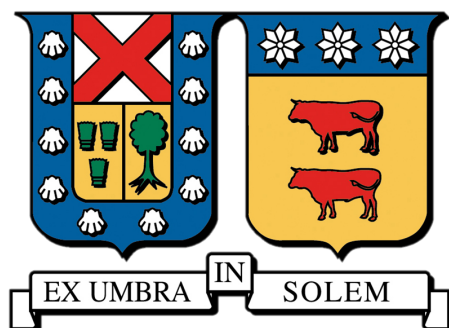




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**OPTIMIZACIÓN EN LA EFICIENCIA ECONÓMICA DE LA VALORIZACIÓN DE
RESIDUOS EN PULPAS Y MADERAS EN CMPC CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

ALEJANDRO JAVIER CAMERO HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA

PROFESOR María Pilar Gárate

PROFESOR CO-REFERENTE

David Videla

SANTIAGO, AGOSTO 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Optimización en la eficiencia económica de la valorización de residuos en pulpas y maderas en CMPC Chile

Nombre del candidato(a): Alejandro Javier Camero Hernández

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Vitacura

Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Pilar Garate Chateau, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/09/2026

Firma:

Pilar Garate Ch.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/09/2026

Firma:

[Firma]

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Tabla de Contenidos

1	Agradecimientos	4
2	Resumen	6
3	Abstract	8
4	Introducción	10
5	Problema de Investigación	14
6	Objetivos	21
6.1	Objetivo General	21
6.2	Objetivos Específicos	21
7	Alcance	23
8	Marco Teórico	25
8.1	Economía circular y valorización de residuos en Chile	25
8.2	Sector forestal, industria de celulosa y generación de subproductos	26
8.3	Subproducto, residuo, enmienda, fertilizante y bioestimulante	30
8.4	Marco regulatorio: Ley N° 21.349 y D.S. N° 61/2023	32
8.5	Disposición de subproductos valorizados de CMPC	35
8.6	Optimización logística, costo total mínimo y asignación de cargas	39
8.7	Diversificación de valorizadores, riesgo operacional y habilitadores de venta	42
8.8	Síntesis del marco teórico y relación con el estudio	43

9	Metodología	45
9.1	Eje técnico-regulatorio	46
9.2	Eje económico	47
9.3	Eje estratégico-comercial	48
9.4	Integración de ejes y salida metodológica del estudio	49
10	Análisis y resultados	51
10.1	Resultados del eje técnico-regulatorio	51
10.1.1	Resultados SAG	52
10.1.2	Resultados SEREMI	56
10.2	Resultados del eje económico	59
10.2.1	Caso base de costos	60
10.2.2	Caso de tres valorizadores externos	61
10.2.3	Caso con dos valorizadores externos	62
10.2.4	Caso de aplicación en predios propios	63
10.2.5	Casos de aplicación en predios adyacentes a las plantas	64
10.2.6	Caso CBB	67
10.2.7	Caso Qualitat	68
10.2.8	Resumen y cierre	69
10.3	Resultados del eje estratégico-comercial	70
10.3.1	Apertura del eje estratégico-comercial bajo escenario de venta habilitada	70
10.3.2	Fase 1: Universo de modelos de negocio con terceros y venta	71
10.3.3	Fase 2: Filtro estratégico mediante entrevistas internas	79

10.3.4 Fase 3: Cálculo preliminar de precios para subproductos calcáreos	81
10.3.5 Cierre del eje estratégico-comercial	87
11 Conclusiones	89
12 Limitaciones	91
13 Anexos	94
13.1 Matriz de distancias	94
13.2 Matriz de costos de valorización	95
13.3 Matriz de restricciones de capacidad	98
13.4 Matriz de generación	99
13.5 Código de optimización de distribución de carga de caso base en R	99
13.6 Distribución de carga actual de valorizadores	104
15 Lista de Tablas	105
16 Lista de Figuras	107

1 Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a la Universidad Técnica Federico Santa María y, especialmente, al Departamento de Industrias, por la formación académica y profesional recibida durante estos años. La Universidad no solo me entregó conocimientos técnicos, sino también las herramientas para enfrentar problemas complejos, adaptarme a contextos desconocidos y comprender que la ingeniería adquiere verdadero valor cuando se pone al servicio de desafíos concretos. Agradezco particularmente a mi profesora guía, María Pilar Gárate, por su orientación, exigencia y apoyo durante el desarrollo de esta memoria.

Asimismo, agradezco a Empresas CMPC por brindarme la oportunidad de desarrollar mi memoria de título dentro de una organización comprometida con la sostenibilidad, la innovación y la economía circular. Esta experiencia me permitió conocer de cerca la realidad operacional de la industria forestal, participar en un proyecto con impacto ambiental y económico, y aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera a una problemática real de empresa.

De manera especial, agradezco a David Videla, Nicolás Chacón y al equipo de la Subgerencia de Residuos, Emisiones y Obligaciones de la Gerencia de Medio Ambiente de CMPC, por su confianza, disposición y acompañamiento. Sus conocimientos, observaciones y apertura para integrar una mirada académica al proyecto fueron fundamentales para comprender las dimensiones técnicas, regulatorias, logísticas y económicas involucradas en la valorización de subproductos. También agradezco a las distintas áreas de CMPC que aportaron antecedentes, participaron en reuniones y contribuyeron con su experiencia al desarrollo de los análisis presentados.

Finalmente, agradezco a mi familia, amistades y a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa. Su apoyo, paciencia y confianza fueron esenciales para superar las dificultades



del proceso y completar este importante desafío personal y profesional.

2 Resumen

La presente memoria desarrolla un modelo integral técnico-regulatorio, logístico, económico y estratégico-comercial para apoyar la valorización de subproductos generados en las operaciones de celulosa y maderas de CMPC Chile. El problema surge porque materiales con potencial de uso agrícola continúan sujetos a costos de transporte y valorización, mientras su transformación en enmiendas o fertilizantes exige resolver requisitos técnicos, documentales, regulatorios y comerciales. Por ello, el estudio analiza las condiciones necesarias para avanzar desde una gestión basada principalmente en el retiro de residuos hacia configuraciones que reduzcan costos y permitan una eventual captura de valor.

La investigación corresponde a un estudio aplicado, no experimental, descriptivo y analítico. La metodología se estructura en tres ejes. El eje técnico-regulatorio identifica la ruta de habilitación asociada a la Ley N° 21.349, el D.S. N° 61/2023 y la coordinación con el SAG y la SEREMI de Salud. El eje económico analiza el caso base de distribución y compara escenarios de valorización mediante un modelo de costo total que integra generación, capacidad, distancia, transporte y tarifa de valorización. El eje estratégico-comercial utiliza entrevistas internas con las áreas de Innovación y Ventures para filtrar modelos de negocio y desarrolla una estimación preliminar de precios para subproductos calcáreos homologables a referencias comerciales.

Los resultados muestran que la inscripción del productor constituye un primer hito, pero no reemplaza la preparación de expedientes técnicos por producto o mezcla ni la coordinación sanitaria y ambiental. En el análisis económico, los escenarios de predios adyacentes a Santa Fe, Laja y Bucalemu alcanzan reducciones de costo de 63 %, 54 % y 55 %, respectivamente, confirmando la relevancia de la distancia en el costo total. En el ámbito comercial, se descartan como rutas

iniciales la venta directa B2B y la consignación, debido a que requieren capacidades comerciales, inversión y gestión de inventario que no forman parte del alcance actual de CMPC. En consecuencia, se priorizan alternativas apoyadas en distribuidores, socios técnico-comerciales, maquila y configuraciones híbridas por familia de subproducto.

Se concluye que la valorización económica requiere una implementación gradual y diferenciada, en la que la habilitación regulatoria, la eficiencia logística y la estructura comercial sean evaluadas conjuntamente. La memoria entrega una base de decisión para priorizar subproductos, destinos y rutas de valorización, contribuyendo a una gestión más circular y económicamente eficiente.

Palabras clave: economía circular, valorización de subproductos, industria forestal, enmiendas; fertilizantes, optimización logística, eficiencia económica, CMPC.

3 Abstract

This thesis develops an integrated technical-regulatory, logistical, economic, and strategic-commercial model to support the valorization of by-products generated by CMPC Chile's pulp and wood operations. The problem arises because materials with potential agricultural applications remain associated with transportation and valorization costs, while their transformation into soil amendments or fertilizers requires technical, documentary, regulatory, and commercial conditions to be addressed. Therefore, the study examines the requirements for moving from a management approach mainly based on waste removal toward configurations that reduce costs and enable the potential capture of economic value.

The research follows an applied, non-experimental, descriptive, and analytical design. The methodology is structured around three axes. The technical-regulatory axis identifies the enabling pathway associated with Law No. 21.349, Supreme Decree No. 61/2023, and coordination with the Agricultural and Livestock Service, the Regional Health Authority, and the Environmental Assessment Service. The economic axis analyses the current distribution baseline and compares alternative valorization scenarios through a total-cost model that integrates generation, receiving capacity, distance, transportation, and valorization fees. The strategic-commercial axis uses internal interviews with CMPC's Innovation and Ventures areas to filter business models and develops a preliminary price estimation for calcareous by-products that may be technically benchmarked against commercial references.

