presenta una mayor generación de empleo obtiene una nota de 100, y la medida que tiene presenta una menor generación de empleo la nota 0.

**Tabla 20 Nota Evaluación subcriterio "Empleo" bajo método MAUT para las medidas analizadas**

Medida de Mitigación	Generación de Empleo ( $p_{i,j}$ )	Nota ( $U_{i,j}$ )
Cambio Dieta Bovina	2392,14	69,9
Uso eficiente del Fertilizante	2617,7	76,4
Biodigestores Porcinos	3424,1	100,0
Aplicación de Enmiendas Org,	785,41	22,9
Impuesto a la Carne	0	0,0
Manejo Holístico de Ganado	897,96	26,2
Biodigestores Bovinos	279,054	8,1
Reducción de Quemadas Agrícolas	3011,68	88,0
Biocarbón	385,25	11,2

### 3.5.2.2 Notas obtenidas mediante método de la Teoría Simple de Clasificación de Atributos (SMART)

En cuanto a las notas de evaluación de las medidas mediante el método SMART para los subcriterios cualitativos, “Aceptabilidad Social”, “Innovación”, “Capacidades Técnicas”, “Facilidad de implementación” y “Co-beneficios ambientales”, fueron consultados a los expertos entrevistados, evaluado para cada medida, mediante la calificación del nivel o escala de puntuación para el subcriterio, según lo que se muestra en la Tabla 4. Para la normalización, el valor mínimo, ( $X_{min} = 1$ ) y el valor máximo ( $X_{max} = 7$ ) para llevarlo a la escala de 0 a 100, lo que implica que si para un subcriterio, todas tuvieron un valor entre 2 y 6, ninguna de las medidas tendrá la nota mínima (0) o máxima (100), en la escala de evaluación.

$$X_{ij,normalizada} = \frac{X_{ij} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

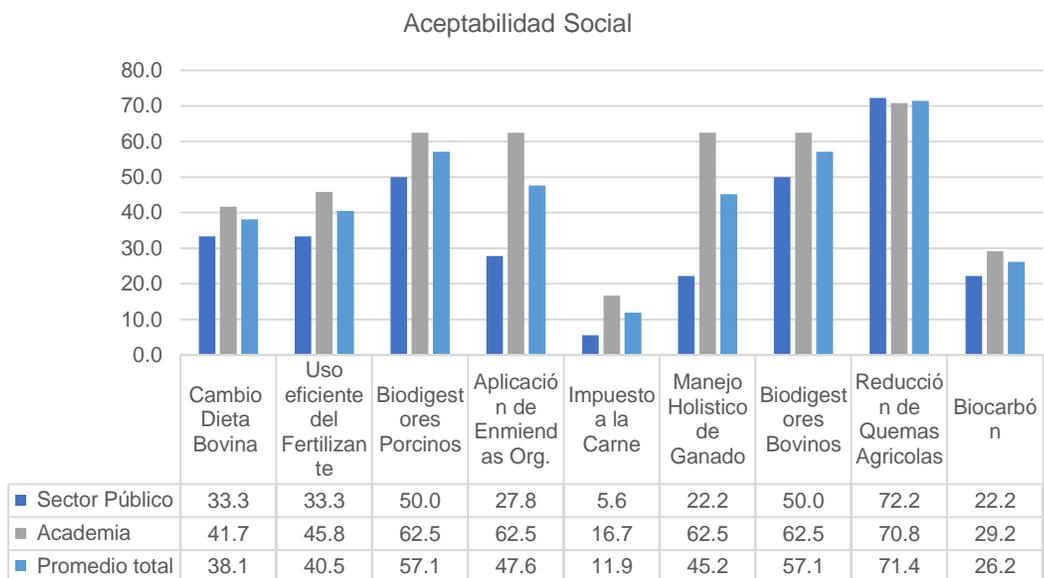
La evaluación de utilidad ( $U_{i,j}$ ) se realizó mediante la escala de evaluación de 1 a 7, que está dada por la siguiente función de utilidad:

$$(U_{i,j}) = 16,667(P_{i,j}) - 16,667$$

Para el análisis se diferencian las respuestas promedio por grupo de actor, entrevistados “Sector Público” y “Academia” y promedio total considerando las respuestas de todos los actores ( $n=7$ ).

#### **3.5.2.2.1 Subcriterio Aceptabilidad Social**

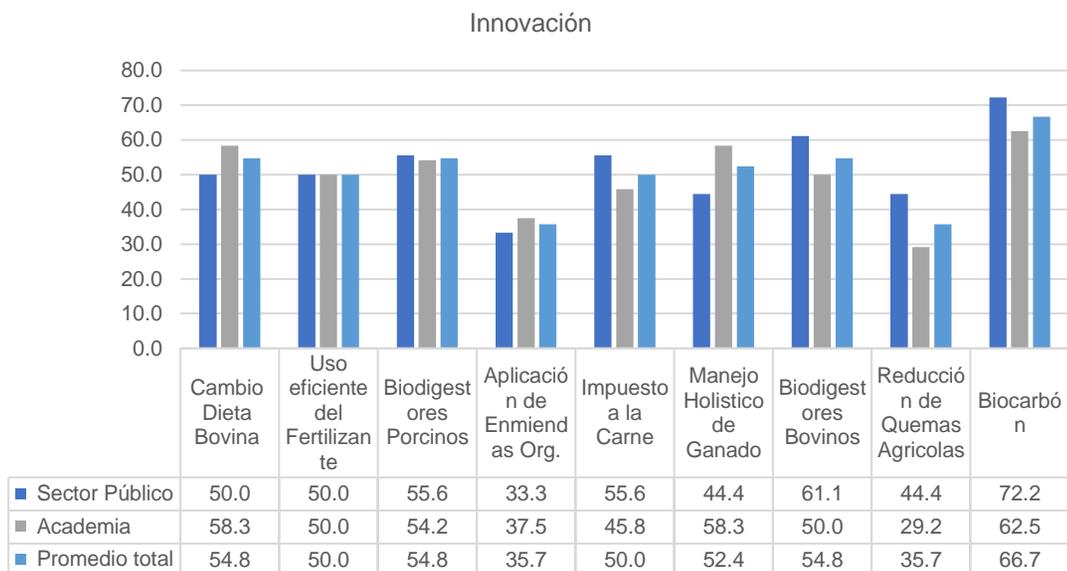
Para el subcriterio “Aceptabilidad Social”, la medida mejor evaluada fue “Reducción de quemas Agrícolas”, con una nota promedio de 71. La medida que obtuvo la peor nota, fue impuesto a la carne con una nota promedio de 11,9. La medida que presenta una mayor variación entre los grupos de actores fue “Manejo holístico de ganado”, con una diferencia de 40,3, tal como se puede ver en la Figura 12.



**Figura 12** Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Aceptabilidad Social”

### 3.5.2.2.2 Subcriterio Innovación

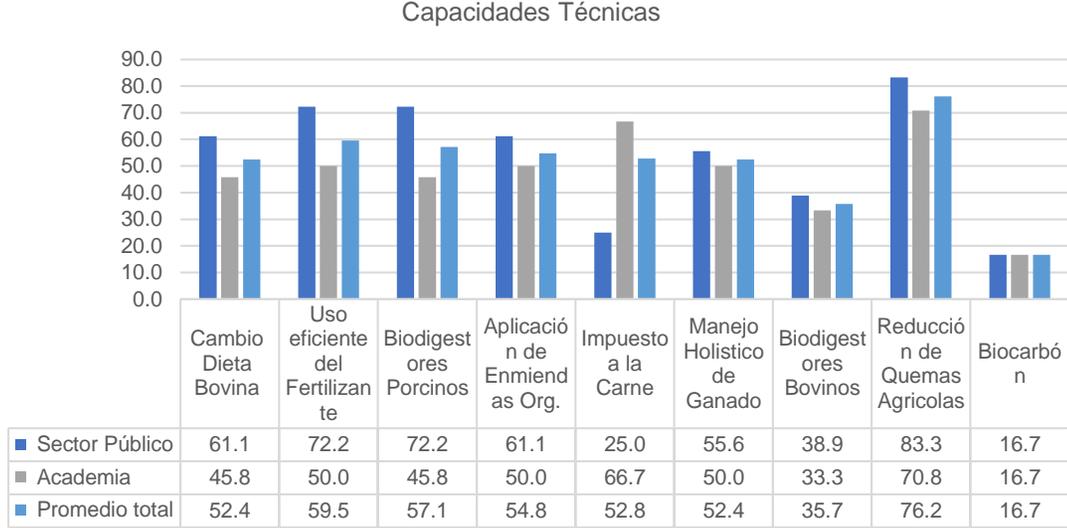
Para el subcriterio “Innovación”, la medida mejor evaluada fue “Planta de producción de Biocarbón” con una nota promedio de 66. La medida que obtuvo la peor nota, fue “Aplicación de enmiendas orgánicas” y “Reducción de Quemadas Agrícolas” con una nota promedio de 35,7 para ambas. La medida que presenta una mayor variación entre los grupos de actores fue “Manejo holístico de ganado”, con una diferencia de 13,9, como se puede ver en la Figura 13.



**Figura 13** Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Innovación”

### 3.5.2.2.3 Subcriterio “Capacidades Técnicas”

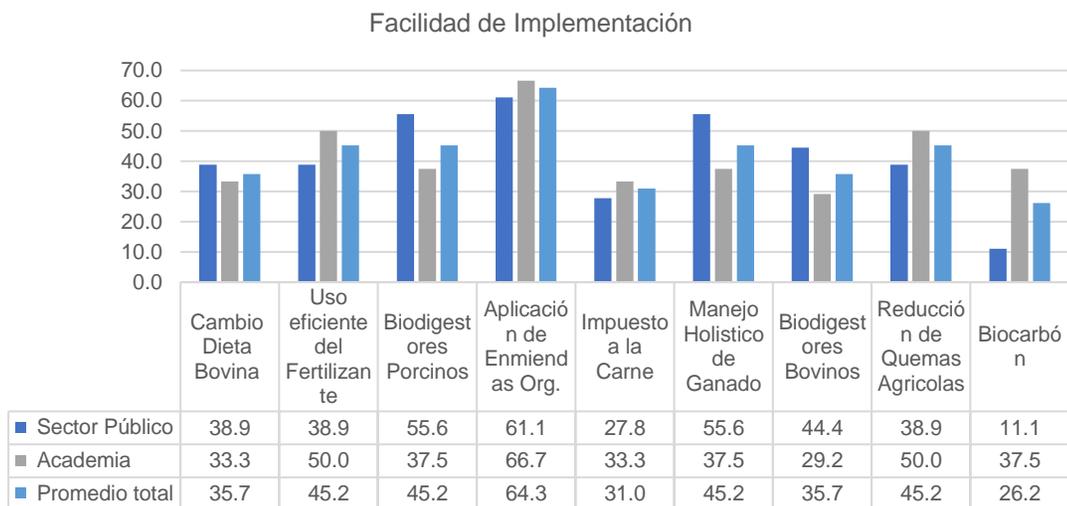
Para el subcriterio “Capacidades Técnicas”, la medida mejor evaluada fue “Reducción de Quemas Agrícolas”, con una nota promedio de 76,2. La medida que obtuvo la peor nota, fue “Planta de Producción de Biocarbón” con una nota promedio de 16,7. La medida que presenta una mayor variación entre los grupos de actores fue “Impuesto a la carne”, con una diferencia de 41,7 como se puede ver en la Figura 14. Es relevante mencionar, que para las respuestas de la evaluación de las medidas de los entrevistados del sector público, solo 2 de 3 evaluaron la medida “Impuesto a la carne”.



**Figura 14** Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Capacidades Técnicas”

#### 3.5.2.2.4 Subcriterio “Facilidad de implementación”

Para el subcriterio “Capacidades Técnicas”, la medida mejor evaluada fue “Aplicación de enmiendas orgánicas”, con una nota promedio de 64,3. La medida que obtuvo la peor nota, fue “Impuesto a la carne” con una nota promedio de 31. La medida que presenta una mayor variación entre los grupos de actores fue “Planta de Producción de Biocarbón”, con una diferencia de 26,4 como se puede ver en la Figura 15. Es relevante mencionar, que para las respuestas de la evaluación de las medidas de los entrevistados del sector público, solo 2 de 3 evaluaron la medida “Impuesto a la carne”.

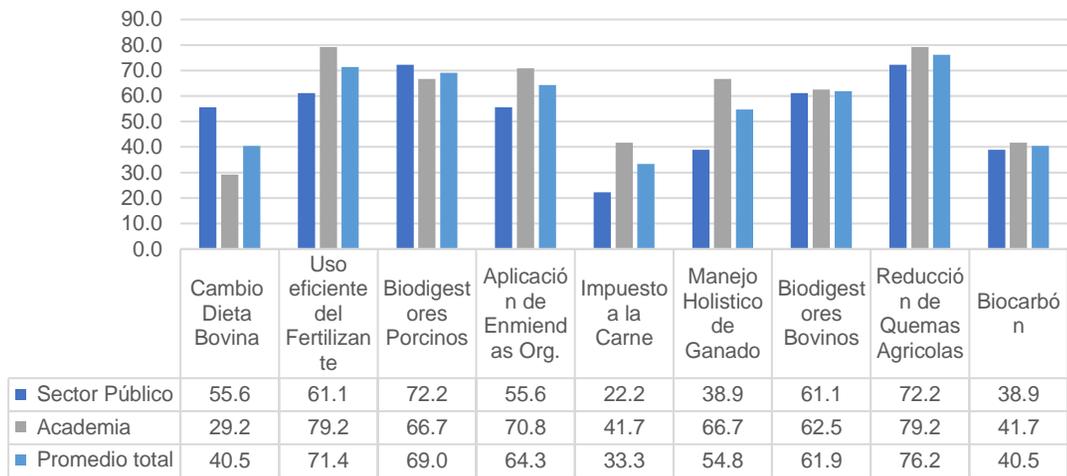


**Figura 15** Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Facilidad de Implementación”

### 3.5.2.2.5 Subcriterio “Co-beneficios Ambientales”

Para el subcriterio “Co-beneficios Ambientales”, la medida mejor evaluada fue “Reducción de Quemas Agrícolas”, con una nota promedio de 76,2. La medida que obtuvo la peor nota, fue “Impuesto a la carne” con una nota promedio de 33,3. La medida que presenta una mayor variación entre los grupos de actores fue “Manejo Holístico de Ganado”, con una diferencia de 26,4 como se puede ver en la Figura 16. Es relevante mencionar, que para las respuestas de la evaluación de las medidas de los entrevistados del sector público, solo 2 de 3 evaluaron la medida “Impuesto a la carne”.

### Co-Beneficios Ambientales

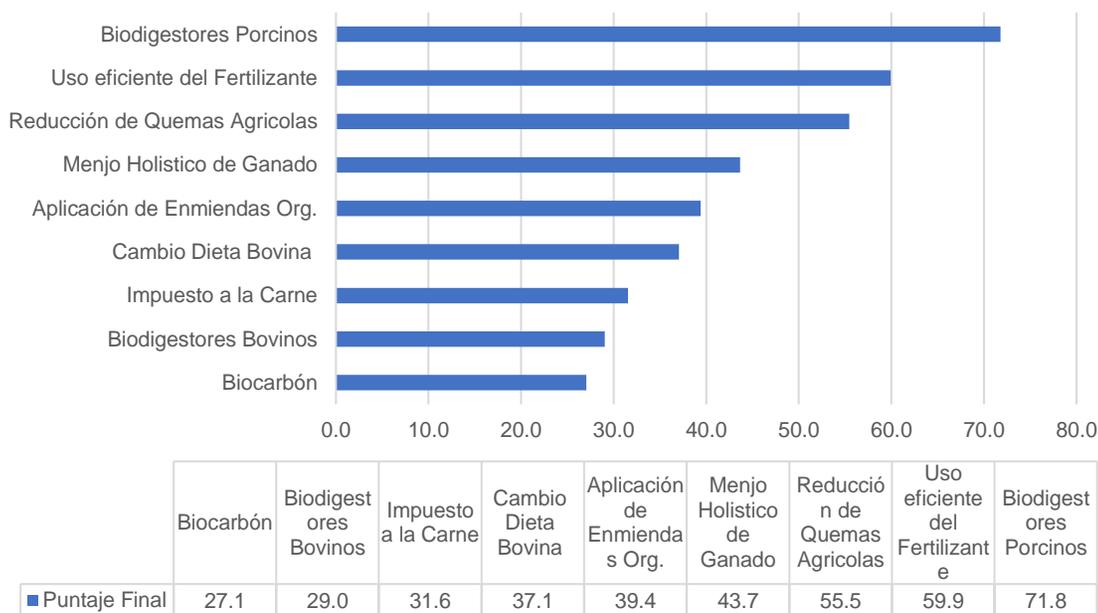


**Figura 16** Notas medidas según evaluación SMART diferenciado por grupo de actores, para el subcriterio “Co-beneficios Ambientales”

### 3.5.3 Ranking de medidas de mitigación mediante AHP

Los resultados de la priorización mediante el ranking a través de la ponderación de la Matriz de Jerarquías para la toma de decisiones por el puntaje obtenido de la evaluación cada una de las medidas diferenciados por grupo de actor se muestran en la Figura 17 para los entrevistados del sector Público y Figura 18 para los entrevistados de la Academia.