The results show that producer registration represents an initial milestone but does not replace the preparation of technical dossiers for each product or mixture, nor the required sanitary and environmental coordination. In the economic analysis, the scenarios involving fields adjacent

to the Santa Fe, Laja, and Bucalemu plants achieve cost reductions of 63 %, 54 %, and 55 %, respectively, confirming the relevance of distance within the total-cost structure. From a commercial perspective, direct B2B sales and consignment are not recommended as initial routes because they require commercial capabilities, investment, and inventory management that are currently outside CMPC's project scope. Consequently, alternatives involving distributors, technical-commercial partners, toll processing, and hybrid configurations by by-product family are prioritized.

The study concludes that economic valorization requires a gradual and differentiated implementation in which regulatory enablement, logistics efficiency, and commercial architecture are assessed jointly. The thesis provides a decision-making basis for prioritizing by-products, destinations, and valorization pathways, thereby contributing to more circular and economically efficient material management.

Keywords: circular economy, by-product valorization, forest industry, soil amendments, fertilizers, logistics optimization, economic efficiency, CMPC.

4 Introducción

La transición hacia sistemas productivos más sostenibles exige modificar la forma en que las organizaciones utilizan los recursos y gestionan los materiales resultantes de sus procesos. Bajo el enfoque de economía circular, los residuos dejan de analizarse únicamente como flujos destinados a tratamiento o disposición final y pasan a evaluarse según su potencial para permanecer dentro de ciclos productivos, sustituir materias primas o adquirir nuevas funciones. Esta transformación resulta especialmente relevante en Chile, donde persisten brechas en valorización material y una elevada dependencia de alternativas de eliminación, particularmente en sectores intensivos en recursos naturales (Instituto Nacional de Estadísticas, [2026](#); Ministerio del Medio Ambiente de Chile, [2024](#); Organisation for Economic Co-operation and Development, [2024](#)).

El sector forestal posee una participación significativa en la actividad productiva y exportadora nacional. La producción de celulosa, madera y productos derivados moviliza grandes volúmenes de materias primas y genera corrientes secundarias con composiciones y posibilidades de uso diversas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, [2025](#); Instituto Forestal, [2024](#)). Paralelamente, el negocio de la celulosa se encuentra expuesto a ciclos internacionales de precios, variaciones de demanda y presión competitiva, lo que aumenta la importancia de mejorar la eficiencia operacional y capturar valor desde recursos actualmente subutilizados. En este contexto, la valorización de subproductos puede contribuir simultáneamente al desempeño ambiental, a la reducción de costos y a la diversificación de alternativas de gestión.

En CMPC, esta problemática se vincula con la estrategia de reducción de residuos a disposición final y con el avance hacia procesos más circulares. Las operaciones de celulosa y maderas generan subproductos tales como dregs y grits, cenizas, lodos de cal, polvos de carbonato, cortezas

y otras corrientes orgánicas o minerales. Parte de estos materiales presenta propiedades que permiten evaluar su aplicación agrícola como enmienda o fertilizante. Sin embargo, su aprovechamiento no depende únicamente de la composición química: requiere demostrar calidad, seguridad, trazabilidad y eficacia, además de resolver la inscripción de establecimientos y productos, el etiquetado, las condiciones de manejo y las competencias de las autoridades involucradas (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#); CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

La gestión de estos subproductos muestra un problema de decisión multidimensional. Por una parte, existe una ruta técnico-regulatoria que debe permitir el tránsito desde la categoría de residuo hacia la de producto agrícola regulado. Por otra, la asignación de toneladas desde plantas generadoras hacia predios o valorizadores debe considerar costos de transporte, tarifas de valorización, capacidades de recepción, distancias y restricciones del negocio. Finalmente, una eventual comercialización exige determinar qué modelos permiten capturar valor sin desarrollar capacidades que no se encuentran actualmente disponibles en la organización. En consecuencia, una evaluación basada únicamente en el menor precio de valorización o en la cercanía del destino resulta insuficiente para representar la totalidad del problema.

Frente a este desafío, la memoria tiene como propósito diseñar y evaluar un modelo integral técnico-regulatorio, logístico y económico para la valorización de subproductos de celulosa y madera como enmiendas o fertilizantes. Para ello, se identifican los requisitos legales y documentales aplicables, se analiza el funcionamiento del caso base de distribución, se modelan escenarios orientados a minimizar el costo total, se evalúan alternativas de diversificación de valorizadores y predios; y se construye una aproximación preliminar de negocio para aquellas familias con poten-

cial de comercialización. El estudio busca, por tanto, conectar las condiciones que habilitan el uso del material con las decisiones operacionales y económicas necesarias para su implementación.

De acuerdo con la metodología de investigación aplicada, el trabajo adopta un diseño no experimental, descriptivo y analítico, puesto que utiliza información existente para caracterizar el problema, comparar alternativas e interpretar sus implicancias, sin intervenir experimentalmente los procesos productivos. Las unidades de análisis incluyen subproductos, plantas generadoras, predios receptores, valorizadores, costos, distancias, capacidades, requisitos regulatorios y modelos comerciales. Las fuentes utilizadas comprenden antecedentes internos de CMPC, análisis físico-químicos, matrices operacionales, documentación normativa, comunicaciones con autoridades, propuestas económicas y entrevistas con áreas internas.

La metodología se organiza en tres ejes complementarios. El eje técnico-regulatorio sistematiza la ruta ante el SAG y la coordinación con la SEREMI de Salud. El eje económico caracteriza el sistema actual y aplica un modelo de optimización para comparar escenarios de valorización según costo total. El eje estratégico-comercial filtra modelos de negocio mediante entrevistas con Innovación y Ventures y estima precios preliminares para subproductos calcáreos a partir de su homologación funcional con referencias comerciales. Esta estructura permite que los resultados no se limiten a una perspectiva aislada, sino que integren factibilidad regulatoria, conveniencia económica y posibilidad de captura de valor.

El documento presenta inicialmente el problema de investigación, las preguntas, los objetivos y el alcance. Posteriormente, el marco teórico desarrolla los conceptos de economía circular, valorización, regulación agrícola, gestión de subproductos, optimización logística y modelos de negocio. El capítulo metodológico explica los procedimientos utilizados en cada eje, mientras que

el capítulo de análisis y resultados presenta la ruta regulatoria identificada, los escenarios económicos evaluados y la aproximación comercial desarrollada. Finalmente, se exponen las conclusiones, la discusión y las limitaciones. La principal contribución de la memoria consiste en proporcionar a CMPC una estructura de decisión que permita priorizar rutas de valorización y orientar futuras etapas de implementación.

5 Problema de Investigación

Chile enfrenta una tensión estructural entre su matriz productiva basada en recursos naturales y la necesidad de avanzar hacia esquemas de desarrollo ambientalmente más eficientes. La propia OCDE ha destacado que el país exhibe fortalezas en transición energética, con una participación de energías renovables del 27 %, pero mantiene rezagos relevantes en valorización material de residuos, pertenecientes a la categoría de municipales, que alcanza solo 0,7 % frente al 38,3 % promedio del organismo, junto con un gasto en protección ambiental equivalente a 0,15 % del PIB (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024) según lo mostrado en la figura 1. En términos analíticos, este escenario sugiere que el problema no radica únicamente en la generación de residuos, sino también en la limitada capacidad institucional, regulatoria y económica para transformar esos flujos en nuevos productos o usos de valor.

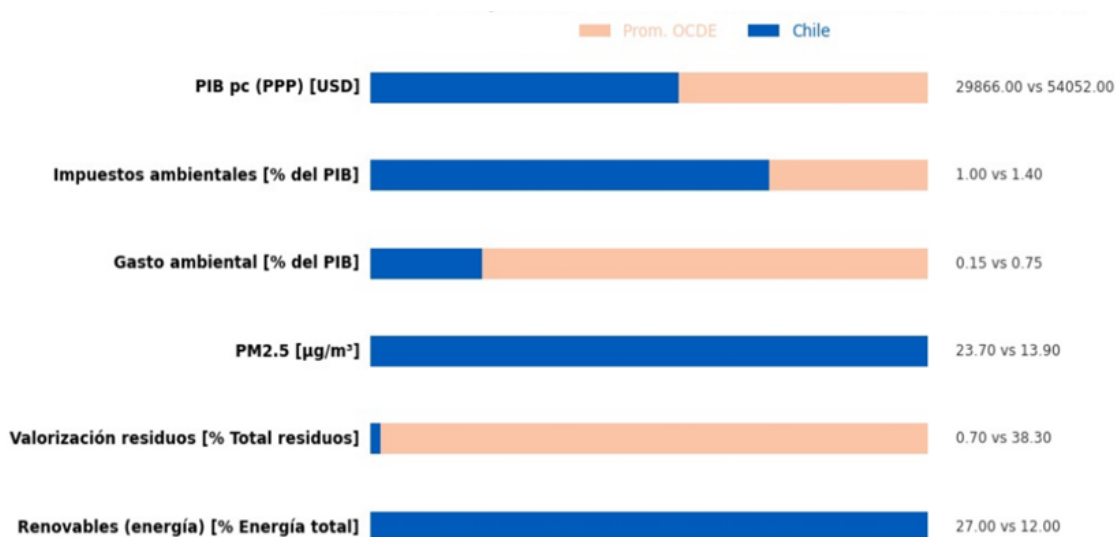


Figura 1: Benchmarking ambiental de Chile frente al promedio OCDE. Fuente: Elaboración propia

La magnitud de la brecha se observa con mayor claridad al revisar la información ambiental nacional. El Informe Consolidado del RETC indica que durante 2022 se generaron más

de 18 millones de toneladas de residuos, de las cuales 48,92 % correspondieron a residuos industriales no peligrosos y 46,50 % a residuos municipales (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2024). De forma complementaria, el Informe Anual de Estadísticas del Medio Ambiente del INE organiza la evidencia reciente sobre disposición final, residuos municipales, residuos industriales y uso de fertilizantes, mostrando que la gestión de desechos continúa siendo un componente central del desempeño ambiental chileno (Instituto Nacional de Estadísticas, 2026). En consecuencia, la discusión sobre valorización no es un complemento, sino una dimensión crítica para reducir la eliminación, mitigar riesgos regulatorios y mejorar eficiencia en sectores intensivos en generación de subproductos.