Los resultados muestran que las medidas que obtuvieron el mejor desempeño para ambos grupos de actores, fue “Biodigestores de Purines Porcinos” con un puntaje de 71,8 y para Sector Público y para la Academia. La medida que obtuvo un peor desempeño fue “Planta de producción de Biocarbón”, con un puntaje de 27,1 y 25, para Sector Público y Academia respectivamente.



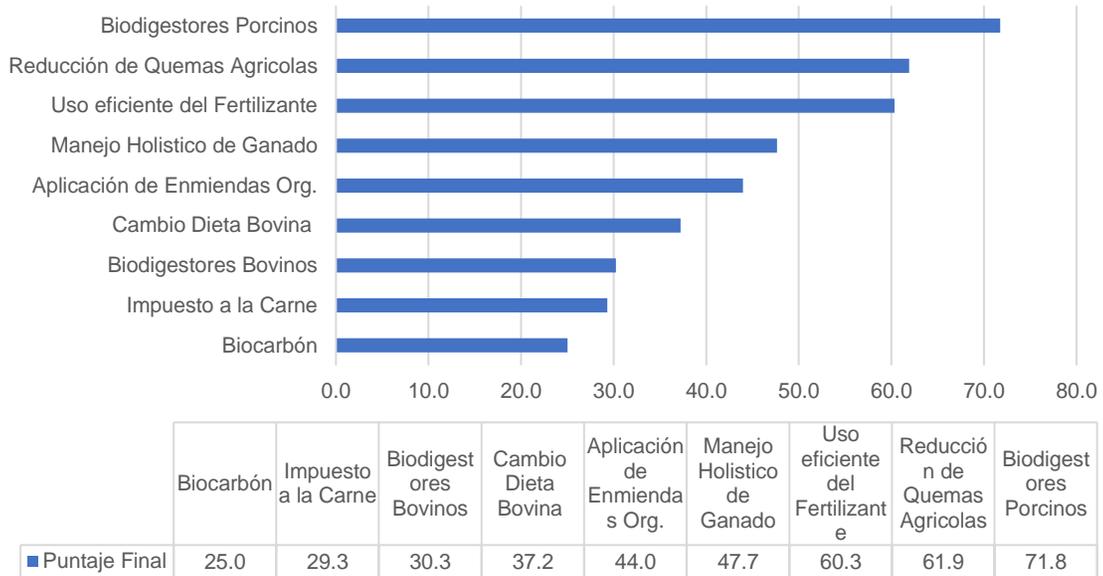
**Figura 17 Ranking de medidas priorizadas para grupo de actores Sector Público mediante AHP.**

El detalle del puntaje ponderado para cada medida por cada subcriterio, para el grupo de actores del “Sector Público” se muestra en la Tabla 21. Si bien la medida “Planta de Producción de Biocarbón” tiene un buen puntaje para el subcriterio Innovación y Costo-

efectividad, este no es suficiente para generar una puntuación alta en términos totales. Para el caso de Biodigestores de Purines Porcinos, no presenta el mejor puntaje en todos los subcriterios, tal como costo efectividad, tiene un alto puntaje en el subcriterio Potencial de reducción, siendo este subcriterio el que tiene mayor peso en la Matriz de Jerarquías para el grupo de actores del sector público.

**Tabla 21 Puntajes ponderados para cada una de las medidas de mitigación para grupo de actores Sector Público mediante AHP.**

Medida de Mitigación	Costo-Efectividad	Aceptabilidad Social	Empleo	Innovación	Capacidades Técnicas	Dificultad de implementación	Potencial de Reducción	Co-beneficios ambientales	Puntaje Final
Biodigestores Porcinos	10.3	2.2	4.2	6.4	8.0	7.2	28.2	5.3	71.8
Uso eficiente del Fertilizante	13.9	1.5	3.2	5.8	8.0	5.0	18.1	4.5	59.9
Reducción Quemas	20.3	3.2	3.7	5.1	9.2	5.0	3.6	5.3	55.5
Manejo Holístico Ganado	7.5	1.0	1.1	5.1	6.2	7.2	12.8	2.9	43.7
Aplicación Enmiendas Org.	5.9	1.2	1.0	3.9	6.8	7.9	8.7	4.1	39.4
Cambio Dieta Bovina	0.0	1.5	2.9	5.8	6.8	5.0	11.0	4.1	37.1
Impuesto a la Carne	0.0	0.2	0.0	6.4	2.8	3.6	16.9	1.6	31.6
Biodigestores Bovinos	4.8	2.2	0.3	7.1	4.3	5.7	0.1	4.5	29.0
Biocarbón	11.1	1.0	0.5	8.3	1.8	1.4	0.0	2.9	27.1



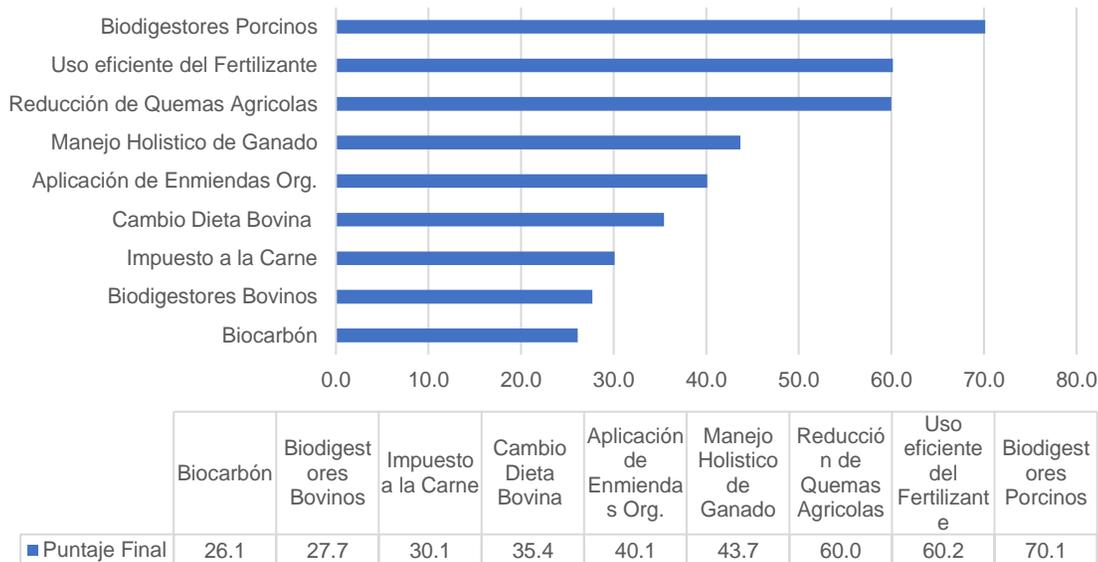
**Figura 18 Ranking de medidas priorizadas para grupo de actores Academia, mediante AHP, para el conjunto de medidas analizadas**

El detalle del puntaje ponderado para cada medida por cada subcriterio, para el grupo de actores del Academia se muestra en la Tabla 22. A diferencia del grupo de actores del Sector Público, para Academia, la medida en el segundo lugar del ranking es para la medida “Reducción de Quemas agrícolas”. Esta diferencia se produce principalmente porque el valor ponderado del subcriterio “Aceptabilidad Social”, presenta el valor más alto, es decir influye en un 26% para la toma de decisiones. Igualmente, existe un cambio en el ranking para la posición 7 y 8, que, en el caso de la Academia, se prioriza la medida “Biodigestores de Bovinos Porcinos” por sobre “Impuesto a la Carne”, principalmente por la baja nota obtenida en la evaluación de la medida para el subcriterio aceptabilidad social.

**Tabla 22 Puntajes ponderados para cada una de las medidas de mitigación para grupo de actores Academia mediante AHP.**

Medida de Mitigación	Costo-Efectividad	Aceptabilidad Social	Empleo	Innovación	Capacidades Técnicas	Dificultad de implementación	Potencial de Reducción	Co-beneficios ambientales	Puntaje Final

Biodigestores Porcinos	8.1	16.4	12.2	1.2	3.4	2.1	24.3	4.2	71.8
Reducción de Quemadas Agrícolas	15.9	18.5	10.7	0.6	5.3	2.8	3.1	5.0	61.9
Uso eficiente Fertilizante	10.9	12.0	9.3	1.1	3.7	2.8	15.6	5.0	60.3
Manejo Holístico Ganado	5.9	16.4	3.2	1.2	3.7	2.1	11.0	4.2	47.7
Aplicación Enmiendas Org.	4.7	16.4	2.8	0.8	3.7	3.7	7.5	4.4	44.0
Cambio Dieta Bovina	0.0	10.9	8.5	1.2	3.4	1.9	9.5	1.8	37.2
Biodigestores Bovinos	3.8	16.4	1.0	1.1	2.5	1.6	0.1	3.9	30.3
Impuesto a la Carne	0.0	4.4	0.0	1.0	4.9	1.9	14.6	2.6	29.3
Biocarbón	8.8	7.6	1.4	1.3	1.2	2.1	0.0	2.6	25.0



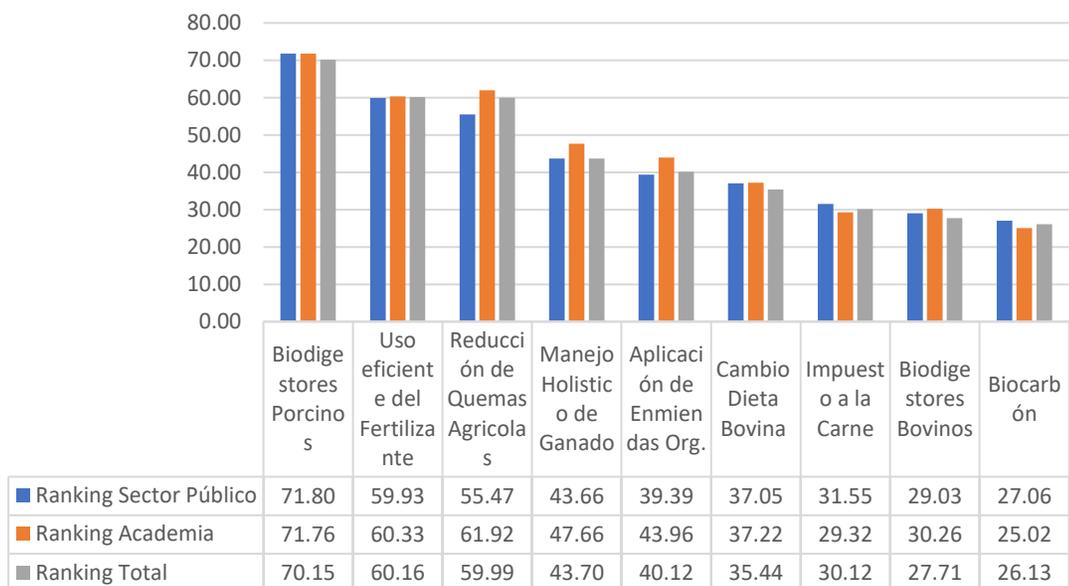
**Figura 19 Ranking de medidas priorizadas total, mediante AHP, para el conjunto de medidas analizadas**

Finalmente, para la ponderación de los subcriterios y evaluación cualitativa de las medidas considerando el total de las respuestas, la medida más valorada, es la implementación de “Biodigestores para Purines Porcinos” y la peor valorada, “Planta de Producción de Biocarbón”, como se muestra en la Tabla 23 y Figura 19.

**Tabla 23 Puntajes ponderados para cada una de las medidas de mitigación total mediante AHP.**

Medida de Mitigación	Costo-Efectividad	Aceptabilidad Social	Empleo	Innovación	Capacidades Técnicas	Dificultad de implementación	Potencial de Reducción	Co-beneficios ambientales	Puntaje Final
Biodigestores Porcinos	10.3	8.5	8.2	2.9	5.6	4.0	26.0	4.6	70.1
Uso eficiente Fertilizante	14.0	6.0	6.3	2.6	5.9	4.0	16.6	4.8	60.2
Reducción Quemadas	20.3	10.6	7.3	1.9	7.5	4.0	3.3	5.1	60.0
Manejo Holístico Ganado	7.5	6.7	2.2	2.8	5.2	4.0	11.8	3.7	43.7
Aplicación Enmiendas Org.	5.9	7.1	1.9	1.9	5.4	5.6	8.0	4.3	40.1
Cambio Dieta Bovina	0.0	5.6	5.8	2.9	5.2	3.1	10.1	2.7	35.4
Impuesto a la Carne	0.0	1.8	0.0	2.6	5.2	2.7	15.6	2.2	30.1
Biodigestores Bovinos	4.8	8.5	0.7	2.9	3.5	3.1	0.1	4.2	27.7
Biocarbón	11.2	3.9	0.9	3.5	1.6	2.3	0.0	2.7	26.1

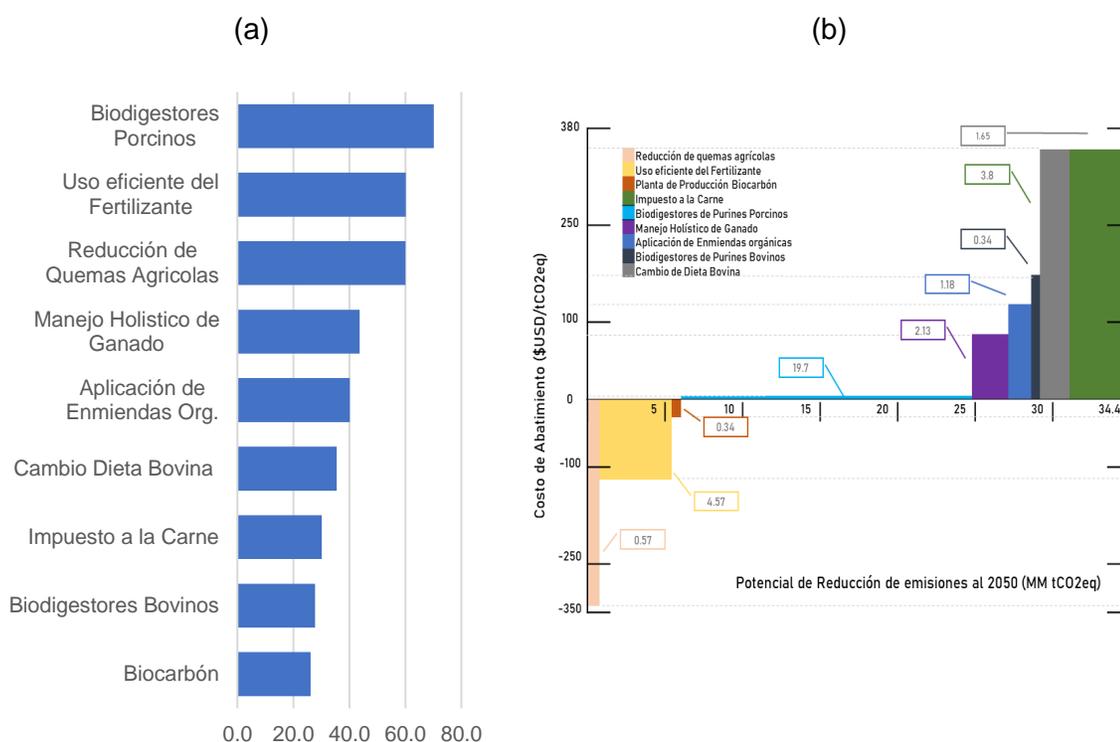
La diferencia entre la ponderación de los subcriterios y la evaluación cualitativa de las medidas ente ambos grupos de actores entregan un orden distinto en el ranking de priorización de las medidas de mitigación, sin embargo, el ranking total, genera el mismo orden que las medidas priorizadas por el sector Público.



**Figura 20 Comparación entre los resultados de Ranking de las medidas a través del AHP, entre el Sector Público, Academia y Ranking total**

### 3.5.3.1 Comparación entre ranking a través de AHP, versus Curvas MACC

El objetivo de emplear la metodología AHP, fue evaluar una herramienta para la toma de decisiones. Al comparar los resultados de las medidas priorizadas mediante el AHP con las Curvas MACC, se puede concluir que existe una priorización distinta pudiendo generar efectos en el orden de implementación y su potencial gasto público-privado, como podemos ver en la Figura 21.



**Figura 21 Resultado de Ranking de medidas de mitigación para metodología AHP y Curvas MACC**

Si estuviéramos bajo el supuesto de que la toma de decisiones para la implementación de las medidas estuviera basada en la costo-efectividad, esta debiera ser “Reducción Quemadas Agrícolas”, lo que difiere con la priorización mediante AHP, en parte por la baja Facilidad de implementación que considera elementos culturales dentro de su definición, y que en el contexto de Chile, no ha ocurrido por si sola, incluso existiendo evidencia que suprimir quemadas agrícolas es más rentable (Ruiz S et al., 2015).

Por consiguiente, segunda medida priorizada mediante la Curva MACC, sería “Uso eficiente del Fertilizante”, al igual que mediante el AHP, influenciado principalmente por su costo efectividad negativa (ahorros), sin embargo, el potencial de mitigación es relativamente bajo en comparación con “Biodigestores Porcinos”.

Se estimó que la costo-efectividad de la medida “Planta de Producción de Biocarbón” es baja, sin embargo, al priorizarla mediante el AHP, queda en último lugar del ranking, en cambio, la medida “Biodigestores de Purines Porcinos”, demostró ser la medida N°1 en la priorización de AHP, principalmente por su potencial de mitigación y costo-efectividad, además de ser una medida que no posee grandes dificultades de implementación, dado que existen capacidades técnicas a nivel nacional, y posee una alta aceptabilidad social, siendo una de las medidas más exitosas para el sector a nivel mundial (Fekete et al., 2021)

Es muy relevante entender el contexto en el cual se implementarán las medidas, debido a los cambios culturales y transformaciones requeridas para la apropiación y cambio de nuevas prácticas, como elementos claves para implementación de políticas de mitigación exitosas. Según las recomendaciones de la FAO, las políticas exitosas de mitigación para el sector, deben estar alineadas con las políticas nacionales de desarrollo, hacerse cargo de las principales barreras técnicas, asociadas principalmente al acceso a financiamiento, e involucrar a los distintos stakeholders que se verán afectados por la implementación de dichas medidas (FAO, 2013), ya que podrían encontrar una mayor resistencia debido a impactos distributivos adversos, así como a razones políticas y económicas (Jakob et al., 2014). Además, la falta de participación de las instituciones locales en la elaboración e implementación de los planes nacionales, deja fuera elementos claves para promover la implementación de sistemas agrícolas sostenibles (Souza Piao et al., 2021). Por otro lado, los modelos informáticos que utilizan los analistas carecen de un factor crucial, la política, (Peng et al., 2021), con un enfoque técnico sesgado a las prioridades del gobierno o las implicancias para su

implementación (Borges & Villavicencio, 2004), conduciendo a políticas que pueden fracasar.

Como metodología para la toma de decisiones, se utilizó el MCDA, bajo el AHP, que permite evaluar aspectos mencionados anteriormente, y ha sido ampliamente utilizado en la evaluación y priorización de medidas/políticas de mitigación al Cambio Climático (Borges & Villavicencio, 2004; Pandey & Bajracharya, 2013; Sugathapala, 2020). Un estudio realiza un análisis de los criterios y subcriterios para la evaluación de medidas de mitigación para el sector Energía en 8 países de la UE, aplicando el método Analítico Jerárquico (AHP), y considera la metodología MAUT y SMART para la evaluación de los instrumentos de mitigación en el marco de la ETS-EU, (Konidari & Mavrakis, 2007), siendo consistente y robusto.

Actualmente Chile, se encuentra en fase de desarrollo, la asignación de Presupuestos de Carbono Sectorial, estableciendo los criterios costo-efectividad y principio de equidad (asignación justa, de acuerdo a las necesidades de desarrollo de los sectores), para asignación de presupuestos (Ministerio del Medio Ambiente, 2021b), en base a lo anterior, el AHP puede generar una herramienta alternativa que permita integrar elementos cualitativos y cuantitativos para la priorización.

## 4 CONCLUSIONES

El estudio permitió, por una parte, proyectar las emisiones de GEI del Sector Agricultura hasta el 2050, lo que permitió evaluar el efecto de distintas medidas de acción dentro del sector, en el que se generó un escenario de referencia o “Escenario BAU” y un “Escenario de Mitigación”, para la evaluación del aporte a los compromisos internacionales en materia de Cambio Climático. Por otra parte, se propone una metodología para facilitar la toma de decisiones en la priorización de medidas de mitigación a través de un Análisis de Decisión Multicriterio a través del Proceso Analítico Jerárquico, considerando la opinión de expertos en su evaluación.

Se estimó un potencial de mitigación evaluada en una reducción de 32,9 MtCO<sub>2</sub>eq para el periodo 2019-2050, lo que equivale a un 8,6% del total acumulado de emisiones para el periodo. Conjuntamente, se estimó un potencial de mitigación plausible, logrando una reducción de 19,81MtCO<sub>2</sub>eq, considerando aquellas medidas que prestan un costo de abatimiento menor al Precio Social del Carbono (32,5 USD/tCO<sub>2</sub>eq) (Sistema Nacional de Inversiones, 2021), reduciendo un 5,9% del total acumulado de emisiones para dicho periodo. Desde la perspectiva de emisiones anuales, el “Escenario de Mitigación”, reduce en un 5,28% y 14,6% las emisiones anuales para el 2030 y 2050, en comparación al escenario de referencia, quedando por debajo del promedio mundial esperado para el sector, que se espera que las emisiones no-CO<sub>2</sub> al 2030 del sector Agricultura se reduzca entre un 11% y 18%, para restringir el calentamiento global en no más de 2°(Wollenberg et al., 2016).

Respecto a los resultados del Análisis de Decisión Multicriterio para la toma de decisiones, el ranking priorizado difiere al orden generado mediante las Curvas de Costos de Abatimiento Marginales, generado principalmente por la integración de criterios sociales, ambientales y económicos dentro del análisis, en el cual se presenta una inclinación por aquellas medidas que tienen un alto potencial de mitigación, aceptabilidad social, facilidad de implementación y capacidades técnicas existentes para su ejecución. Se recomienda la evaluación de metodología propuesta, para la

priorización de medidas actuales en la cual se encuentra trabajando el Ministerio del Medio Ambiente en la asignación de Presupuesto de Carbono Sectorial (Ministerio del Medio Ambiente, 2021b), a través de la construcción de la Matriz de Jerarquías bajo un proceso participativo, involucrando a los distintos stakeholders para mayor efectividad.

Finalmente, en Chile, se recomienda avanzar en el desarrollo de metodologías de cuantificación de carbono en suelos para tierras de cultivos como potencial fuente de sumidero de carbono. A nivel mundial, la reducción de emisiones efectivas requiere de compromisos multilaterales para limitar la fuga de emisiones, la consideración más amplia de opciones tecnológicas de mitigación y la consideración de opciones que reduzcan las emisiones desde la demanda (o el consumo). (Fellmann et al., 2018; Leahy et al., 2020)

## 5 RESUMEN

Chile se ha comprometido a una reducción de aproximada del 30% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al 2030, y menciona el interés por lograr la carbono neutralidad para el año 2050. Actualmente, el sector Agricultura representa un 10,5% de las emisiones de GEI a nivel nacional. El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial de reducción de emisiones GEI al 2050 en el sector Agricultura, aplicando un conjunto de medidas de mitigación que son priorizadas mediante un Análisis de Decisión Multicriterio bajo el Proceso Analítico Jerárquico, y comparándolas con la priorización de la Curva de Costos Marginales de Abatimiento. En este trabajo, se elaboraron dos escenarios. El primero corresponde a un “Escenario Mitigación”, que considera el conjunto de medidas analizadas, y el segundo a un “Escenario Mitigación Plausible”, que considera solo aquellas medidas que tienen un costo de abatimiento menor al Precio Social del Carbono. Los resultados muestran que la reducción mayor se produce bajo el “Escenario de Mitigación”, pero el Costo de Abatimiento promedio es 1,6 veces mayor por tonelada reducida que bajo el “Escenario de Mitigación Plausible”. La reducción del sector Agricultura en Chile al 2030, es menor que la esperada a nivel mundial para lograr limitar la temperatura en 2°C. El Análisis de Decisión Multicriterio demostró ser capaz de influir en la toma de decisiones, al incorporar criterios ambientales, sociales y económicos (foco en transición justa) para la priorización de medidas de mitigación.

**Key Words:** Mitigación, Cambio Climático, Agricultura, Análisis de Decisión Multicriterio

## 6 BIBLIOGRAFÍA

Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)* (Vol. 277). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9>

Antosiewicz, M., & Kowal, P. (2016). *MEMO III - A LARGE SCALE MULTI-SECTOR DSGE MODEL*. 33.

Beauchemin, K. A., McGinn, S. M., & Petit, H. V. (2007). Methane abatement strategies for cattle: Lipid supplementation of diets. *Canadian Journal of Animal Science*, 87(3), 431–440. <https://doi.org/10.4141/CJAS07011>

Benavides, C., Cifuentes, L., Díaz, M., Gilabert, H., Gonzalez, L., Gonzáles, D., Groves, D., Jaramillo, M., Marinkovic, C., Menares, L., Meza, F., Molina, E., Montedónico, M., Palma, R., Pica-Téllez, A., Salas, C., Torres, R., Vicuña, S., Valdés, J. M., & Vogt-Schilb, A. (2021). *Opciones para lograr la carbono-neutralidad en Chile: Una evaluación bajo incertidumbre*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Opciones-para-lograr-la-carbono-neutralidad-en-Chile-una-evaluacion-bajo-incertidumbre.pdf>

Berumen, S. A., & Redondo, F. L. (2007). *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el ahp) en un entorno de competitividad creciente*. 25.

Bockel, L., Jönsson, M., Sutter, P., & Touchemoulin, O. (2012). *Using Marginal Abatement Cost Curves to Realize the Economic Appraisal of Climate Smart Agriculture Policy Options*. 36.

Borges, P. C., & Villavicencio, A. (2004). Avoiding academic and decorative planning in GHG emissions abatement studies with MCDA: *European Journal of Operational Research*, 152(3), 641–654. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00063-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00063-8)

Cofré, C. R. (2019). *Documento de Trabajo: Comportamiento y caracterización de la producción de ganado bovino en Chile*. Instituto Nacional de Estadísticas.

del Pozo, A., Engler, A., & Meza, F. (2021). *Agricultural sciences in Chile: Institutions, human resources, investment and scientific productivity*. 81(4). <https://doi.org/10.4067/S0718-58392021000400664>

Edwards, W., & Barron, F. H. (1994). SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60(3), 306–325. <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>

Eory, V., Topp, C. F. E., & Moran, D. (2013). Multiple-pollutant cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation measures in the UK agriculture. *Environmental Science & Policy*, 27, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.11.003>

FAO. (2013). *National planning for GHG mitigation in agriculture: A guidance document* -. 39.

FAO. (2021). *FAOSTAT Climate Change, Emissions, Manure Management*. Elsevier.

Fekete, H., Kuramochi, T., Roelfsema, M., Elzen, M. den, Forsell, N., Höhne, N., Luna, L., Hans, F., Sterl, S., Olivier, J., van Soest, H., Frank, S., & Gusti, M. (2021). A review of successful climate change mitigation policies in major emitting economies and the potential of global replication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110602. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110602>

Fellmann, T., Witzke, P., Weiss, F., Van Doorslaer, B., Drabik, D., Huck, I., Salputra, G., Jansson, T., & Leip, A. (2018). Major challenges of integrating agriculture into climate change mitigation policy frameworks. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23(3), 451–468. <https://doi.org/10.1007/s11027-017-9743-2>

Gerber, P., Henderson, B., & Makkar, H. P. S. (2013). *Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera*. 251.

Gobierno de Chile. (2020). *Contribución Nacional Determinada (NDC) de Chile*.

IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (Volumen 1: Orientación general y generación de informes). [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1\\_Volume1/V1\\_1\\_Ch1\\_Introduction.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf)

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* ([Equipo Principal de Redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (Eds.)], p. 157). [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)

IPCC. (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* [Anexo 1: Glosario]. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15\\_Glossary\\_spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf)

Jakob, M., Steckel, J. C., Klasen, S., Lay, J., Grunewald, N., Martínez-Zarzoso, I., Renner, S., & Edenhofer, O. (2014). Feasible mitigation actions in developing countries. *Nature Climate Change*, 4(11), 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate2370>

Kesicki, F. (2011). *Marginal abatement cost curves for policy making – expert-based vs. Model-derived curves*. 19.

Kesicki, F., & Ekins, P. (2012). Marginal abatement cost curves: A call for caution. *Climate Policy*, 12(2), 219–236. <https://doi.org/10.1080/14693062.2011.582347>

Kesicki, F., & Strachan, N. (2011). Marginal abatement cost (MAC) curves: Confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy*, 14(8), 1195–1204. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.08.004>

Konidari, P., & Mavrakis, D. (2007). A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments. *Energy Policy*, 35(12), 6235–6257. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.07.007>

Leahy, S., Clark, H., & Reisinger, A. (2020). Challenges and Prospects for Agricultural Greenhouse Gas Mitigation Pathways Consistent With the Paris Agreement. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 69. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00069>

Masson-Delmotte, V., Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, & United Nations Environment Programme. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems: summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Ministerio de Agricultura. (2014). *Informe Final: Proyección Escenario Línea Tendencial 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Silvoagropecuario y Cambio de Uso de Suelo*.

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Informe del Inventario de Gases Efecto Invernadero de Chile, serie 1990-2016*. [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/07/2018\\_NIR\\_CL.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/07/2018_NIR_CL.pdf)

Ministerio del Medio Ambiente. (2021a). *Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018*.

Ministerio del Medio Ambiente. (2021b). *Propuesta Metodológica para determinar presupuestos de carbono sectoriales*. Estrategia Climática de Largo Plazo. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/20210121-Minuta-Presupuestos-de-carbono-sectoriales.pdf>

Oddos, C. (2011). *Priorización de medidas de mitigación de emisiones GEI usando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) [Tesis de Título, Pontificia Universidad Católica de Chile]*. 61.

ONU. (2015). *Acuerdo de París*.

Pandey, R., & Bajracharya, T. (2013). *Selection of appropriate Renewable Energy Technology in household sub-sector for Climate Mitigation and Adaptation*.

Peng, W., Iyer, G., Bosetti, V., Chaturvedi, V., Edmonds, J., Fawcett, A. A., Hallegatte, S., Victor, D. G., van Vuuren, D., & Weyant, J. (2021). Climate policy models need to get real about people—Here's how. *Nature*, 594(7862), 174–176. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01500-2>

Ruiz S, C., Saavedra T, M., Carrasco C, V., & Instroza F, W. (2015). *Transferencia tecnológica prácticas alternativas al uso del fuego*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7868>

Rumpel, C., Amiraslani, F., Koutika, L.-S., Smith, P., Whitehead, D., & Wollenberg, E. (2018). Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges. *Nature*, 564(7734), 32–34. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07587-4>

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

Senado de la República de Chile. (2020). *Proyecto de Ley que fija ley Marco de Cambio Climático* (Boletín 13).

Sistema Nacional de Inversiones. (2017). *Precio Social del CO2*. Subsecretaría de Evaluación Social. <http://sni.gob.cl/storage/docs/Precio%20Social%20del%20CO2.pdf>

Sistema Nacional de Inversiones. (2021). *Precios Sociales Vigentes 2021*. Subsecretaría de Evaluación Social. [http://sni.gob.cl/storage/docs/Precios\\_Sociales\\_Vigentes.pdf](http://sni.gob.cl/storage/docs/Precios_Sociales_Vigentes.pdf)

Souza Piao, R., Silva, V. L., Navarro del Aguila, I., & de Burgos Jiménez, J. (2021). Green Growth and Agriculture in Brazil. *Sustainability*, 13(3), 1162. <https://doi.org/10.3390/su13031162>

Sugathapala, T. (2020). Multi-criteria assessment of energy sector nationally appropriate mitigation actions in Sri Lanka. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463, 012181. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012181>

The Carbon Underground. (2017). *¿ Qué es Agricultura Regenerativa ?* 1–2.

Ulibarry, P. G. (2019). *Consumo y mercado de los fertilizantes*. *Asesoría Técnica Parlamentaria*, 5.