Dentro de este contexto, el sector forestal posee una relevancia económica suficiente para que la gestión de sus residuos y subproductos sea tratada como un problema estratégico y no meramente operativo. El Anuario Forestal 2024 informa que, para 2023, las exportaciones forestales chilenas alcanzaron USD 5.556 millones y el empleo sectorial bordeó las 101,9 mil personas, mientras que la producción industrial de pulpa química llegó a 5,054 millones de toneladas (Instituto Forestal, 2024). En escala internacional, la FAO ubica a los productos forestales dentro de cadenas globales de producción y comercio que se sostienen sobre la trazabilidad, la eficiencia en uso de recursos y la creciente presión por soluciones de base biológica (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025). Por ello, toda mejora en la valorización de subproductos forestales puede impactar simultáneamente en competitividad, sostenibilidad y captura de valor.

Dentro de la relevancia estructural del sector forestal se suma que el negocio de la celulosa se desenvuelve en mercados internacionales expuestos a variaciones de precios, fluctuaciones en la demanda y mayor presión competitiva. En Chile, esta sensibilidad no es marginal, dado que la

propia base del proyecto identifica que el sector forestal ha mostrado alta volatilidad reciente y una contracción significativa de su PIB en 2022, reflejado en la figura 2, al tiempo que la actividad de celulosa, papel e imprentas constituye el principal generador de valor dentro del sector forestal según se observa en la figura 3 (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En la misma línea, la evidencia sectorial más reciente indica que entre enero y noviembre de 2025 las exportaciones forestales chilenas cayeron 5,4 %, en un contexto donde más de la mitad del valor exportado correspondió al grupo pulpa, el cual concentró 53,5 % de los envíos forestales, con predominio de la pulpa blanqueada de eucalipto y de pino radiata (Poblete Hernández & Hernández Pineda, 2025). Complementariamente, el boletín Mercado Forestal de INFOR atribuye la caída reciente de los precios internacionales de la pulpa a un escenario de exceso de oferta global, debilidad de la demanda, altos inventarios y cambios en la competencia internacional, incluyendo efectos arancelarios y mayores esfuerzos de sustitución de importaciones en China (Kahler González et al., 2025). En este contexto, la valorización de subproductos adquiere relevancia no solo como respuesta ambiental y regulatoria, sino también como una estrategia complementaria de eficiencia económica, reducción de costos evitables y captura de valor frente a la mayor exposición del negocio principal a ciclos de mercado.

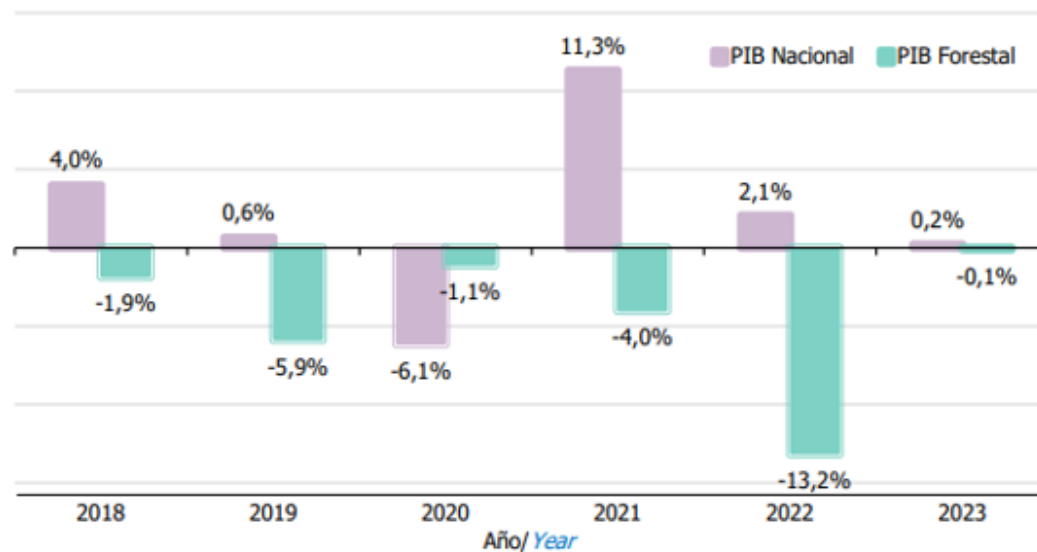


Figura 2: Dinamismo y Volatilidad del PIB Forestal (2018-2023). Fuente: Banco Central de Chile.

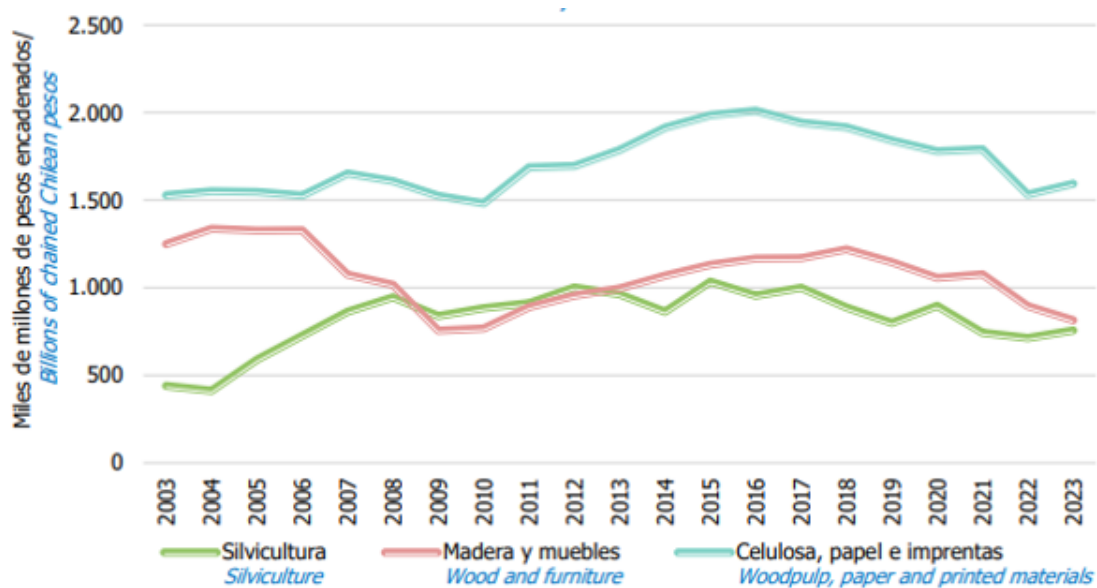


Figura 3: Composición del PIB forestal por actividad. Fuente: Banco Central de Chile.

En el caso de CMPC, el desafío se enmarca además en una estrategia corporativa explícita de sostenibilidad y circularidad. El Reporte Integrado 2024 señala que la compañía ha orientado su estrategia hacia sostenibilidad, innovación y reducción de residuos a disposición final, vinculando competitividad con uso eficiente de recursos y economía circular (Empresas CMPC S.A., 2025). A

nivel interno, los antecedentes del proyecto muestran que la estrategia hacia una organización “0 residuos” busca asegurar cumplimiento de cero residuos a disposición final desde 2025, y que para la línea base de Celulosa se reporta 99,5 % de residuos valorizados, subsistiendo todavía flujos que continúan yendo a eliminación (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Esto desplaza el foco desde una lógica tradicional de manejo y disposición hacia una lógica de habilitación técnica, regulatoria y sobretodo económica para usos de mayor valor.

Dado que el núcleo del problema de investigación se ubica precisamente en la “etapa final” de esta transición, los antecedentes internos del proyecto muestran que existe una cartera de subproductos en estudio para su eventual inscripción como enmiendas o fertilizantes, incluyendo familias inertes, calcáreas y orgánicas, entre ellas dregs, grits, cenizas finas y gruesas, lodos de cal, cortezas sucias, virutas y chapas (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Sin embargo, la mera existencia de subproductos valorizables no garantiza su comercialización. Para que el residuo deje de ser gestionado como tal y pase a ser un producto agrícola regulado sectorialmente, se requiere cumplir requisitos de clasificación, calidad, trazabilidad, documentación técnica, etiquetado e inscripción ante el Servicio Agrícola y Ganadero (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#); CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). De esta forma, la problemática no es solo técnica y legal, es técnico-regulatoria y económico-operacional a la vez.

La dificultad aumenta cuando se incorpora la dimensión logística y de asignación de cargas. La documentación interna de CMPC indica que el algoritmo de optimización propuesto persigue minimizar el costo total de transporte y valorización mediante la asignación de toneladas desde plantas generadoras hacia predios receptores, integrando matrices de datos heterogéneas y paráme-

tros del negocio expuestos en los anexos 21-26 y procesados según el algoritmo de optimización 1 descrito de igual forma en anexos (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). A ello se suma la necesidad de diversificar valorizadores externos y evaluar alternativas como predios propios o esquemas de venta, dado que actualmente se identifica una brecha crítica de habilitadores para la etapa final de comercialización (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Por tanto, el problema no se agota en “cumplir la ley”, sino en determinar bajo qué configuración documental, regulatoria y logística la valorización puede transformarse en una alternativa económicamente eficiente y escalable.

La investigación se justifica por tres razones complementarias. Primero, por su relevancia práctica, ya que puede apoyar decisiones reales de registro, adopción, distribución y comercialización de subproductos en una empresa con alta escala operativa. Segundo, por su valor regulatorio, en la medida en que sistematiza la aplicación de la Ley N° 21.349 y su reglamento a subproductos de la industria de celulosa y madera, un campo donde todavía persisten brechas de interpretación y habilitación operativa (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021, 2023). Tercero, por su aporte metodológico, ya que integra análisis documental, clasificación técnica de productos, evaluación de escenarios y optimización de costo total dentro de un mismo modelo de decisión, alineando el problema con una memoria integral aplicada propia del ámbito de acción de la Ingeniería Civil Industrial.

En consecuencia, el problema de estudio consiste en que CMPC enfrenta una **brecha técnico-regulatoria, logístico-económica y comercial** para transformar parte de sus subproductos de celulosa y madera en enmiendas o fertilizantes formalmente habilitados, económicamente eficientes y eventualmente comercializables. Esta brecha involucra, al menos, cuatro dimensiones

de análisis: i) cumplimiento regulatorio y documental, ii) clasificación técnica del subproducto, iii) costo total de asignación y valorización, y iv) habilitadores para la comercialización. Los actores directamente involucrados son CMPC como empresa generadora, el SAG como organismo regulador, los valorizadores y predios receptores como nodos operacionales, y los eventuales usuarios agrícolas como destino de uso. Sobre esta base, la investigación busca aportar un marco de decisión aplicado que permita determinar bajo qué condiciones regulatorias, logísticas y económicas la valorización de subproductos puede evolucionar hacia una alternativa escalable de captura de valor.

Preguntas de investigación

- ¿Qué condiciones técnico-regulatorias determinan la viabilidad de registrar subproductos de celulosa y madera de CMPC como enmiendas o fertilizantes bajo.?
- ¿Cuáles son los requisitos generales de carácter documental, técnico y legal que deben cumplirse para habilitar la inscripción de plantas y productos elaborados a partir de estos subproductos?
- ¿Qué propuesta de asignación de toneladas desde plantas generadoras a predios receptores minimiza el costo total de transporte y valorización bajo las restricciones operacionales del caso?
- ¿En qué medida la diversificación de valorizadores y la habilitación de condiciones técnico-comerciales pueden reducir dependencia y mejorar la viabilidad económica de la eventual comercialización de estos subproductos?

6 Objetivos

6.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar un modelo integral técnico-regulatorio, logístico y económico para la valorización de subproductos de celulosa y madera como enmiendas o fertilizantes, mediante la identificación de condiciones regulatorias-legales, la evaluación de configuraciones operacionales y resultados económicos con el fin de minimizar el costo total y habilitar su eventual comercialización.

6.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los subproductos de celulosa y madera bajo estudio, identificando sus familias, usos potenciales y rutas de valorización pertinentes.
- Definir los requisitos regulatorios-legales, documentales y de inscripción necesarios para habilitar el registro de plantas y productos elaborados a partir de estos subproductos.
- Analizar el caso base del algoritmo actual de asignación de toneladas desde plantas a predios, mediante un modelo de optimización que permita evaluar su desempeño en la minimización de los costos de transporte y valorización bajo las restricciones del negocio.
- Evaluar escenarios de diversificación de valorizadores (externos, predios propios y alternativas) y alternativas operacionales, comparando su efecto sobre dependencia, costo total y factibilidad de valorización.
- Modelar y validar una propuesta de asignación de toneladas desde plantas generadoras a predios receptores de modo que minimice el costo total de transporte y valorización.



- Proponer un modelo de negocio, sustentado en un estudio de mercado, con el propósito de habilitar la comercialización y venta de subproductos.

7 Alcance

El alcance de esta memoria se limita al análisis aplicado de la valorización de subproductos generados en operaciones de celulosa y madera de CMPC Chile, considerando su potencial transición hacia enmiendas o fertilizantes, su gestión económica bajo distintos escenarios de valorización y su eventual habilitación comercial. El estudio no aborda la totalidad de residuos generados por la compañía, sino aquellos subproductos incluidos en los antecedentes técnicos, matrices operacionales, ejercicios económicos y análisis de homologación disponibles para el proyecto (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

En el eje técnico-regulatorio, el alcance comprende la identificación de requisitos generales asociados a la Ley N° 21.349, el D.S. N° 61/2023 y las rutas de coordinación con organismos competentes, particularmente SAG, SEREMI de Salud y SEA. El análisis se orienta a ordenar exigencias documentales, técnicas y operativas para la eventual inscripción de plantas, productos o mezclas, sin reemplazar los procesos formales de evaluación, autorización o fiscalización que corresponden a dichas instituciones (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#); CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Por tanto, los resultados regulatorios deben entenderse como una ruta de habilitación y no como una aprobación administrativa definitiva.

En el eje económico, el alcance considera la evaluación del caso base y de escenarios alternativos de valorización, incorporando costos de transporte, costos de valorización, distancias, capacidades de recepción y volúmenes de generación disponibles en los antecedentes del proyecto. El análisis se desarrolla bajo una lógica de costo total, por lo que no se limita a comparar tarifas unitarias, sino que integra componentes logísticos y operacionales. En este sentido, los escenarios evaluados corresponden a configuraciones factibles o exploratorias derivadas de los datos disponi-

bles, y no a una implementación operacional definitiva.

En el eje estratégico-comercial, el alcance se limita a una aproximación preliminar de modelos de negocio y potencial de comercialización. La memoria no constituye un estudio de mercado cerrado ni una validación comercial exhaustiva con clientes finales. Su contribución consiste en filtrar modelos de negocio a partir de entrevistas internas, descartar alternativas no alineadas con las capacidades actuales de CMPC y estimar precios preliminares para subproductos calcáreos homologables a referencias comerciales. Por lo tanto, los valores obtenidos deben entenderse como estimaciones de potencial económico y no como precios finales de venta.

Quedan fuera del alcance de esta memoria la ejecución de ensayos agronómicos en campo, la obtención formal de registros administrativos, la negociación contractual definitiva con clientes o valorizadores, la validación comercial con compradores finales, la evaluación ambiental formal de proyectos específicos y el diseño detallado de una nueva unidad de negocio. Asimismo, el estudio no reemplaza análisis legales, tributarios, sanitarios o ambientales especializados, sino que los organiza como insumos para la toma de decisiones dentro del marco aplicado de la Ingeniería Civil Industrial.

En consecuencia, el alcance del trabajo corresponde a una evaluación aplicada y preliminar de factibilidad técnico-regulatoria, eficiencia económica y habilitación comercial. Su valor principal radica en entregar a CMPC una estructura analítica para priorizar alternativas, identificar brechas y orientar decisiones futuras, manteniendo explícita la diferencia entre resultados del estudio, supuestos de modelación y validaciones externas pendientes.

8 Marco Teórico

8.1 Economía circular y valorización de residuos en Chile

La economía circular constituye un marco conceptual y operativo orientado a mantener el valor de los materiales durante el mayor tiempo posible, reduciendo extracción, eliminación y emisiones asociadas. En el contexto chileno, este enfoque adquiere especial relevancia porque el diagnóstico ambiental reciente muestra un desacople todavía limitado entre crecimiento económico y presión sobre ecosistemas, acompañado de bajos niveles de valorización de residuos y una fuerte dependencia de la eliminación (Organisation for Economic Co-operation and Development, [2024](#); Sistema Nacional de Información Ambiental, [2025](#)). Por ello, la valorización deja de ser una práctica marginal y pasa a ser una estrategia de eficiencia sistémica.

Observando la figura [4](#), la evidencia nacional respalda esta necesidad. El RETC reporta que en 2022 se generaron más de 18 millones de toneladas de residuos, con predominio de residuos industriales no peligrosos y residuos municipales (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, [2024](#)). A su vez, la información ambiental anual del INE sistematiza series sobre disposición final, residuos y uso de fertilizantes, permitiendo observar que la gestión de materiales sigue siendo una dimensión estructural de la política ambiental y productiva chilena (Instituto Nacional de Estadísticas, [2026](#)). En términos teóricos, esto permite entender la circularidad como un problema de rediseño de flujos materiales, y no solo de cumplimiento sanitario o disposición final.