Valin, H., Havlík, P., Mosnier, A., Herrero, M., Schmid, E., & Obersteiner, M. (2013). *Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: Trade-offs or synergies between mitigation and food security?* 8(3), 035019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035019>

Villar, A., & Kuhlmann, A. (2015). *Metodología para la priorización de medidas de adaptación frente al Cambio Climático: Guía de uso y difusión*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Vogt-Schilb, A., & Hallegatte, S. (2014). Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures. *Energy Policy*, 66, 645–653. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.045>

Wollenberg, E., Richards, M., Smith, P., Havlík, P., Obersteiner, M., Tubiello, F. N., Herold, M., Gerber, P., Carter, S., Reisinger, A., Vuuren, D. P., Dickie, A., Neufeldt, H., Sander, B. O., Wassmann, R., Sommer, R., Amonette, J. E., Falcucci, A., Herrero, M., ... Campbell, B. M. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2 °C target. *Global Change Biology*, 22(12), 3859–3864. <https://doi.org/10.1111/gcb.13340>

Xu, Y., Ramanathan, V., & Victor, D. G. (2018). Global warming will happen faster than we think. *Nature*, 564(7734), 30–32. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07586-5>

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Uses
AHP	analytic hierarchy process
CAPEX	Capital Expenditure
	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio
CMNUCC	Climático
COP	Conference Of the Parties
GEI	Gases de Efecto Invernadero
INGEI	Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero
MACC	Marginal Abatement Cost Curve
MCDA	Multi-criteria Decision Analysis
MtCO <sub>2</sub> eq	Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente
NDC	National Determinate Contribution
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEX	Operational Expenditure

## 7 ANEXOS

### 7.1.1 ANEXO I: *Parámetros estadísticos Regresiones Proyección Ganado*

Para cada uno de los modelos utilizados en la estimación de stock de ganado, se realizó una prueba de los supuestos mínimos que deben cumplir las Regresiones Lineales Simples y Múltiples. Se comprobó normalidad de los residuos y test de heterocedasticidad.

#### 7.1.1.1 Ganado Bovino

```
> lm_Cattle33 <- lm( log(Stock.Cattle_SNP) ~ log(MEAT_PRICE_OCDE_CLP) )
> summary(lm_Cattle33)
```

Call:

```
lm(formula = log(Stock.Cattle_SNP) ~ log(MEAT_PRICE_OCDE_CLP))
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.15219	-0.02949	-0.01037	0.02079	0.11482

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	19.20849	0.51076	37.608	< 2e-16	***
log(MEAT_PRICE_OCDE_CLP)	-0.28633	0.03552	-8.062	2.04e-08	***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.06404 on 25 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.7222, Adjusted R-squared: 0.7111  
F-statistic: 64.99 on 1 and 25 DF, p-value: 2.043e-08

Normalidad de los Residuos y heterocedasticidad.

```
> shapiro.test(lm_Cattle32$residuals)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: lm\_Cattle32\$residuals  
W = 0.93331, p-value = 0.08334

```
> ncvTest(lm_Cattle32)
```

Non-constant Variance Score Test  
Variance formula: ~ fitted.values  
Chisquare = 2.251303, Df = 1, p = 0.1335

### 7.1.1.2 Ganado Porcino

```
> lm_pork3 <- lm( log(Stock_Porcinos_SNP) ~ log(MAIZE_PRICE_OCDE_CLP) )  
> summary(lm_pork3)
```

Call:

```
lm(formula = log(Stock_Porcinos_SNP) ~ log(MAIZE_PRICE_OCDE_CLP))
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.45995	-0.12258	0.00251	0.12734	0.38175

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	5.64695	0.88621	6.372	6.77e-07 ***
log(MAIZE_PRICE_OCDE_CLP)	0.79537	0.07842	10.142	7.04e-11 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1878 on 28 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.786, Adjusted R-squared: 0.7784

F-statistic: 102.9 on 1 and 28 DF, p-value: 7.042e-11

#### Normalidad de los residuos

```
> shapiro.test(lm_pork3$residuals)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: lm\_pork3\$residuals

W = 0.98817, p-value = 0.9784

#### heterocedasticidad.

```
> ncvTest(lm_pork3)
```

Non-constant Variance Score Test

Variance formula: ~ fitted.values

Chisquare = 1.621041, Df = 1, p = 0.20295

### 7.1.1.3 Aves de Corral

```
> summary(lm_chick8)
```

```
Call:
```

```
lm(formula = log(Stock.Ganado.Pollos) ~ log(Precio_soya_OCDE),  
    data = data_chick)
```

```
Residuals:
```

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max  
-0.12017 -0.07216 -0.01726  0.06960  0.22231
```

```
Coefficients:
```

```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept)    13.44632    0.46110   29.161 < 2e-16 ***  
log(Precio_soya_OCDE)  0.34684    0.03801    9.124 9.76e-10 ***  
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.09112 on 27 degrees of freedom  
Multiple R-squared:  0.7551,    Adjusted R-squared:  0.746  
F-statistic: 83.26 on 1 and 27 DF,  p-value: 9.761e-10
```

#### Test de normalidad de los residuos

```
> #Normalidad de los Residuos#  
> shapiro.test(lm_chick8$residuals)
```

```
Shapiro-wilk normality test
```

```
data:  lm_chick8$residuals  
W = 0.93553, p-value = 0.07662
```

#### Homocedasticidad de los Residuos