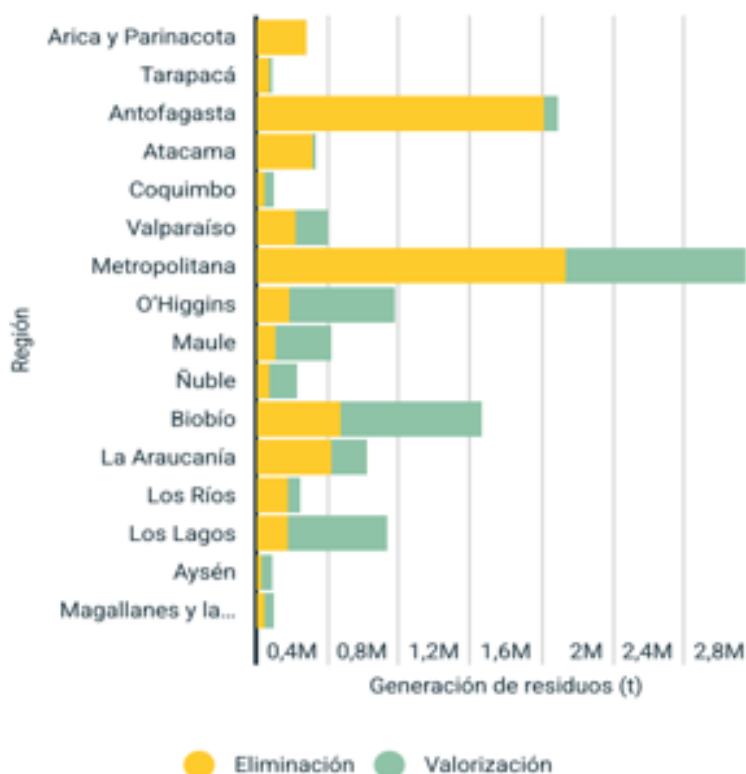


Figura 4: Brecha crítica de valorización de residuos en el contexto nacional. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente de Chile

8.2 Sector forestal, industria de celulosa y generación de subproductos

El sector forestal chileno resulta especialmente pertinente para el estudio por su peso económico y por la diversidad de flujos materiales que moviliza. El Anuario Forestal 2024 informa niveles significativos de producción industrial de pulpa, madera aserrada, tableros y papel, junto con exportaciones sectoriales por miles de millones de dólares (Instituto Forestal, 2024). En paralelo, la estadística internacional de FAO confirma que la pulpa, la madera industrial y los productos forestales operan dentro de mercados globales donde la eficiencia en uso de recursos y la agregación de valor a subproductos se han vuelto crecientemente relevantes (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025). Así, la generación de subproductos en la industria forestal debe analizarse no como externalidad inevitable, sino como parte de una cadena de valor

ampliada.

La relevancia del sector forestal no se explica únicamente por su escala productiva, sino también por la centralidad que tiene el negocio de la celulosa dentro de su estructura de valor y por su exposición a condiciones cambiantes del mercado internacional. La presentación base del proyecto señala que la industria de celulosa y papel constituye el principal motor de valor del sector forestal chileno y que el sector ha mostrado una volatilidad reciente superior a la del crecimiento nacional (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Esta caracterización encuentra respaldo en la evidencia sectorial reciente: entre enero y noviembre de 2025 el grupo pulpa química concentró 53,5 % del valor total de las exportaciones forestales chilenas de acuerdo a la figura 5, mientras que la pulpa blanqueada de eucalipto y la pulpa blanqueada de pino radiata ocuparon, respectivamente, el primer y segundo lugar entre los productos exportados (Poblete Hernández & Hernández Pineda, [2025](#)). En consecuencia, el desempeño económico del sector forestal chileno mantiene una dependencia significativa del comportamiento del mercado de la pulpa.



Figura 5: Participación principales productos exportados enero-noviembre 2025. Fuente: INFOR, con base en datos del Servicio Nacional de Aduanas.

Desde la perspectiva del mercado, el boletín *Mercado Forestal* de INFOR muestra que durante 2025 las exportaciones forestales chilenas enfrentaron un deterioro en su trayectoria desde el segundo semestre visto en la figura 6, explicado en gran medida por la caída de los precios internacionales de la pulpa. El mismo documento asocia esta situación a factores como la expansión de capacidades productivas, la debilidad de la demanda, la acumulación de inventarios, ciertos efectos arancelarios y la estrategia china de mayor integración vertical en las industrias de pulpa y papel (Kahler González et al., 2025). Bajo este marco, la valorización de subproductos puede comprenderse no solo como un instrumento de economía circular, sino también como una estrategia de resiliencia económica: al diversificar usos, reducir costos de disposición y habilitar nuevas formas de captura de valor, contribuye a disminuir la dependencia exclusiva del negocio principal frente a contextos de mayor presión competitiva.

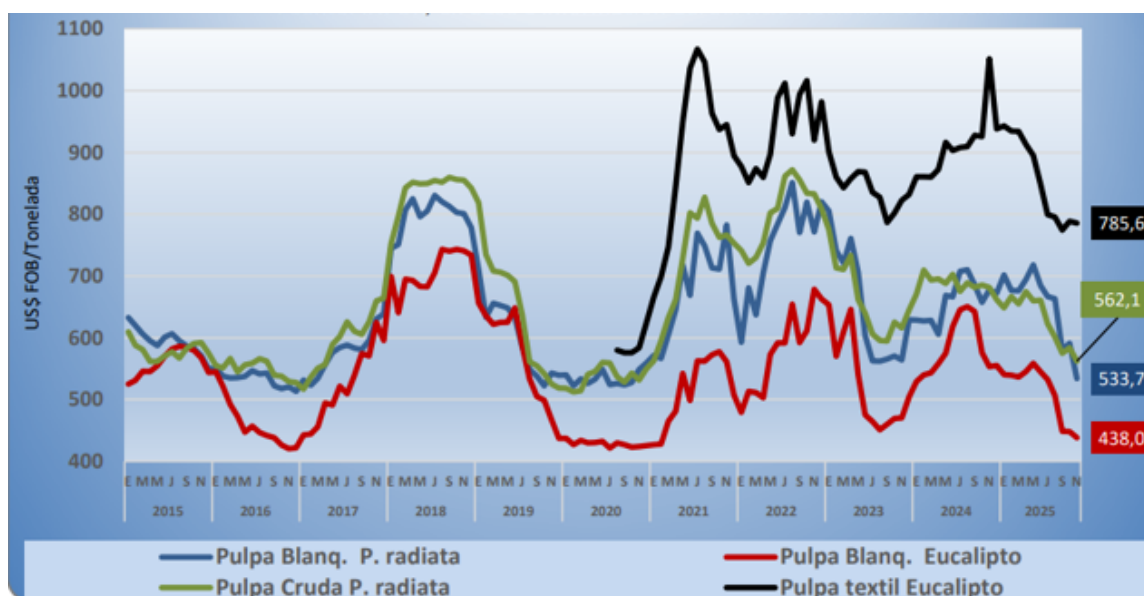


Figura 6: Evolución del precio de exportación e pulpas exportadas en Chile. Fuente: INFOR, en base a información del Servicio Nacional de Aduanas

En el plano empresarial, CMPC declara una estrategia de sostenibilidad y biofuturo que conecta innovación, eficiencia de recursos y economía circular, incluyendo el objetivo de avanzar hacia cero residuos a disposición final (Empresas CMPC S.A., 2025). Los antecedentes internos del proyecto refuerzan esta orientación al señalar que la estrategia corporativa “0 residuos” busca circularizar procesos y habilitar nuevas formas de valorización, especialmente en subproductos generados por operaciones pulp y madera (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Desde el marco teórico, esto justifica abordar la valorización como una decisión estratégica, donde sostenibilidad y eficiencia económica son variables mutuamente dependientes.

Para el proyecto en estudio, los subproductos bajo análisis se agrupan en familias con propiedades y usos potencialmente distintos: dregs y grits, cenizas, materiales calcáreos y subproductos orgánicos, entre otros (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Esta clasificación es relevante porque permite anticipar que no todos los flujos deben seguir una misma

ruta regulatoria o logística. En otras palabras, el problema exige una lectura diferenciada de calidad, composición, función agronómica y destino operativo, lo cual impide tratar el universo de subproductos como un bloque homogéneo.

8.3 Subproducto, residuo, enmienda, fertilizante y bioestimulante

Una de las distinciones conceptuales más importantes del estudio es la que separa “residuo” de “subproducto” y, posteriormente, de “producto agrícola”. Mientras un residuo se gestiona prioritariamente bajo lógica de control, disposición o tratamiento, un subproducto valorizable puede transitar hacia una categoría de producto siempre que cumpla estándares técnicos y regulatorios. Esta transición conceptual es decisiva en el caso analizado, porque redefine competencias institucionales, exigencias documentales y posibilidades económicas (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#); CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

En este contexto, la enmienda se refiere a aquel material que se incorpora directamente al suelo con el propósito principal de mejorar sus propiedades físicas, químicas o biológicas, tales como estructura, pH, materia orgánica o retención de agua (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Esta definición es consistente con la lógica de la Ley N° 21.349, que incluye dentro del campo regulado a productos cuya función puede incidir en fertilidad, propiedades del suelo y nutrición vegetal (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#)). Para esta memoria, la categoría de enmienda resulta central porque muchos subproductos forestales no buscan necesariamente nutrir directamente a la planta, sino modificar favorablemente el suelo donde ella se desarrolla.

El fertilizante, en cambio, se orienta al aporte de nutrientes o al aumento de su disponibi-

lidad para favorecer crecimiento, rendimiento o calidad de las plantas. En el material interno se destaca que esta categoría puede involucrar nutrientes como N, P, K, Ca o Mg, así como acciones específicas sobre la fertilidad del suelo (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). La relevancia teórica de esta distinción radica en que una misma corriente material podría requerir distinta estrategia de registro, formulación, rotulación y demostración técnica según se la posicione como enmienda o como fertilizante.

Por su parte, el bioestimulante no se define prioritariamente por su aporte nutritivo, sino por su capacidad para estimular procesos naturales de la planta o de la rizosfera, mejorando el uso de nutrientes, la tolerancia al estrés o la calidad del cultivo (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

Asimismo, el proyecto identifica distintas familias de subproductos bajo estudio, entre ellas materiales inertes, calcáreos y orgánicos, incluyendo dregs, grits, cenizas finas y gruesas, lodos de cal, cortezas sucias, virutas y chapas (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En consecuencia, el análisis del caso exige una lectura diferenciada de composición, función agronómica, calidad y destino operativo, evitando tratar el universo de subproductos como un bloque homogéneo.

De forma compacta, las 3 definiciones expuestas anteriormente se pueden resumir en la tabla 1:

Tabla 1: Clasificación de subproductos: enmienda, fertilizante y bioestimulantes.

	Enmienda	Fertilizante	Bioestimulantes
¿Qué hace?	Mejora el suelo (propiedades físicas, químicas o biológicas).	Aporta nutrientes y/o mejora la fertilidad para que la planta crezca y rinda mejor.	No nutre, sino que estimula procesos naturales de la planta para que use mejor los nutrientes, tolere estrés abiótico, mejore calidad o libere nutrientes inmovilizados.
¿Cómo se logra?	Se incorpora directamente al suelo para su mejora (estructura, pH, materia orgánica, retención de agua, etc.).	Gracias a su contenido de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, micronutrientes) y por una acción específica que mejora la nutrición o fertilidad (incluye aplicación al suelo o foliar).	Con sustancias o microorganismos, aplicados a semillas, plantas o rizosfera.
Diferenciador	Su foco es el suelo, puede tener valor fertilizante pero no es lo principal.	Su foco es nutrir o aumentar disponibilidad de nutrientes (según ley este incluye enmiendas).	Su efecto es biológico/fisiológico (mejora eficiencia, estrés).

Fuente: Elaboración propia.

8.4 Marco regulatorio: Ley N° 21.349 y D.S. N° 61/2023

La Ley N° 21.349 establece en Chile normas sobre composición, etiquetado y comercialización de fertilizantes y bioestimulantes, mientras que el D.S. N° 61/2023 aprueba su reglamento y desarrolla la forma, requisitos y condiciones del Registro Único Nacional, la clasificación de productos y las obligaciones aplicables a personas naturales y jurídicas (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#)). Para esta memoria, el valor teórico de este marco normativo resi-

de en que redefine el punto de corte entre gestión de residuos y circulación sectorial de productos agrícolas.

Los antecedentes internos del proyecto explicitan una implicancia decisiva: una vez que los subproductos usados en suelo se inscriben como enmiendas agrícolas ante el SAG, dejan de gestionarse como residuos industriales y pasan a ser productos agrícolas regulados sectorialmente (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Esto implica que el eje de control se desplaza hacia clasificación del producto, estándares de calidad, límites de contaminantes, trazabilidad, registro, inspección y fiscalización del uso agrícola. Teóricamente, este cambio altera el marco de decisión completo, porque la viabilidad del negocio depende de demostrar conformidad técnica y documental antes de capturar valor comercial.

En este sentido, el proyecto identifica como elementos críticos la inscripción de plantas en el Registro Único Nacional del SAG, la declaración del producto, la documentación técnica, el etiquetado o folleto, los parámetros de calidad y composición, la ausencia de contaminantes peligrosos y la evidencia de eficacia para su función agrícola (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

De forma compacta, el marco regulatorio y legal se encuentra resumido en la tabla [2](#):

Tabla 2: Marco legal y exigencias regulatorias para subproductos comercializados como enmiendas, fertilizantes o bioestimulantes (Chile).

Tema	Exigencia / definición	Implicancia práctica
Norma base	Ley N. 21.349: regula composición, etiquetado, comercialización y trazabilidad de fertilizantes y bioestimulantes.	Establece requisitos de calidad y seguridad para uso agrícola.
Reglamento SAG	D.S. N. 61/2023: procedimientos de aplicación sectorial (clasificación, estándares, límites de contaminantes, registro e inspección).	Define cómo se registra, controla y fiscaliza el uso agrícola.
Condición de uso de subproductos	Pueden utilizarse como fertilizantes, enmiendas o bioestimulantes si cumplen composición y seguridad, demuestran efecto beneficioso y son evaluados o registrados.	Sin registro y evaluación, no corresponde su comercialización como producto agrícola.
Registro obligatorio	Inscripción de plantas productoras en el Registro Único Nacional del SAG.	Habilita la producción y comercialización bajo control sectorial.
Declaración y documentación	Declaración del producto más documentación técnica (incluye etiquetado y/o folleto).	Permite trazabilidad, control y verificación técnica en fiscalización.
Requisitos técnicos mínimos	(i) parámetros de calidad y composición; (ii) ausencia de contaminantes peligrosos; (iii) evidencia de eficacia o función agronómica.	Sustenta la aprobación regulatoria y el uso en suelos.
Implicancia central	Aplicación en suelos de subproductos inscritos no constituye “disposición de residuos”.	El uso se rige por registro, etiquetado SAG y normativa agrícola aplicable.
Fechas relevantes (según material)	Publicación del reglamento: 28-08-2023. Entrada en vigencia de obligaciones: 28-08-2026.	Plazo de adecuación antes del cumplimiento obligatorio.

Fuente: Elaboración propia.

Desde esta perspectiva, la regulación no constituye un requisito administrativo aislado, sino una condición estructural de viabilidad para transformar residuos o subproductos en alternativas formalmente comercializables. En consecuencia, la captura de valor económico no depende únicamente de la factibilidad técnica del material, sino de demostrar previamente conformidad

documental, técnica y regulatoria.

8.5 Disposición de subproductos valorizados de CMPC

La disposición actual de subproductos valorizados en CMPC debe entenderse como parte de una lógica corporativa de transición desde la disposición final hacia esquemas de aprovechamiento material y operacionalmente controlados. En la línea base 2025 del negocio de celulosa, la documentación interna de la compañía reporta un nivel de valorización cercano al 99,5 % de los residuos, aunque subsiste un remanente de 8.470 toneladas que todavía se dirige a eliminación. En ese marco, la gestión vigente aplica estrategias como la aplicación benéfica en suelos degradados, el compostaje y la valorización energética, configurando una estructura en la que la valorización no constituye un evento aislado, sino una práctica integrada a la estrategia de cero residuos a disposición final (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

Dentro del caso analizado, los subproductos se generan principalmente en plantas de celulosa y madera resumidos en la figura 7. A nivel de red, la documentación distingue como nodos generadores a Santa Fe, Pacífico y Laja, junto con un conjunto de operaciones madereras que incluye Bucalemu, Mulchén, Nacimiento y Plywood (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). La oferta actual se concentra en Santa Fe y Pacífico, las que en conjunto reúnen alrededor del 80 % del volumen movilizado, principalmente en corrientes asociadas a *dregs*, *grits* y lodos. A su vez, la cartera de subproductos bajo análisis se agrupa en familias inertes, calcáreas y orgánicas, destacando *dregs* y *grits* con 12.000 ton/mes (55 %), cenizas con 5.000 ton/mes (23 %), materiales calcáreos con 4.500 ton/mes (20 %) y subproductos orgánicos con 400 ton/mes (2 %).

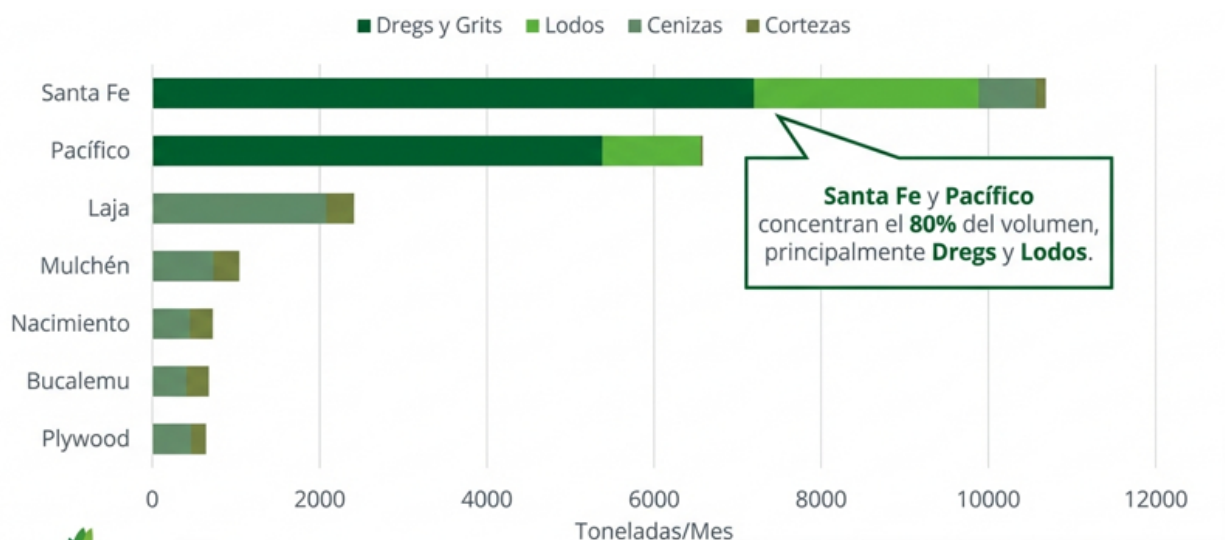


Figura 7: Distribución de la oferta actual de subproductos por planta generadora, con concentración predominante en Santa Fe y Pacífico. Fuente: Elaboración propia