```
> #homocedasticidad de los residuos#  
> ncvTest(lm_chick8)  
Non-constant Variance Score Test  
Variance formula: ~ fitted.values  
Chisquare = 0.2419782, Df = 1, p = 0.62278
```

## 7.1.2 Anexo II: Medidas de Mitigación

### 7.1.2.1 Cambio de Dieta Bovina

Nombre	Cambio en la Dieta Bovina (aditivo lipídico)
Descripción general	Esta medida considera un componente adicional en la dieta en el ganado a partir del uso de concentrado(pellet) en combinación con aditivos para optimizar el funcionamiento del rumen, disminuyendo la excreción de metanogénesis.
<b>Modelado</b>	
Principales supuestos	En el escenario de NDC, su medida consideró la mejora de la dieta del 70% del ganado lechero para 2040, comenzando su implementación en 2030 y considerando un crecimiento lineal. Se consideró que una vaca lechera vive 7 años y que los sistemas de manejo son 75% pastoral y 25% confinamiento. Se consideró que el factor de emisión de metano entérico de animales alimentados con una dieta mejorada con incorporación de concentrados con lípidos (3%adicional), se reduce en un 17% (Beauchemin et al., 2007)
Elementos de costos	No se consideraron costos de inversión para esta medida. Los costos de explotación están asociados al uso de alimentos con una mayor concentración de lípidos(3% adicional), para lo cual se consideró un coste adicional del 14% en comparación con la dieta original. El costo anual de alimentar a una vaca lechera sin la medida se estimó en\$721,016, y un Precio de \$820.392, con el aditivo lipídico.
Referencias	Aceite de semilla de girasol Precio: <a href="https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/70638">https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/70638</a> Beauchemin, K. A., McGinn, S.M., & Petit, H. V. (2007). Estrategias de reducción del metano para el ganado: Suplementación lipídica de dietas. Canadian Journal of Animal Science, 87(3), 431–440. <a href="https://doi.org/10.4141/CJAS07011">https://doi.org/10.4141/CJAS07011</a>

### 7.1.2.2 Biodigestores de Purines Porcinos

Nombre	Biodigestores de Purines Porcinos
Descripción General	Esta medida considera la implementación de biodigestores a nivel predial para transformar las emisiones de metano (CH <sub>4</sub> ) generadas en pozos o lagunas de acumulación de residuos orgánicos (purines y/o estiércoles), en dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), reduciendo el factor de emisión asociado a la generación de gas.
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Esta medida consideró la implementación de biodigestores y una planta de biogás para generación de energía, con una capacidad promedio de procesamiento de purines de 31,102m <sup>3</sup> . Para los cerdos se consideró una generación anual de estiércol de 2,02 m <sup>3</sup> / año porcino. La implementación de esta medida se consideró a partir de 2020 para el tratamiento de purines porcinos, partiendo de una penetración del 27% y considerando un crecimiento paulatino hasta 2030 con un 42% de cabezas de cerdo.
Elementos Costos	de Se considera un CAPEX unitario de \$ 1,555,024 USD por planta + planta y un OPEX anual de \$ 198,976 por unidad de planta, y un ahorro adicional en la energía térmica y eléctrica producida por la planta de biogás.

### 7.1.2.3 Uso eficiente del fertilizante

Nombre	Uso eficiente de fertilizantes
Descripción General	Esta medida considera la implementación de un Programa integral de capacitación, cooperación y apoyo técnico para mejorar la utilización de fertilizantes en cultivos, específicamente las prácticas asociadas a los usos excesivos de fertilizantes minerales.
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Esta medida analizó fertilizantes nitrogenados, específicamente urea. Se consideró al 2035, la aplicación de un 20% menos de fertilizantes nitrogenados en cultivos de cereales y semilleros de cereales, y un 15% menos de fertilizantes nitrogenados sin inhibidores para cultivos industriales y forrajeras, producto de las medidas de asistencia técnica aplicado en suelos de secano y de riego no mecanizado (leaching/runoff) o sometido a volatilización. Se consideró como fecha de inicio de implementación lineal de la medida a partir del año 2025 hasta el 2035.
Elementos Costos	de Esta medida no requiere costos de inversión. Para calcular el ahorro de la medida se consideró un precio ponderado de nitrógeno mineral de 491 USD/ton una reducción de calcula como un valor actual de costos (VAC) de la reducción.

### 7.1.2.4 Aplicación de enmiendas orgánicas

Nombre	Aplicación de enmiendas orgánicas
Descripción General	Secuestro de carbono en suelos como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas (estiércol avícola) aplicadas a suelos de cultivos anuales. Implementación a partir de 2029, alcanzando el 10% de la superficie en 2034 y manteniéndose constante hasta 2050.
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Utilizando la Metodología de Nivel 1 del IPCC 2006 (Vol 4, Capítulo 2, Ecuación 2.25 Vol), se consideraron diferentes tipos de manejo (Vol 4, Capítulo 5, tabla 2 - Factores relativos de cambio en las existencias (FLU, FMG y FI) (más de 20 años para diferentes actividades de manejo en tierras de cultivo), considerando el FI (Factor de entrada)= Alto en abono para régimen térmico templado. Supone que el 12% de los aportes de carbono del estiércol de aves de corral se retiene como COS en los suelos (Maillard & Angers, 2014). Se consideraron las emisiones de nitrógeno
Elementos Costos	de La estimación de Costos considera el precio promedio entregado por 3 cotizaciones de m3 de guano de aves (Promedio \$ 11,000CLP/m3 (precio de referencia del agricultor) + \$ 6,000CLP/m3 (estudio de caso de referencia de quinua) + \$ 2000CLP/m3 (Vial empresa)/3 = \$ 7000 CLP/m3) + más el costo unitario de transporte (CLP \$ 250.000 costo de transporte para transportar 22m3), por lo que la unidad es \$ 11.364 por m3 y también datos sobre la unidad de trabajo (30m3 = CLP ha/año = \$ 13.000 unidad \$ 433 m3) = \$ CLP18,979/792 (promedio dólar 2020) = 39,601 el valor por m3 de estiércol. Además, se considera un aumento adicional de rendimiento de 30Kg/ha * 0.5tonCO2eq/ha
Referencias	Maillard, É., & Angers, D. A. (2014). Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis. <i>Global Change Biology</i> , 20(2), 666–679. <a href="https://doi.org/10.1111/gcb.12438">https://doi.org/10.1111/gcb.12438</a>

### 7.1.2.5 Manejo Holístico de Ganado

Nombre Medida	Manejo Holístico de Ganado – Ganadería Regenerativa
Descripción General	Se define la ganadería regenerativa como la búsqueda de la restauración y mantención los sistemas naturales, como los ciclos de agua y carbono, para permitir que el suelo siga produciendo alimentos de forma más sana para las personas y la salud a largo plazo del planeta y su clima (The Carbon Underground, 2017). El Manejo Holístico de Ganado es un enfoque que busca optimizar la toma de decisiones en distintos ámbitos, equilibrando consideraciones sociales, ambientales y financieras, regulando la planificación, monitoreo, control y replanificación de praderas y carga animal, aumentando los contenidos de materia orgánica en suelos, pudiendo mejorar la productividad de praderas. La captura de carbono se produce por un aumento de los contenidos de materia orgánica en suelos.
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Se considera que un 20% de la superficie de praderas bovinas de la Región de Los Lagos (aproximadamente el 32% del ganado bovino), aplican prácticas de Manejo Holístico de Ganado, aumentando la productividad de praderas, aumentando productividad de praderas de 10.026Kg MS/ha año a 12254 KgMS/ha año, aumentando los contenidos de Materia orgánica en suelos. Se consideró una captura anual media de -0.2tonCO <sub>2</sub> eq/ha año. La medida comienza a implementarse el 2030, llegando a un 20% al 2030
Elementos de Costos	Se consideró un aumento en las HH de planificación de medición de Kg MS/ha y pastoreo, considerando un valor de \$30.000 Jornada hombre día, considerando una cantidad requerida por ha/año de 0.48, con un costo anual de \$14.400CLP/año. Se consideró además Mano de Obra de separación predios/mantención de cercos a un valor de \$20.000 Jornada hombre día, considerando una cantidad requerida por ha/año de 4.8, con un costo anual de \$96.000CLP/año. Esto genera un costo extra de operación anual de \$110.400. Se considera un ahorro de alimentación por aumento de KgMS/ha año de \$51.784 CLP/año. El costo total de la medida por ha es de \$73.99USD/año, considerando el precio promedio del valor del dólar del año 2020 (792CLP/USD).
Referencias	The Carbon Underground. (2017). ¿ Qué es Agricultura Regenerativa ?, 1–2. <a href="https://thecarbonunderground.org/our-initiative/definition/">https://thecarbonunderground.org/our-initiative/definition/</a>

### 7.1.2.6 Biodigestores de Purines Bovinos

Nombre	Biodigestores de Purines Bovinos
Descripción General	Esta medida considera la implementación de biodigestores a nivel predial para transformar las emisiones de metano (CH <sub>4</sub> ) generadas en pozos o lagunas de acumulación de residuos orgánicos (purines y/o estiércoles), en dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), reduciendo el factor de emisión asociado a la generación de gas .
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Esta medida consideró la implementación de biodigestores en plantales de Bovinos en confinamiento, alcanzando un 80% de las cabezas de ganado al 2037, comenzando el 2030. Se consideró una generación anual de estiércol de 20, m <sup>3</sup> /año, y 115 vacas por plantel.
Elementos de Costos	Se considera un CAPEX unitario de 12.5 USD/m <sup>2</sup> de purín. OPEX anual de \$1.43 USD/m <sup>3</sup> . No se consideraron ahorros en energía para este caso. .

### 7.1.2.7 Disminución Quemias Agrícolas

Nombre	Disminución de quemias agrícolas
Descripción General	Esta medida considera sustitución de la agricultura tradicional (que supone quemias de rastrojos) por agricultura de mínima labranza en el 80% del total de hectáreas donde se realizan quemias agrícolas. La medida supone el comienzo de la implementación en el año 2023. Al disminuir la quema de residuos agrícolas se evitan las emisiones de metano (CH <sub>4</sub> ) y de óxido nitroso (N <sub>2</sub> O), y se ahorra en compra de fertilizantes al aprovechar los nutrientes de los rastrojos de cultivos (Acevedo, 2003; ODEPA, 2017).
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Dado que la superficie de quemias agrícolas se ha mantenido entre el 2007 y 2016, se decide calcular el promedio de hectáreas quemadas de los últimos 10 años y mantener esas hectáreas al 2030
Elementos Costos	de Se considera la inversión por la compra de maquinaria cero labranza (tractor, sembradora cero labranza, pulverizador, trompo), costos de operación (insumos, maquinaria, mano de obra, arriendo terreno y ahorro en utilización de fertilizantes (para el cálculo se consideraron los nutrientes presentes en el rastrojo de trigo) (Acevedo, 2003; ODEPA, 2017).
Referencias	Acevedo, E. (2003). Sustentabilidad en cultivos anuales: Cero labranza manejo de rastrojos: Vol. No8. Universidad de Chile, Departamento de Producción Agrícola. <a href="http://cultivatuhuerto.cl/sitio/wp-content/uploads/2018/09/Sustentabilidad_en_cultivos_anuales-1-no-borrar.pdf">http://cultivatuhuerto.cl/sitio/wp-content/uploads/2018/09/Sustentabilidad_en_cultivos_anuales-1-no-borrar.pdf</a> Araya, J., Duprat, C., & Parra, M. (2009). Alternativas de Reemplazo a las Quemias de Residuos Agrícolas y Forestales. Corporación Nacional Forestal (CONAF). <a href="https://www.prevencionincendiosforestales.cl/documento/alternativas-de-reemplazo-a-las-quemias-de-residuos-agricolas-y-forestales/">https://www.prevencionincendiosforestales.cl/documento/alternativas-de-reemplazo-a-las-quemias-de-residuos-agricolas-y-forestales/</a> Ministerio de Medio Ambiente. (2021). Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018. Oficina de Cambio Climático. ODEPA. (2017). Series Quinquenales. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. <a href="https://www.odepa.gob.cl/precios/avance-por-productos">https://www.odepa.gob.cl/precios/avance-por-productos</a>

### 7.1.2.8 Utilización Biocarbón

Nombre	Utilización de Biocarbón
Descripción General	Esta medida considera la implementación de una planta mediana para producción biocarbón, donde el producto es aplicado en terrenos agrícolas con el fin de secuestrar carbono en el suelo. A partir de desechos de madera se genera biocarbón a través de la pirolisis de esta biomasa. Se asume que luego de la pirolisis, el contenido de carbono en el biocarbón es de 72% y que de ese total un 68% permanece como carbono estabilizado en el suelo por más de 100 años (Shackley et al., 2011; Singh & Singh, 2020), es decir el biocarbón actúa como un sumidero de carbono en el suelo por largos periodos de tiempo, al poseer altos niveles de resistencia a la degradación química y biológica, lo que finalmente aumenta las reservas de carbono terrestre (Qambrani et al., 2017).
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Construcción de una planta mediana con capacidad de 16000 od ton/año (Bridgwater, 2009, obtenido de Shackley et al., 2011) alimentada a partir de residuos de corteza y madera producidos en la comuna de Collipulli en la región de La Araucanía. Se supone que la planta se instalará a lado del lugar de

	<p>producción de los residuos, de esta forma no existirían gastos relacionados al transporte del material para ser procesado. Se asume que la planta comienza a funcionar en el año 2023.</p> <p>Por otro lado, se supone una aplicación de 30 ton/ha de biocarbón frente a aplicar 20 ton de compost por hectárea al año (Qambrani et al., 2017; Shackley et al., 2011; Servicio Agrícola y Ganadero [SAG], 2017)</p>
Elementos de Costos	<p>Se consideró el costo de inversión de la planta, el costo de operación, el costo de almacenamiento, de logística y de aplicación de biocarbón en el campo (Shackley et al., 2011). Además, se supuso un ahorro de utilización de energía al utilizar el syngas y biooil de la pirolisis como combustibles para la misma planta (Rebolledo, et al., 2016; Qambrani et al., 2017). Así también se utilizó el precio de mercado del compost (Vuelta Verde, n.d.; Lizama, 2018; Gordillo &amp; Chávez, 2010) como enmienda sustituta y punto de comparación para realizar un diferencial de precio de venta entre biocarbón y compost (Oldfield et al., 2018).</p>
Referencias	<p>Gordillo, F., &amp; Chávez, E. (2010). Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros.</p> <p>Lizama, M. (2018). Mercado de Materia Orgánica en Chile [Memoria título pregrado, Federico Santa María - Departamento de Ingeniería Comercial].</p> <p>Oldfield, T. L., Sikirica, N., Mondini, C., López, G., Kuikman, P. J., &amp; Holden, N. M. (2018). Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. <i>Journal of Environmental Management</i>, 218, 465–476. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.061">https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.061</a></p> <p>Qambrani, N. A., Rahman, Md. M., Won, S., Shim, S., &amp; Ra, C. (2017). Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>, 79, 255–273. <a href="https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057">https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057</a></p> <p>Servicio Agrícola y Ganadero [SAG]. (2017). Pauta Técnica para la Aplicación de Compost. <a href="http://www.sag.cl/sites/default/files/pauta-tecnica-aplicacion-de-compost-conc.1-2-3_region_atacama.pdf">http://www.sag.cl/sites/default/files/pauta-tecnica-aplicacion-de-compost-conc.1-2-3_region_atacama.pdf</a></p> <p>Shackley, S., Hammond, J., Gaunt, J., &amp; Ibarrola, R. (2011). The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. <i>Carbon Management</i>, 2(3), 335–356. <a href="https://doi.org/10.4155/cmt.11.22">https://doi.org/10.4155/cmt.11.22</a></p> <p>Singh, J. S., &amp; Singh, C. (Eds.). (2020). <i>Biochar Applications in Agriculture and Environment Management</i>. Springer International Publishing. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-40997-5">https://doi.org/10.1007/978-3-030-40997-5</a></p> <p>Vuelta Verde. (s. f.). Retiro y Reciclaje de Desechos Vegetales [Precio productos]. Recuperado 1 de junio de 2021, de <a href="https://www.vuertaverde.cl/precios">https://www.vuertaverde.cl/precios</a></p> <p>Escalante Rebolledo, A., G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco y J. D. Etchevers Barra. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. <i>Terra Latinoamericana</i> 34: 367-382</p>

### 7.1.2.9 Impuesto a la Carne

Nombre	Impuesto a la Carne
Descripción General	Aplicación de un impuesto del 10% al consumidor sobre la base del precio al productor, afectando la producción nacional
<b>Modelación</b>	
Principales Supuestos	Se consideró un consumo promedio de 149 gr/carne por día, de los cuales 44grm/día son carne vacuna (Universidad de Chile, 2011). El consumo de carne de vacuno se proyectó con base en la Población (INE 2019) y la elasticidad de la demanda (Baéz, N, 2020), y la proyección del precio al productor utilizada para proyectar las cabezas de ganado (Estadísticas de la OCDE). El consumo sin impuestos y con impuestos se estimó a partir del año 2021.

	El impacto en las importaciones de carne se consideró en el análisis, restringiendo proporcionalmente la importación y producción nacional, considerando que un 50% del consumo es importado. La disminución de la demanda como consecuencia del impuesto, en el caso de esta medida, considera solo un impacto en la producción nacional de carne, ni un aumento en otros tipos de ganado considerados como sustitutos de este.
Elementos de Costos	No se consideraron los costos dada su alta complejidad en la distribución.
Referencias	Baéz,Q, Nadia. (2020). EVALUACIÓN DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS PARA LA MITIGACIÓN DE EMISIONES DE GEI PROVENIENTES DE LA GANADERÍA BOVINA EN CHILE. Tesis MSc En Economía Agraria y Ambiental.  Universidad de Chile. (2011). Informe Final: ENCUESTA NACIONAL DE CONSUMO ALIMENTARIO. Centro de Microdatos - Facultad de Economía y Negocios, 1–102

### **7.1.3 Anexo III: Definición de Objetivo y fundamentos elección criterios y subcriterios de Análisis de Decisión Multicriterio**

Para la definición del objetivo de decisión del Análisis de Decisión Multicriterio, mediante el Proceso Analítico Jerárquico, se realizó un análisis de distintos documentos, compromisos y procedimientos que consideran la mitigación del sector Agricultura para Chile. Como documento principal, se analizó la Contribución Nacional Determinada 2020 de Chile, y las implicancias o rol que pueda tener el sector Agricultura en cada uno de los compromisos y elementos mencionados.

#### **1. NDC 2020: Aplicación del Pilar Social de Transición Justa y Desarrollo**

**Sostenible:** En este sentido, la NDC reconoce la necesidad de maximizar sinergias entre los compromisos climáticos y los ODS.

- a. **Sinergia con ODS:** Estipulados en cada componente y contribución específica.
- b. **Seguridad Hídrica:** Los instrumentos deberán favorecer el acceso al agua en cuanto calidad y cantidad
- c. **Costo-Eficiencia:** Que el diseño e implementación representen los menores costes sociales, ambientales y económicos.
- d. **Soluciones Basadas en Naturaleza:** Favorecerán aquellas medidas que apliquen a Soluciones Basadas en Naturaleza.
- e. **Participación Activa:** Consideran el involucramiento de participación ciudadana.

#### **2. Contribución en mitigación (M1):** Se compromete a un presupuesto de emisiones de GEI, no superen los 1100MtCO<sub>2</sub>eq entre el 2020 y 2030, con un peak de emisiones de GEI al 2025, alcanzando un nivel de emisiones de GEI de 95 MtCO<sub>2</sub>eq al 2030.

- a. Responde además a los siguientes ODS:
  - i. 7 energía asequible y no contaminante
  - ii. 8 trabajo decente y crecimiento económico

iii. 9 industria, Innovación e Infraestructura

- 3. Componente de integración:** Elementos de integración de Adaptación en medidas de mitigación para el sector Agricultura, se tangibiliza en la contribución en Integración – Transversal a Ecosistemas N°9, que se concentra en conciliar de manera sustentable la recuperación de la productividad de suelos agrícolas, recuperar servicios ecosistémicos y el bienestar de las comunidades y personas.

En conclusión, las medidas de mitigación para el sector Agricultura, deberán ser priorizadas y seleccionadas bajo criterios de transición justa, que debe obedecer a ODS específicos, que han sido considerados en el AHP. Además, se consideró el aporte a la innovación como parte del compromiso de mitigación y co-beneficios ambientales como parte de la componente de integración de la NDC para la priorización de medidas de mitigación al Cambio Climático para el sector Agricultura.

**Análisis “Informe Nacional Voluntario Chile 2019” sobre la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.**

Se analizaron los ODS comprometidos en la NDC, mediante los objetivos e indicadores que el país establece como mecanismo de reporte y avance en dicha materia, en el cual el Sector Agricultura tenga implicancias.

**Objetivo N° 8** Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.

- **Meta 8.2:** Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas, centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.
  - Indicador 8.2.1: Tasa de crecimiento anual del PIB real por persona empleada

- **Meta 8.3:** Promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, y fomentar la formalización y el crecimiento de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas, incluso mediante el acceso a servicios financieros.
  - Indicador 8.3.1: Proporción de empleo informal en el sector no agrícola, desglosada por sexo.

Dentro de los planes de acción para lograr mejores indicadores, se establece como una de las acciones, Agenda de Economía del Futuro e Innovación, como estrategia para aportar a los objetivos 8.2 y 8.3, en el cual incluye **al sector Agricultura** para desarrollo.

Se identificaron sinergias de ODS a los que responde el sector Agricultura con las medidas de mitigación para la priorización de medidas de mitigación.

### **Revisión bibliográfica de estudios de MCDA para mitigación**

Diversos Estudios se analizaron en cuanto a los criterios de evaluación y priorización de medidas de mitigación al Cambio Climático, del cual se seleccionaron aquellas que hicieran sentido al contexto Chileno.

A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instrument ((Konidari & Mavrakis, 2007))

Objetivo	Criteria	Definición	Subcriterios	Definición		
To be effective in mitigating climate change through GHG emissions reductions	<b>Environmental performance</b>	The overall environmental contribution of the instrument towards the goal.	<b>Direct contribution to reduction of GHG emissions</b>	Determines the synthesis and the magnitude of GHG emissions reductions directly referred and attributed to the assessed instrument		
			<b>Indirect environmental effects</b>	Of the instrument are ancillary outcomes attributed to it		
	<b>Political acceptability</b>	The attitude of all involved target groups towards the instrument	<b>Cost effectiveness</b>	Property of the instrument to achieve the goal under the perspective of a financial burden acceptable and affordable by the involved entities		
			<b>Dynamic cost efficiency</b>	Property of the instrument to create, offer or allow compliance options that support research projects, incremental and radical pioneer technologies and techniques, and institutional or organizational innovations leading to GHG emission reductions. It is measured by the amount of investments in innovation, increase in technological investments, investment in h/avoided tCO <sub>2</sub> eq, etc.		