En este contexto, el término *valorizador* se utiliza para designar al gestor, destino o predio receptor al cual se deriva un subproducto para su tratamiento, aplicación o aprovechamiento bajo una ruta de valorización. En el caso base, esta función es ejercida principalmente por gestores externos y predios receptores tales como VROSS, Reciclaje Orgánico, AddSoils, Ecocorp, CBB y Misión Verde, los que operan como nodos de salida de una red multi-origen y multi-destino. La documentación también distingue otras categorías dentro del caso ampliado, como la aplicación en predios propios y mecanismos tales como la entrega gratuita de subproductos o su eventual venta, dichos valorizadores se pueden distinguir en la tabla 3. (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026)

Tabla 3: Esquema de la red actual de distribución de subproductos entre plantas generadoras, tipologías materiales y destinos de valorización en CMPC.

VALORIZADOR	COSTO VALORIZAR (UF/TON)	COSTO DISTANCIA (UF/TON)	COSTO POR TONELADA (UF/TON)	CARGA ENVIADA (TON/MES)	COSTO TOTAL (UF/MES)
<u>AddSoils</u>	0,3	Laja: 0,136 Santa Fe: 0,071	Laja: 0,436 Santa Fe: 0,371	Laja: 235 Santa Fe: 2765	1129
CBB	0,1	Laja: 0,00059	Laja: 0,10059	1186	120
<u>Ecocorp</u>	0,216	Pacífico: 0,213	Pacífico: 0,429	Pacífico: 4200	1802
Misión verde	0,3	Santa fe: 0,102	Santa fe: 0,402	3000	1207
Reciclaje orgánico	0,250	Santa fe: 0,243 Laja: 0,094 Nacimiento: 0,243 Mulchén: 0,183 Bucalemu: 0,072	Santa fe: 0,493 Laja: 0,344 Maderas: 0,493 Mulchén: 0,433 Bucalemu: 0,322	Santa fe: 4943 Laja: 896 Maderas: 133 Mulchén: 135 Bucalemu: 661	3081
<u>Vross</u>	Pacífico: Inorgánico: 0,392 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 0,092	Pacífico: Inorgánico: 0,18 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 0,19	Pacífico: Inorgánico: 0,58 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 0,28	Pacífico: Inorgánico: 3355 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 400	1971
				21.909 Ton/mes	9.308 UF/mes 413.689 USD/año

Fuente: Elaboración propia.

La disposición actual de subproductos valorizados se organiza, por tanto, como una red logística que conecta plantas generadoras, tipologías de material y destinos receptores bajo restricciones geográficas, de capacidad y de costo según se aprecia en la figura ???. En términos operacionales, el caso base considera una distribución del orden de 21.909 ton/mes, cuya asignación se estructura a partir de la combinación entre oferta por planta, capacidad disponible por predio, distancias de transporte y tarifas de valorización. Esta lógica implica que la disposición no se define únicamente por cercanía física, sino por la compatibilidad entre el tipo de subproducto y la ruta de valorización disponible, así como por la capacidad de recepción de cada gestor o predio (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

A nivel de flujos específicos, la evidencia del caso base muestra que Santa Fe envía flujos importantes de *dregs/grits* hacia Misión Verde (Rapelco), lodo de cal hacia AddSoils (El Rosario) y cenizas hacia distintos predios de Reciclaje Orgánico, mientras que Pacífico concentra una alta dependencia operativa en Ecocorp–Quillayes, que absorbe 4.200 toneladas, equivalentes al 55 % de su volumen analizado. En la zona Biobío, la valorización vía CBB aparece como un sumidero eficiente de bajo costo para cenizas y arenas provenientes de Laja, en contraste con otros destinos de mayor costo unitario. Por su parte, las plantas de madera presentan volúmenes menores, pero enfrentan en algunos casos costos unitarios desproporcionadamente altos, lo que revela que la escala reducida del flujo no necesariamente se traduce en una gestión más eficiente. (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

En conjunto, la disposición actual de subproductos valorizados en CMPC se encuentra determinada por cuatro criterios generales: la distancia crítica de ciertas rutas, la saturación de predios cercanos, la disparidad de tarifas entre gestores y la naturaleza del residuo a gestionar según la figura 8. La propia síntesis del caso muestra que las rutas de mayor longitud incrementan los fletes, que la escasez de capacidad en destinos próximos obliga a desplazar carga hacia receptores más lejanos, y que corrientes como *dregs* y *grits* tienden a exhibir costos sistemáticamente superiores. En consecuencia, la gestión actual no solo describe cómo se dispone el material valorizable, sino que también delimita el problema técnico-operacional que justifica el análisis posterior de optimización logística, costo total mínimo y asignación de cargas (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).



Figura 8: Factores estructurales que condicionan el costo actual de disposición valorizada: distancia, saturación de predios, tarifas de entrada y tipo de residuo. Fuente: Elaboración propia

8.6 Optimización logística, costo total mínimo y asignación de cargas

Desde la perspectiva de ingeniería, el problema regulatorio debe integrarse con un problema de optimización de redes y asignación de cargas. El proyecto explicita que el algoritmo de distribución propuesto busca minimizar el costo total de transporte y valorización asignando toneladas desde plantas generadoras hacia predios receptores, a partir de matrices heterogéneas de datos y parámetros del negocio. Esto instala el concepto de costo total mínimo como criterio rector para evaluar configuraciones logísticas factibles (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

Resumido en la tabla 4, el costo total mínimo es relevante porque evita decisiones parciales basadas solo en tarifa de valorización o solo en distancia de transporte. Una alternativa aparentemente más barata en valorización puede volverse ineficiente si incrementa significativamente el costo logístico, del mismo modo que un predio cercano podría ser inviable por restricciones regulatorias, capacidad de recepción o compatibilidad técnica del subproducto. Por ello, el modelo

requiere integrar múltiples restricciones y no solo comparar precios unitarios (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

En términos de marco teórico aplicado, la optimización cumple aquí dos funciones. Primero, transforma información dispersa en una regla explícita de asignación, segundo, permite comparar escenarios de forma reproducible para apoyar decisiones de contratación y operación. Esta doble función dialoga con la pauta metodológica del proyecto de memoria, que exige no solo describir el fenómeno, sino incorporar modelos o metodologías pertinentes al problema de investigación. Así, la optimización no es un anexo matemático del estudio, sino uno de sus ejes conceptuales centrales (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

Por otro lado, el desglose matemático y de forma completa del modelo de optimización se observa en la tabla 4:

Tabla 4: Resumen del objetivo y funcionamiento del algoritmo.

Aspecto	Descripción
Objetivo del algoritmo	Minimizar el costo total (transporte y valorización), asignando toneladas de residuos desde plantas generadoras a predios receptores.
¿Cómo funciona?	El algoritmo integra cuatro matrices de datos heterogéneas y parámetros de negocio para construir el espacio de solución.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del objetivo y funcionamiento general descrito en la Tabla 4, el modelo de optimización se formaliza mediante una estructura matemática que permite representar la asignación de toneladas desde plantas generadoras hacia predios receptores. Para ello, se definen conjuntos, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones, con el propósito de asegurar que

la totalidad de los residuos generados sea asignada a destinos factibles, respetando capacidades de recepción y minimizando simultáneamente el costo total asociado al transporte y la valorización. Esta formulación permite traducir el problema operacional de distribución en un modelo cuantitativo de apoyo a la toma de decisiones.