			<b>Competitiveness</b>	Is defined as the capacity of the sector to compete via price, products or services attributes with other entities and maintain or even increase the magnitude of specific indicators describing its financial performance (Sinner, 2002). A competitive entity perceives changes in its environment (external and internal) and adapts these changes so that the generated profit flow guarantees the long term of its operation. Indicators for measuring competitiveness are Gross Domestic Product, Gross National Product, employment rates, imports, value of net exports, export volumes and prices, productivity, investments, revenues, etc.		
			<b>Sectorial equity</b>	Is defined as the fairness of the instrument in distributing emission rights, compliance costs and benefits among entities (countries/sectors) for accomplishing GHG emission reductions.		
			<b>Social equity</b>	Is the perceived equity between different groups of society. The unintentional distribution of costs on non-participating target groups, during the implementation of the instrument, results in disproportional burden for them. Social equity concerns minimizing distributional effects on poorer members of society (usually low-income households)		
			<b>Flexibility</b>	Is defined as the property of the instrument to offer a range of compliance options and measures, that entities are allowed to use in achieving reductions under a time frame adjusted according to their priorities. Target groups require a range of options for low abatement costs and an adaptable time period in delivering their reductions.		
			<b>Stringency for non-compliance and non-participation</b>	Is defined as the rigidity of the instrument's provisions towards emitters that failed to comply or did not participate. Full participation by entities is linked with effective instruments. Therefore, deterring non-participation contributes to the accomplishment of the goal. Penalties, sanctions, liability principles,9 baselines, verification and monitoring, validation of emission reductions procedures are means for deterring nonparticipation and non-compliance (Haites and Missfeldt, 2001). It is assessed by the number of rules and influencing mechanisms that ensure the compliance of target groups.		
			<b>Feasibility of implementation (or enforcement)</b>	Is defined as the aggregate applicability of the instrument linked with national infrastructural (institutions and human resources) and legal framework. It is based on the following three sub-criteria.	<b>Implementation network capacity</b>	the ability of all national competent parties11 to design, support and ensure the implementation of the instrument. The lack of adequate implementation network is a barrier for accomplishing mitigation goals or setting new ones (
					<b>Administrative feasibility</b>	Is defined as the aggregate work exerted by the regulatory implementation network during the enforcement of the instrument.
					<b>Financial feasibility</b>	Is defined as the property of the instrument to be implemented with low overall costs by the pertinent regulatory authorities. These costs concern preparation, negotiation, administration, monitoring, operating, reporting, implementation and influencing mechanism

Avoiding academic and decorative planning in GHG emissions abatement studies with MCDA: The Peruvian case (Borges & Villavicencio, 2004)

Criteria utilizados en el MCDA:

- **Aceptabilidad:** A menudo habrá resistencia social al cambio. El país se encuentra en una situación socioeconómica compleja donde el rezago tecnológico permite que algunas medidas de eficiencia potenciales tengan impactos potencialmente grandes.
- **Sostenibilidad (viabilidad):** Este criterio debe entenderse principalmente como la capacidad técnica para adoptar, operar, mejorar gradualmente y replicar la tecnología. En algunos sectores, el Perú tiene, como otros países en desarrollo, una escasez de recursos humanos calificados, una falta de capacidad técnica y una falta de un sistema de innovación.
- **Efectos secundarios:** Este criterio cubre diferentes tipos de efectos secundarios: costos potenciales negativos, doble dividendo económico, otros impactos ambientales, etc.
- **Relevancia:** ¿Cómo se evalúa el potencial real para la mitigación de gases de efecto invernadero? ¿Cuán relevantes son las opciones para la mitigación del cambio climático? Este es el criterio que se centra en el objetivo del estudio.

Priorización de medidas de mitigación de emisiones de GEI usando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Oddos, 2011)

<b>Criterios</b>	<b>Subcriterios</b>	<b>Definición</b>
<b>Técnico-Económicos</b>	<b>Inversión</b>	Representa la Inversión media
	<b>Costo-Efectividad</b>	Se mide en USD/Ton CO2eq. Indica la rentabilidad de los costos con respecto a las emisiones de CO2 evitadas
	<b>Factibilidad Técnica</b>	Se relaciona con la disponibilidad de la tecnología, de los expertos, y también del conocimiento práctico de la tecnología (se mide con la participación en la matriz de energía eléctrica).
<b>Ambiental</b>	<b>Reducción de emisiones Globales</b>	Se refiere a las reducciones esperadas de CO2.
	<b>Reducción de emisiones Locales</b>	Trata de las reducciones esperadas de los NOx, PM y SO2.
	<b>Uso de Suelo</b>	Ese parámetro se mide en km2/MW. Representa la superficie de suelo promedio necesaria a la implantación de la medida.
<b>Políticos y Sociales</b>	<b>Sustentabilidad Social</b>	Se estima con la generación de empleo y el número de empresas involucradas.
	<b>Seguridad Energética</b>	Se estima con la generación de empleo y el número de empresas involucradas. · Aceptabilidad social: La aceptabilidad
	<b>Aceptabilidad Social</b>	La aceptabilidad social involucra la aceptación tanto de las comunidades locales como de los individuos afectados. Debe tomar en cuenta la repartición beneficiarios/afectados.

## 7.1.4 Anexo V: Visualización Herramienta Análisis de Decisión Multicriterio



FACULTAD DE AGRONOMÍA E INGENIERÍA FORESTAL  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

### "Priorización de medidas de mitigación del Sector Agricultura a través de un Análisis de Decisión Multicriterio"

La siguiente encuesta se realiza en el marco de la Tesis de Investigación para el Magister en Recursos Naturales con mención en Cambio Global de la Facultad de Agronomía e Ing. Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile, bajo el Título de "Priorización de medidas de mitigación del Sector Agricultura a través de un Análisis de Decisión Multicriterio"

Se ha elaborado la siguiente encuesta con el objetivo de evaluar la importancia relativa de cada uno de los criterios y subcriterios seleccionados para evaluar alternativas de mitigación en el Sector Agricultura.

La presente encuesta consta de 2 ejercicios:

1) Evaluación mediante "comparación entre pares" para evaluar la importancia relativa de cada subcriterio y criterio.

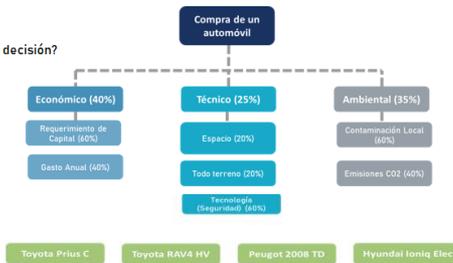
2) Evaluación de las Alternativas de mitigación para el sector Agricultura

#### ¿Qué es un Análisis de Decisión Multicriterio?

Es una metodología que optimiza la toma de decisiones, cuando existen múltiples criterios o atributos para alcanzar un objetivo, mediante la descomposición de una estructura jerárquica, es decir, que permite subdividir un atributo complejo en uno más simple, y determinar como influyen cada uno de estos atributos en la toma de decisiones. Esta metodología permite evaluar criterios cuantitativos y cualitativos en el análisis.

#### Ejemplo Matriz de decisión

¿Cómo influyen cada uno de estos atributos al objeto de decisión?



¿Cómo influyen cada uno de estos atributos al objeto de decisión?



Figura 22 Hoja N°1 de Instrucciones Herramienta

**¿Cómo se llega a esta matriz de decisión?**

Mediante una "comparación entre pares" para cada uno de los criterios y subcriterios, manifestando la preferencia entre dos criterios según una escala de importancia

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

**Económico**

**Priorización de Criterios Económicos**

Esta sección busca priorizar los subcriterios Económicos, los cuales se definen como:

<b>Costo-Efectividad</b>	Se refiere al costo unitario de reducción de una USD/tCO <sub>2</sub> eq bajo el periodo analizado.
<b>Aceptabilidad social</b>	Se refiere a nivel de aprobación e las comunidades locales como de los individuos afectados producto de la implementación de la medida.
<b>Empleo</b>	Se refiere a la generación de empleo producto de la implementación de la medida.

Subcriterios	Nivel de importancia de los criterios en el marco de Evaluación de medidas de mitigación para el Sector Agricultura para alcanzar la carbono neutralidad bajo transición justa								Subcriterio	
	8	6	4	2	1	2	4	6		8
Costo-Efectividad	X									Aceptabilidad Social
Costo-Efectividad										Empleo
Aceptabilidad Social										Empleo

**Figura 23 Hoja N°1 de Instrucciones Herramienta**

### Intrucciones Escala de Prioridades (Proceso Analítico Jerárquico)

De acuerdo a su criterio y expertise profesional, usted deberá comparar criterios para la selección de medidas de mitigación del sector agricultura, más eficientes y factibles de implementar al contexto nacional, expresando la importancia relativa de uno frente a otro mediante la escala de jerarquía de Saaty.

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

Para la Priorización, se utiliza el Proceso Analítico Jerarquico, considerando los siguientes Criterios y subcriterios, el cual se establecerán su importancia relativa para la toma de decisión mediante su juicio para el logro del objetivo, es decir, que relevancia tiene cada uno de estos criterios y subcriterios, que definen la priorización de medidas de mitigación.



Figura 24 Hoja N°2 de Escala de Prioridades mediante “comparación entre pares”

**Económico**

**Priorización de Criterios Económicos**

Esta sección busca priorizar los subcriterios Económicos, los cuales se definen como:

<b>Costo-Efectividad</b>	Se refiere al costo unitario de reducción de una USD/tCO2eq bajo el periodo analizado.
<b>Aceptabilidad social</b>	Se refiere a nivel de aprobación e las comunidades locales como de los individuos afectados producto de la implementación de la medida.
<b>Empleo</b>	Se refiere a la generación de empleo producto de la implementación de la medida.

Subcriterios	Nivel de importancia de los criterios en el marco de Evaluación de medidas de mitigación para el Sector Agricultura para alcanzar la carbono neutralidad bajo transición justa								Subcriterio	
	8	6	4	2	1	2	4	6		8
Costo-Efectividad			X							Aceptabilidad Social
Costo-Efectividad			X							Empleo
Aceptabilidad Social					X					Empleo

Test de Consistencia **Consistente**

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

**Técnico**

**Priorización de Criterios Técnicos**

Esta sección busca priorizar los subcriterios Técnicos, los cuales se definen como:

**Innovación** Se define como el aporte en innovación al sector (entendemos por innovación por cambio que introduce novedades, modificando elementos ya existentes con el fin de mejorarlos o implementando elementos totalmente nuevos).

**Capacidades técnicas:** Se refiere a la existencia de capacidades técnicas relacionadas con la disponibilidad de la tecnología, de los expertos, y también del conocimiento práctico.

**Dificultad de implementación** Se refiere a la capacidad de implementación en el contexto del público objetivo al cual se quiere llegar, considerando la atomización del rubro al cual afecta.

Subcriterios	Nivel de importancia de los criterios en el marco de Evaluación de medidas de mitigación para el Sector Agricultura para alcanzar la carbono neutralidad bajo transición justa								Subcriterio	
	8	6	4	2	1	2	4	6		8
Innovación					X					Capacidades Técnicas
Innovación					X					Dificultad de implementación
Capacidades técnicas					X					Dificultad de implementación

Test de Consistencia **Consistente**

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

**Figura 25 Hoja N°2 de Escala de Prioridades mediante “comparación entre pares”, Subcriterios Socio-económico y Técnico**

Ambiental

**Priorización de Criterios Ambientales**

Esta sección busca priorizar los subcriterios Ambientales, los cuales se definen como:

**Potencial de Reducción:** Se define como el potencial de reducción en tCO2eq total considerados en el periodo analizado (2019-2050)

Se refiere al aporte transversal de beneficios ambientales, como por ejemplo, disminución de contaminantes locales, aporte en servicios ecosistémicos, sinergias con adaptación o que favorece como una opción de Soluciones Basadas en

**Co-beneficios ambientales:** Naturaleza (SBN).

Subcriterios	Nivel de importancia de los criterios en el marco de Evaluación de medidas de mitigación para el Sector Agricultura para alcanzar la carbono neutralidad bajo transición justa										Subcriterio
	8	6	4	2	1	2	4	6	8		
Potencial de Reducción		X									Co-beneficios ambientales

Test de Consistencia **Consistente**

Socio-Económico

Técnico

Ambiental

**Priorización de Criterios**

**Socio-Económico:** Compuesto por los criterios Costo-efectividad, Empleo y Aceptabilidad Social

**Técnico:** Compuesto por los criterios Innovación, Capacidades Técnicas y Dificultad de implementación

**Ambiental:** Compuesto por los criterios Co-beneficios Ambientales y Potencial de Captura

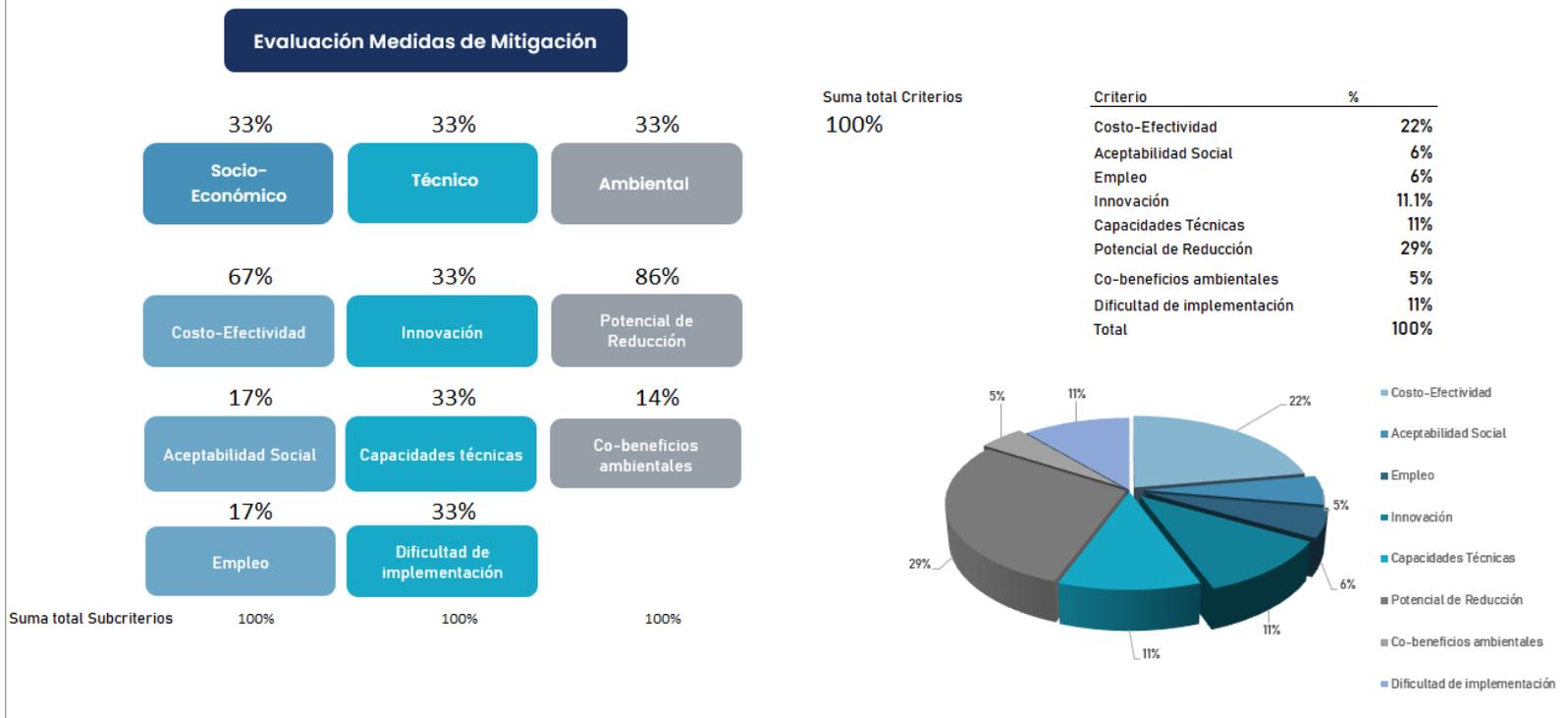
Subcriterios	Nivel de importancia de los criterios en el marco de Evaluación de medidas de mitigación para el Sector Agricultura para alcanzar la carbono neutralidad bajo transición justa										Subcriterio
	8	6	4	2	1	2	4	6	8		
Socio-Económico					X						Técnico
Socio-Económico					X						Ambiental
Técnico					X						Ambiental

Test de Consistencia **Consistente**

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
2	Levemente más importante
4	Más importante
6	Fuertemente más importante
8	Extremadamente más importante

**Figura 26 Hoja N°2 de Escala de Prioridades mediante “comparación entre pares”, Subcriterios Ambientales, y criterios “Socio-económicos”, “Técnicos” y “Ambientales”**



**Figura 27 Hoja N°3 Resultados Ponderación de Matriz de Jerarquías para la Toma de decisiones**

### Evaluación de Medidas de Mitigación

En esta sección se busca evaluar cada Medida de mitigación analizada según alguno de los criterios previamente priorizados. Por favor marque con una "X" el nivel que usted considera que tiene cada uno de los criterios que vienen a continuación.

#### Evaluación de Criterios Económicos

##### Aceptabilidad Social

En el marco de la evaluación de "Medidas de mitigación al cambio climático para el sector agricultura", califique en el nivel de aceptación por parte de las comunidades locales como de los individuos afectados producto de la implementación de la medida.

Medidas de Mitigación	Bajísima	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Altísima
1 Cambio Dieta Bovina							
2 Uso eficiente del Fertilizante							
3 Biodigestores de Purines Porcinos							
4 Aplicación de Enmiendas Orgánicas							
5 Impuesto a la Carne							
6 Manejo Holístico de Ganado							
7 Biodigestores de Purines Bovinos							
8 Reducción de Quemadas Agrícolas							
9 Planta de Producción Biocarbón							

#### Evaluación de Criterios Técnicos

##### Innovación

En el marco de la evaluación de "Medidas de mitigación al cambio climático para el sector agricultura", califique en el potencial aporte y fomento en innovación al sector agricultura producto de la implementación de la medida. (innovación: (entendemos por innovación por cambio que introduce novedades, modificando elementos ya existentes con el fin de mejorarlos o implementando elementos totalmente nuevos).

Medidas de Mitigación	Bajísimo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Altísimo
1 Cambio Dieta Bovina							
2 Uso eficiente del Fertilizante							
3 Biodigestores de Purines Porcinos							
4 Aplicación de Enmiendas Orgánicas							
5 Impuesto a la Carne							
6 Manejo Holístico de Ganado							
7 Biodigestores de Purines Bovinos							
8 Reducción de Quemadas Agrícolas							
9 Planta de Producción Biocarbón							

Figura 28 Hoja N°4 Evaluación de Medidas de Mitigación, para aceptabilidad social e Innovación.

Evaluación de Criterios Técnicos

**Capacidades técnicas:**

Califique la existencia nacional de capacidades técnicas relacionadas con la disponibilidad tecnológicas, expertos y conocimiento práctico para la implementación cada medidas de mitigación.

Medidas de Mitigación	Bajísimo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Altísimo
1 Cambio Dieta Bovina							
2 Uso eficiente del Fertilizante							
3 Biodigestores de Purines Porcinos							
4 Aplicación de Enmiendas Orgánicas							
5 Impuesto a la Carne							
6 Manejo Holístico de Ganado							
7 Biodigestores de Purines Bovinos							
8 Reducción de Quemadas Agrícolas							
9 Planta de Producción Biocarbón							

Evaluación de Criterios Técnicos

**Dificultad de implementación**

Califique la dificultad de implementación ,referido a la dificultad a la capacidad de implementación en el contexto del público objetivo al cual se quiere llegar, considerando la atomización del subsector productivo al cual afecta.

Medidas de Mitigación	Bajísimo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Altísimo
1 Cambio Dieta Bovina							
2 Uso eficiente del Fertilizante							
3 Biodigestores de Purines Porcinos							
4 Aplicación de Enmiendas Orgánicas							
5 Impuesto a la Carne							
6 Manejo Holístico de Ganado							
7 Biodigestores de Purines Bovinos							
8 Reducción de Quemadas Agrícolas							
9 Planta de Producción Biocarbón							

**Figura 29 Hoja N°4 Evaluación de Medidas de Mitigación, para “Capacidades Técnicas y Dificultad de implementación”.**

Evaluación de Criterios Ambientales

**Co-beneficios ambientales:**

Califique la existencia co-beneficios ambientales, referido al aporte transversal de beneficios ambientales, como por ejemplo, disminución de contaminantes locales, aporte en servicios ecosistémicos, sinergias con adaptación o que favorece como una opción de Soluciones Basadas en Naturaleza (SBN).

	Medidas de Mitigación	Bajísimo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Altísimo
1	Cambio Dieta Bovina							
2	Uso eficiente del Fertilizante							
3	Biodigestores de Purines Porcinos							
4	Aplicación de Enmiendas Orgánicas							
5	Impuesto a la Carne							
6	Manejo Holístico de Ganado							
7	Biodigestores de Purines Bovinos							
8	Reducción de Quemadas Agrícolas							
9	Planta de Producción Biocarbón							

Figura 30 Hoja N°4 Evaluación de Medidas de Mitigación, para “Co-beneficios ambientales”

		22%	6%	6%	11%	11%	11%	29%	5%	
	Medida de Mititación	Costo-Efectividad	Aceptabilidad Social	Empleo	Innovación	Capacidades Técnicas	Dificultad de implementación	Potencial de Reducción	Co-beneficios ambientales	Puntaje Medida
5	Impuesto a la Carne	0.0	16.7	0.0	33.3	-16.7	-16.7	64.9	-16.7	18.7
9	Biocarbón	54.9	33.3	66.7	66.7	0.0	0.0	0.0	33.3	26.7
7	Biodigestores Bovinos	23.7	33.3	83.3	33.3	50.0	50.0	7.6	66.7	31.9
1	Cambio Dieta Bovina	0.0	50.0	16.7	50.0	50.0	50.0	40.3	50.0	34.3
6	Manejo Holístico de Ganado	37.0	33.3	50.0	33.3	33.3	50.0	51.6	66.7	43.7
4	Aplicación de Enmiendas Org.	29.2	33.3	66.7	33.3	50.0	83.3	36.4	66.7	44.1
8	Reducción de Quemadas Agrícolas	100.0	66.7	16.7	33.3	66.7	66.7	15.0	66.7	52.8
2	Uso eficiente del Fertilizante	68.6	16.7	16.7	50.0	66.7	66.7	65.0	66.7	59.2
3	Biodigestores Porcinos	50.7	33.3	83.3	33.3	66.7	50.0	100.0	66.7	66.2

Figura 31 Hoja N°5 Calificación medidas ejemplo, según resultados del encuestado

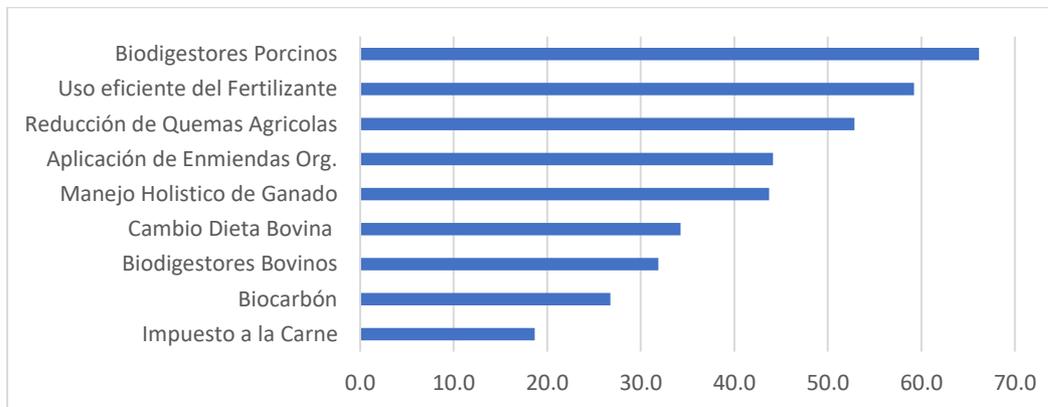
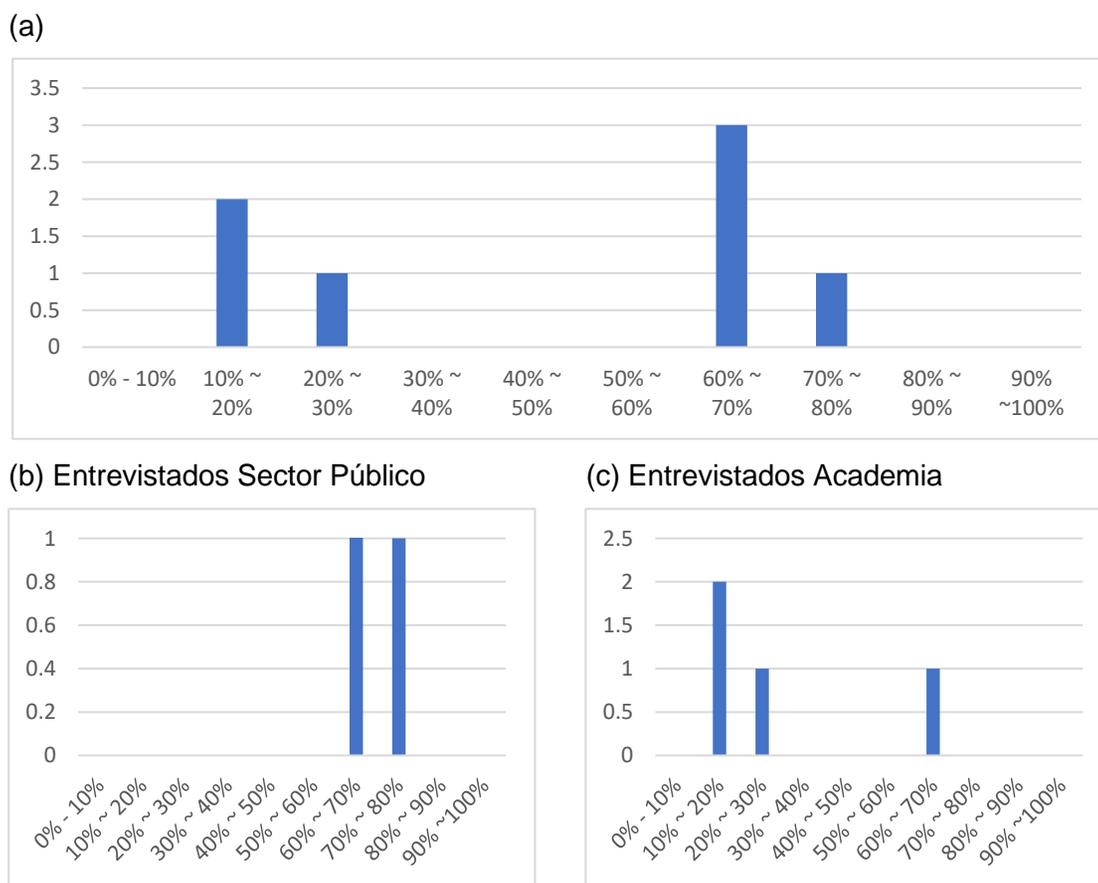


Figura 32 Hoja N°5 Gráfico ejemplo de resultados de Matriz de priorización de medidas, según método AHP, SMART y MAUT

### 7.1.5 Anexo VI: Distribución de respuestas para la Matriz de Jerarquías

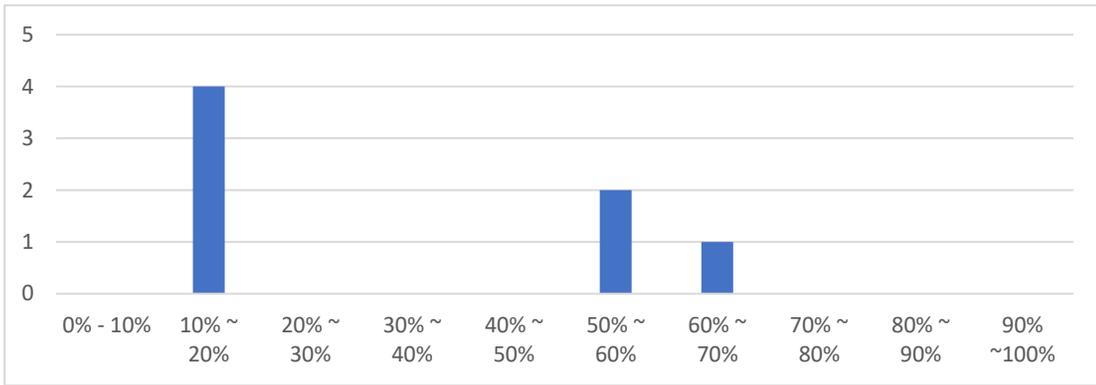
En esta sección se muestran los resultados para cada subcriterio y criterio según grupo de actor, según el número de respuestas, mediante distribución de respuestas.

**Figura 33 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Costo-Efectividad" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

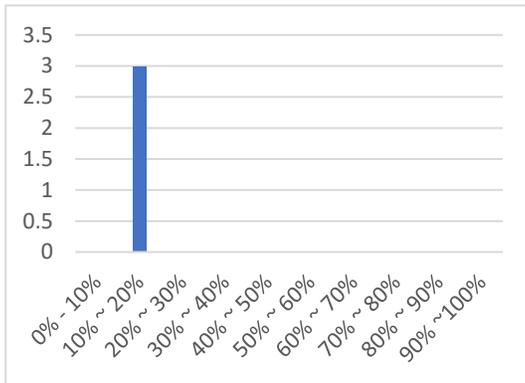


**Figura 34 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Aceptabilidad Social" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

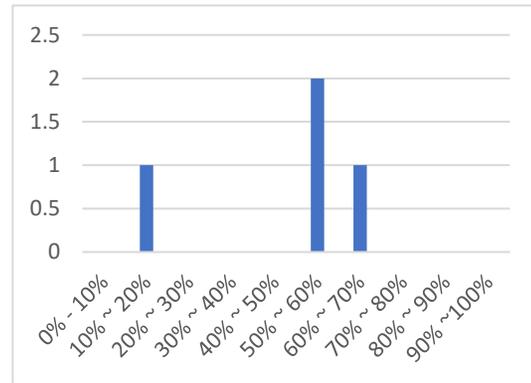
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

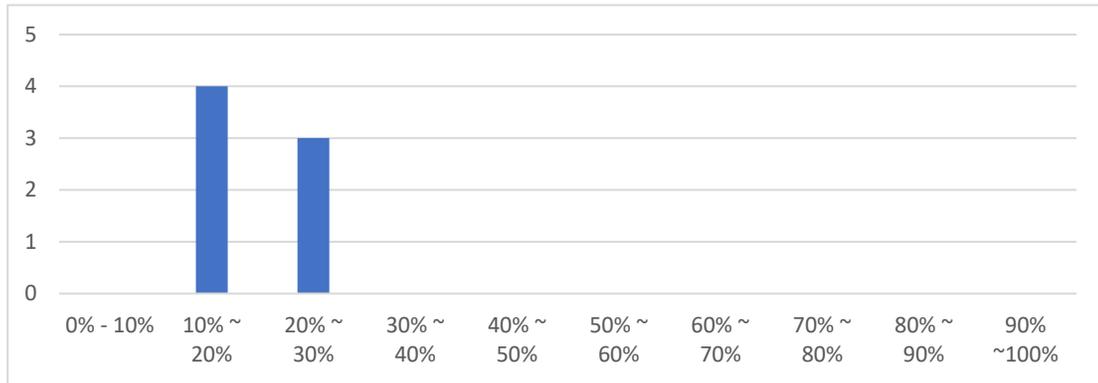


(c) Entrevistados Academia

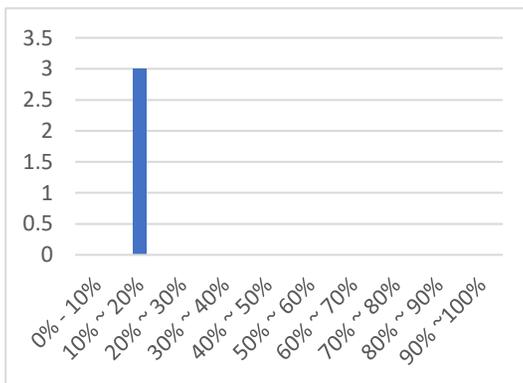


**Figura 35 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Empleo" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

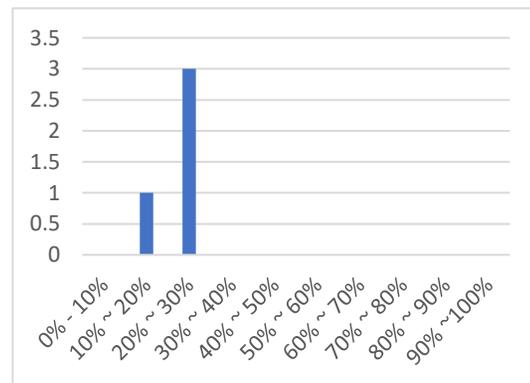
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

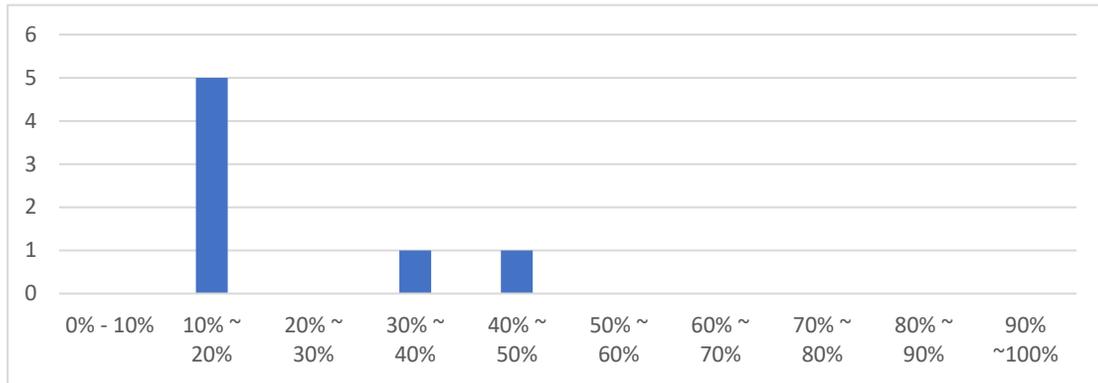


(c) Entrevistados Academia

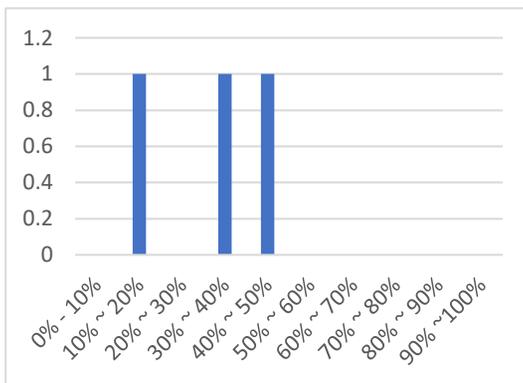


**Figura 36 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Innovación" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

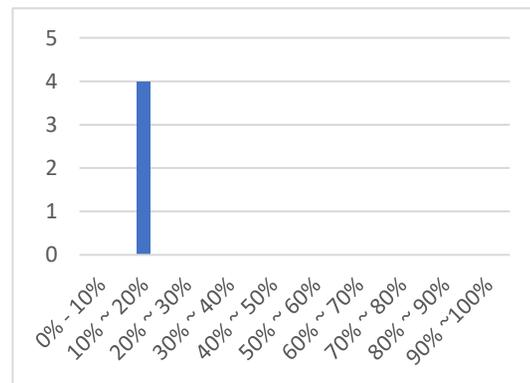
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

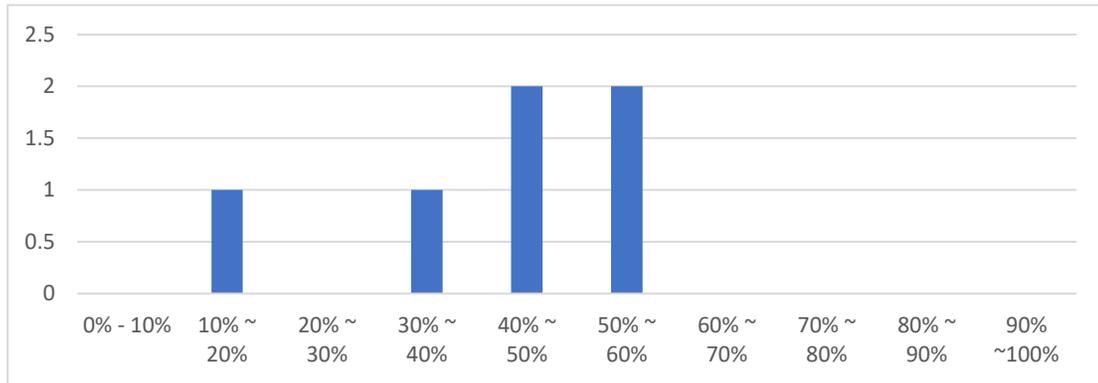


(c) Entrevistados Academia

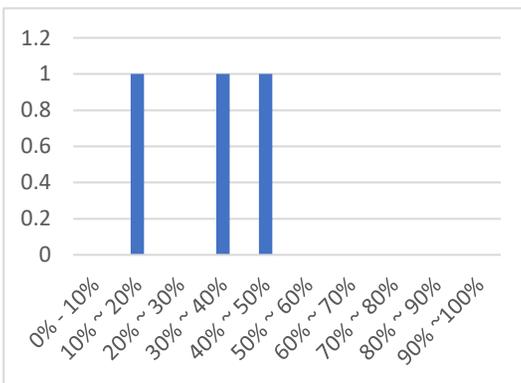


**Figura 37 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Capacidades Técnicas" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

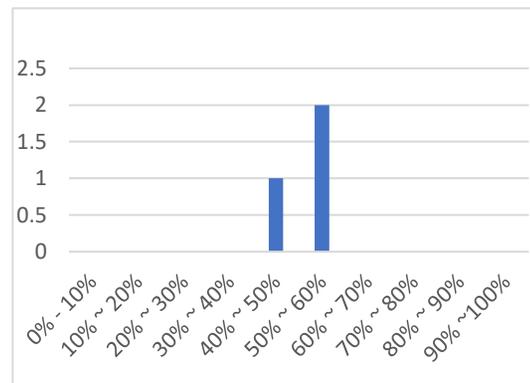
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

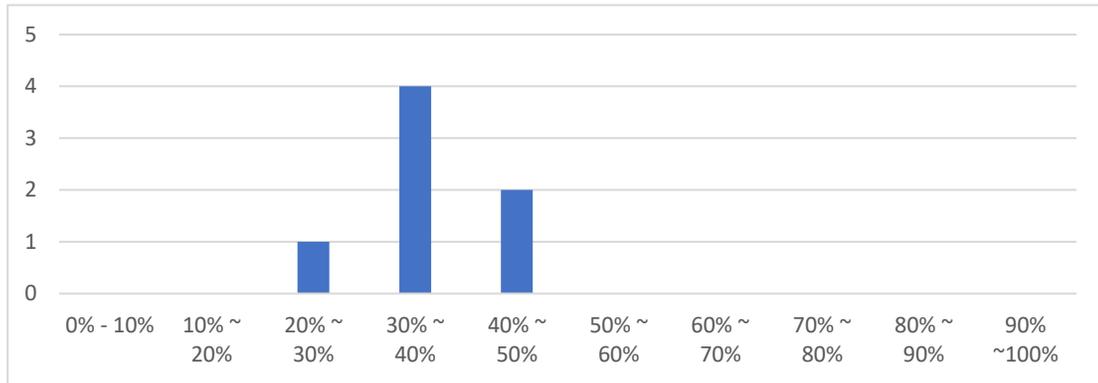


(c) Entrevistados Academia

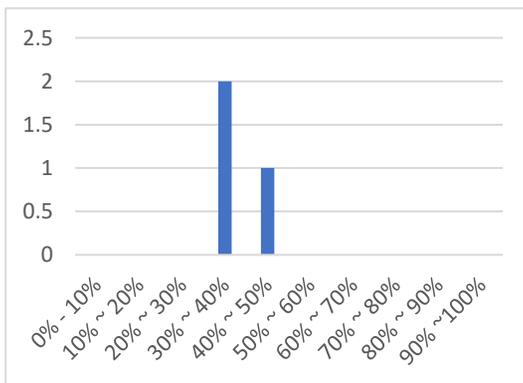


**Figura 38 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Dificultad de implementación" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

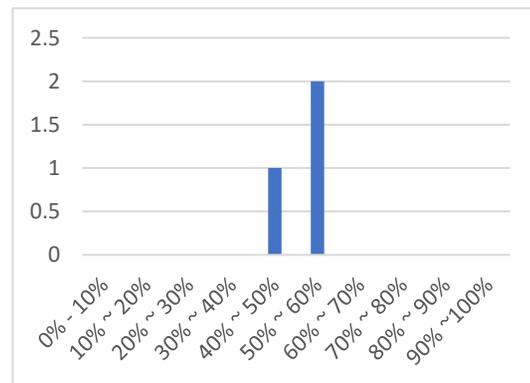
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

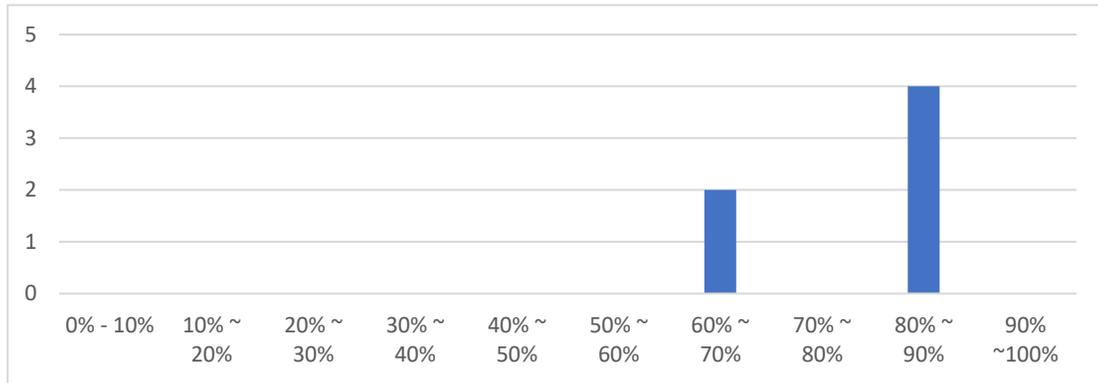


(c) Entrevistados Academia

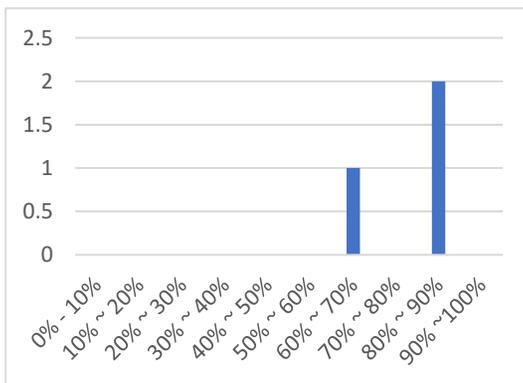


**Figura 39 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Potencial de Reducción" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

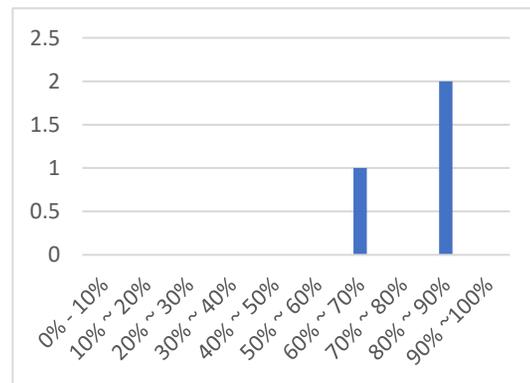
(a)



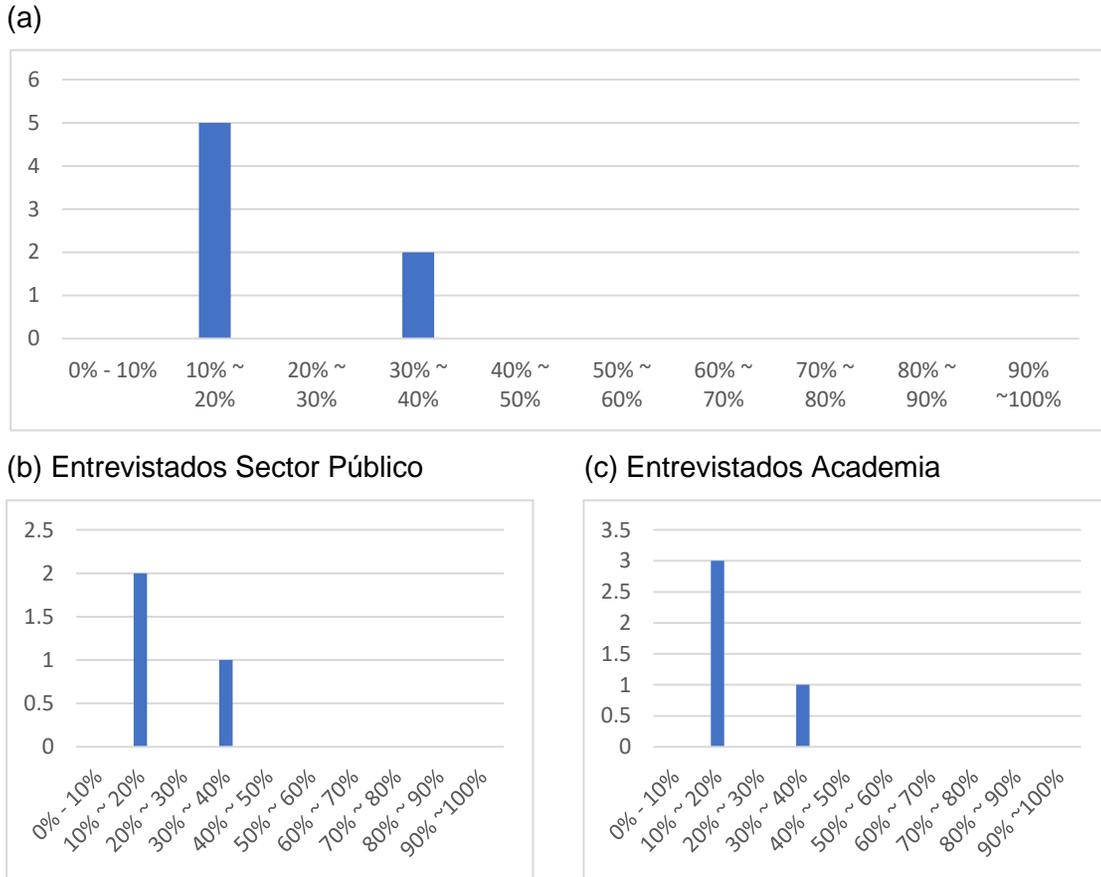
(b) Entrevistados Sector Público



(c) Entrevistados Academia

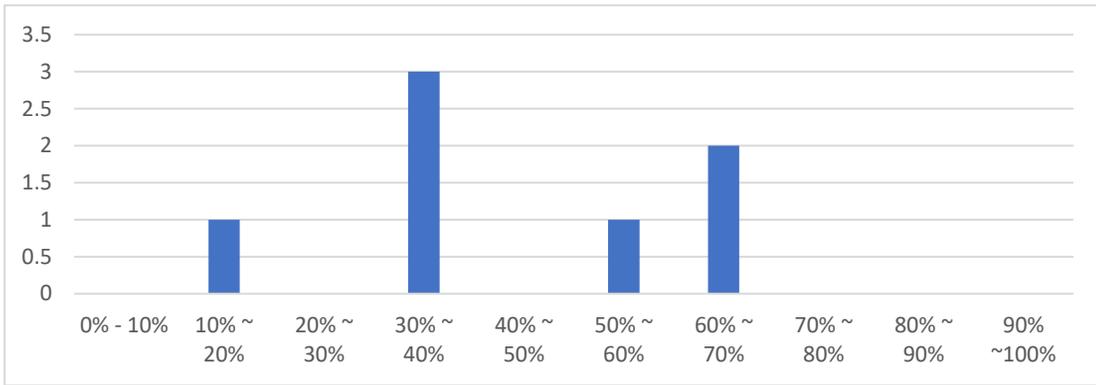


**Figura 40 (a) Distribución de respuestas para subcriterio "Co-beneficios Ambientales" para todos los encuestados, (b) distribución de respuestas Entrevistados Sector Público, y (c) distribución de respuestas Entrevistados Academia**

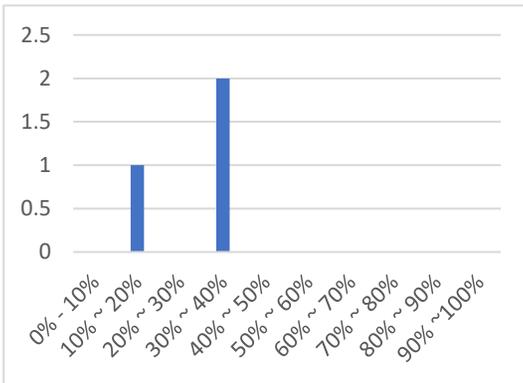


**Figura 41 Distribución de respuestas para Criterio "Socio-Económico" (a) para todos los encuestados, (b) Entrevistados Sector Público, y (c) Entrevistados Academia.**

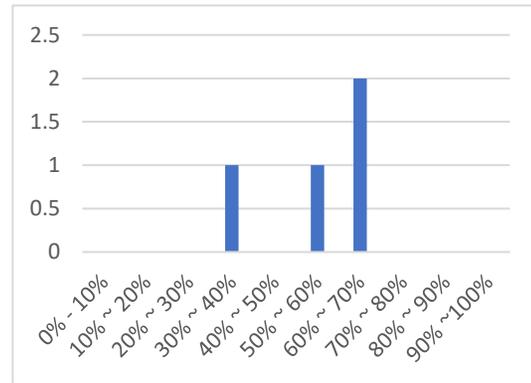
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

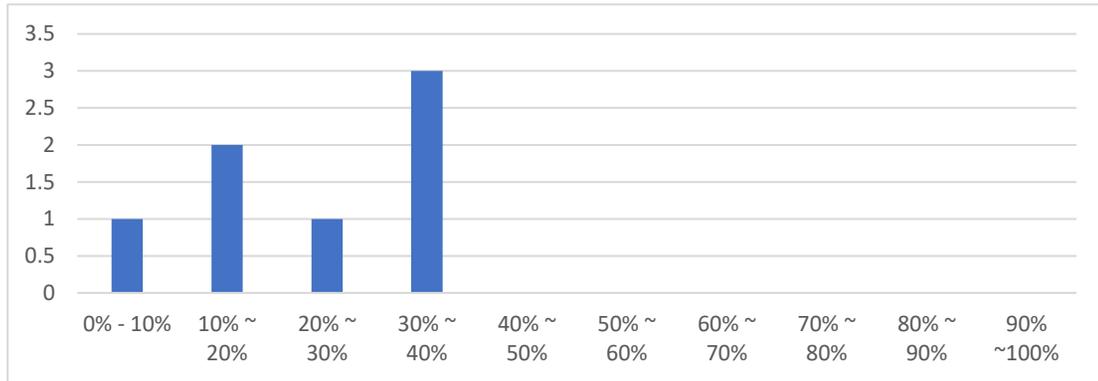


(c) Entrevistados Academia

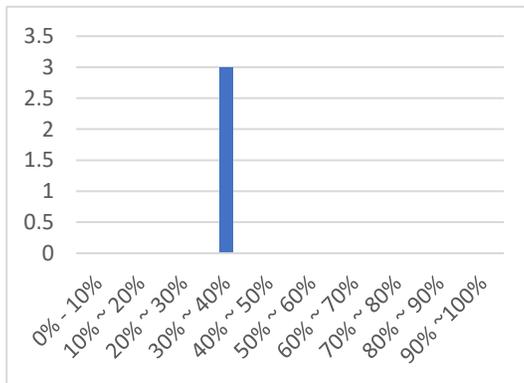


**Figura 42 Distribución de respuestas para Criterio "Técnico" (a) para todos los encuestados, (b) Entrevistados Sector Público, y (c) Entrevistados Academia.**

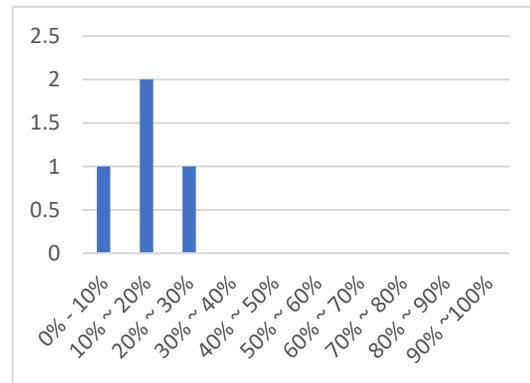
(a)



(b) Entrevistados Sector Público

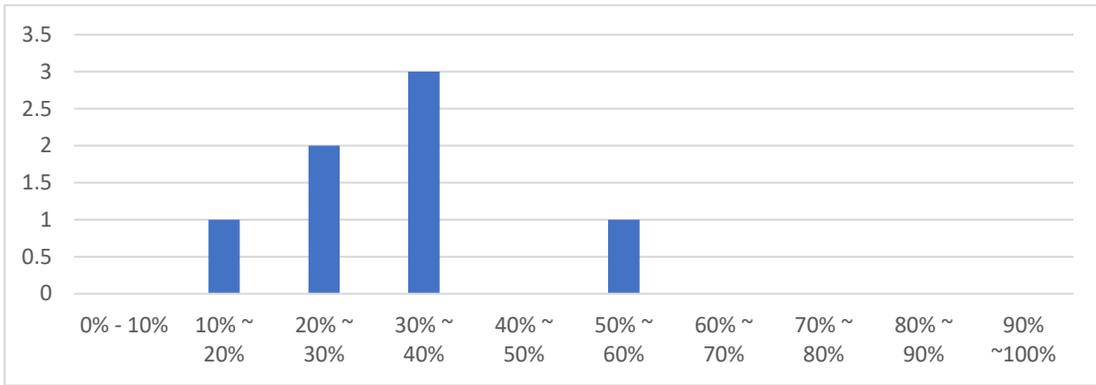


(c) Entrevistados Academia

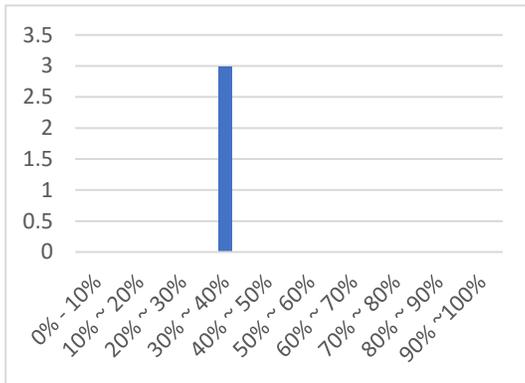


**Figura 43 Distribución de respuestas para Criterio "Ambiental" (a) para todos los encuestados, (b) Entrevistados Sector Público, y (c) Entrevistados Academia.**

(a)



(b) Entrevistados Sector Público



(c) Entrevistados Academia