Conjuntos

$$I = \{1, 2, \dots, |I|\} \quad \text{Conjunto de predios receptores} \quad (1)$$

$$J = \{1, 2, \dots, |J|\} \quad \text{Conjunto de plantas generadoras} \quad (2)$$

$$K = \{1, 2, \dots, |K|\} \quad \text{Conjunto de tipos de residuos} \quad (3)$$

Parámetros

$$d_{ij} \quad \text{Distancia entre planta } j \text{ y predio } i \quad (4)$$

$$v_{ik} \quad \text{Costo de valorización del residuo } k \text{ en } i \quad (5)$$

$$\alpha \quad \text{Factor de costo de transporte por km-ton} \quad (6)$$

$$C_i \quad \text{Capacidad máxima del predio } i \quad (7)$$

$$G_{jk} \quad \text{Generación del residuo } k \text{ en la planta } j \quad (8)$$

$$c_{ijk} = \alpha d_{ij} + v_{ik} \quad \text{Costo unitario total} \quad (9)$$

Variable de decisión

$$x_{ijk} \geq 0 \quad \text{Toneladas enviadas desde } j \text{ a } i \text{ del residuo } k \quad (10)$$

Función objetivo

$$\text{mín } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad \text{Minimiza el costo total de transporte y valorización} \quad (11)$$

Restricciones

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq C_i \quad \text{Capacidad máxima de cada predio} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} = G_{jk} \quad \text{Asignación total de la generación} \quad (13)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad \text{Condición de no negatividad} \quad (14)$$

8.7 Diversificación de valorizadores, riesgo operacional y habilitadores de venta

La eficiencia económica del sistema no depende únicamente del algoritmo de asignación, sino también de la robustez de la red de valorización disponible. Los antecedentes del proyecto muestran que la diversificación de valorizadores constituye una línea explícita de trabajo, tanto para reducir dependencia como para mejorar condiciones económicas y de cumplimiento (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). En este punto, la teoría del problema debe incorporar el riesgo operacional: alta concentración en pocos receptores, baja capacidad alternativa o ausencia de actores habilitados para venta incrementan exposición a sobre costos, discontinuidades, contingencias regulatorias y alta dependencia a valorizadores actuales.

El proyecto también documenta una evolución desde un esquema de disposición hacia uno de valorización y posterior búsqueda de eficiencias OPEX, incluyendo nuevos valorizadores autorizados, diversificación de metodologías y reducciones de costos anuales (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2025](#)). Esto permite sostener que la diversificación no es solo una variable comercial, sino una capacidad organizacional que incide en resiliencia del sistema. Desde el punto de vista teórico, una red más diversificada amplía el espacio de solución del modelo y mejora la posibilidad de capturar valor económico desde la venta de subproductos (ex-residuos)

según se muestra en la figura 9.

No obstante, el material interno identifica una brecha crítica adicional: la inexistencia actual de habilitadores suficientes para la etapa final de venta de subproductos (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Esto significa que incluso si el producto cumple técnicamente y el sistema logístico es eficiente, la captura efectiva de valor puede quedar truncada por faltas de actor comercial, trazabilidad, etiquetado aprobado, expediente técnico o ruta contractual. En consecuencia, la comercialización debe integrarse al marco teórico como etapa final de una cadena de habilitación, y no como consecuencia automática del registro.

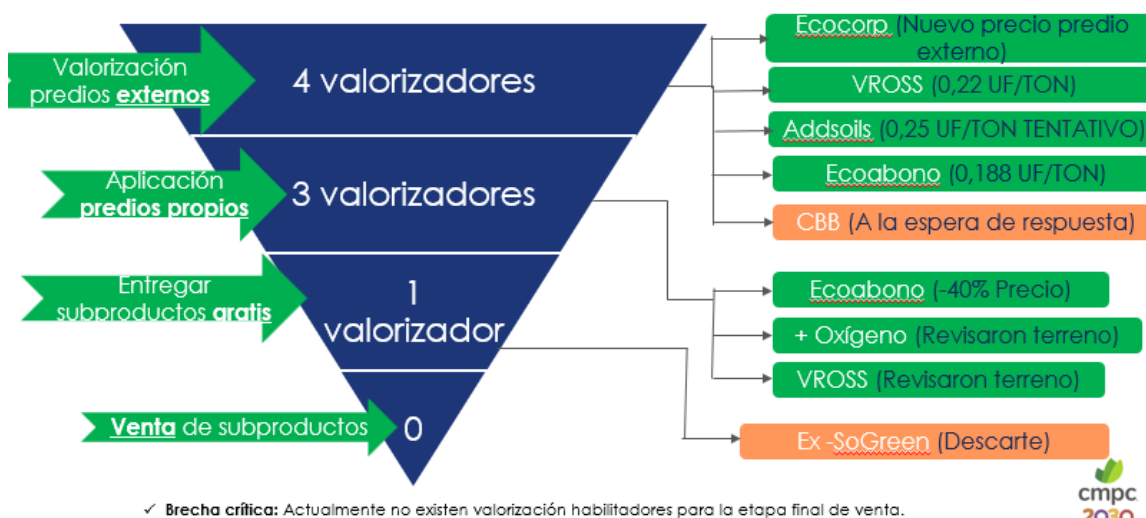


Figura 9: Escenarios de diversificación de valorizadores y cierre de brechas para venta. Fuente: Elaboración propia.

8.8 Síntesis del marco teórico y relación con el estudio

En conjunto, el estudio se sustenta en seis ejes: i) economía circular y valorización de materiales, ii) relevancia económica del sector forestal y del negocio de la celulosa, iii) distinción conceptual entre residuo, subproducto y producto agrícola, iv) exigencias regulatorias impuestas por la Ley N° 21.349 y su reglamento, v) criterio de costo total mínimo como base para la decisión

logística, y vi) diversificación de valorizadores y habilitación comercial como condiciones para una valorización escalable. Esta articulación permite alinear el marco teórico con el problema de estudio y con los objetivos planteados, dando sustento a una memoria aplicada de base técnico-regulatoria y económico-operacional.

En consecuencia, la metodología del estudio deberá traducir este marco conceptual en un procedimiento replicable capaz de evaluar requisitos regulatorios, modelar configuraciones logísticas, comparar escenarios y proponer habilitadores para la eventual comercialización de subproductos valorizados.

9 Metodología

La presente investigación se aborda como una memoria de carácter aplicado, orientada a resolver un problema real de empresa asociado a la valorización de subproductos de celulosa y madera en CMPC. En coherencia con el problema planteado y con los objetivos definidos, la metodología se estructura como un diseño predominantemente descriptivo y analítico, sustentado en revisión técnico-documental, análisis de información operacional y evaluación comparada de escenarios factibles, más que en un diseño experimental. Bajo esta lógica, el capítulo metodológico no expone resultados ni validaciones finales, sino la arquitectura general mediante la cual se organiza el estudio para analizar la viabilidad regulatoria, la eficiencia económica y la habilitación comercial de los subproductos valorizados.

Las principales fuentes de información corresponden a los antecedentes internos de la compañía, las matrices operacionales anexas de generación, distancias, costos de valorización y restricciones de capacidad, y al código de optimización implementado en R. A ello se suma la revisión de fuentes regulatorias y técnicas ya integradas al estudio, así como de antecedentes complementarios de carácter oficial. En términos analíticos, las unidades de análisis no correspondieron a individuos o muestras estadísticas tradicionales, sino a objetos técnico-operacionales, es decir familias de subproductos, plantas generadoras, valorizadores y predios receptores, requisitos regulatorios, configuraciones logísticas y actores potenciales para la habilitación comercial.

La metodología se organizó en tres ejes complementarios: i) un eje técnico-regulatorio, destinado a examinar la ruta de habilitación normativa de los subproductos, ii) un eje económico, orientado a caracterizar la situación actual de distribución y a evaluar configuraciones operacionales bajo criterio de costo total, y iii) un eje estratégico-comercial, enfocado en construir un modelo

preliminar de negocio y una primera aproximación de mercado para la eventual comercialización. Estos ejes no se desarrollaron de manera aislada, sino como componentes interdependientes de un mismo problema de decisión: la factibilidad regulatoria condiciona las alternativas operacionales disponibles, mientras que la eficiencia económica y la viabilidad comercial delimitan cuáles de esas alternativas podrían transformarse en una solución escalable para la empresa.

9.1 Eje técnico-regulatorio

En el primer eje se desarrolló una revisión técnico-documental y normativa orientada a determinar la viabilidad general de registrar subproductos de celulosa y madera como enmiendas o fertilizantes. Para ello, se examinaron la Ley N° 21.349, el D.S. N° 61/2023 y los antecedentes técnicos del proyecto, con énfasis en la clasificación sectorial del material, la inscripción en el Registro Único Nacional, la declaración del producto, la documentación técnica exigible, el etiquetado, los parámetros de calidad y composición, la ausencia de contaminantes peligrosos y la evidencia de eficacia agronómica (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#); CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)). Metodológicamente, este eje no busca solo describir la norma, sino traducirla en una secuencia operativa de requisitos, restricciones, brechas y habilitadores para la eventual comercialización.

Este eje incorpora, además, el análisis de los antecedentes institucionales levantados por la empresa respecto de la interacción con organismos públicos. En esa línea, el SAG fue considerado como el actor sectorial primario para efectos de clasificación, registro, inspección y fiscalización del producto agrícola, mientras que la SEREMI de Salud fue analizada desde una lógica de resguardo sanitario y de intervención frente a riesgos concretos derivados del uso en suelo. De manera complementaria, se toma en cuenta la visión regulatoria del Servicio de Evaluación Ambiental, no

para ejecutar una evaluación ambiental formal dentro de esta memoria, sino para revisar si algunas alternativas de implementación podrían requerir examinar tipologías de ingreso al SEIA, descripción de partes, obras y acciones, emisiones, residuos, uso de recursos naturales y permisos sectoriales asociados (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026; Servicio de Evaluación Ambiental, 2026). El resultado esperado de este eje es la construcción de una ruta regulatoria general, junto con una matriz de requisitos y brechas críticas para habilitar la transición desde la gestión como residuo hacia la comercialización como subproducto agrícola.

9.2 Eje económico

En el segundo eje se estructura la evaluación económica a partir de la construcción y lectura del caso base actual de distribución de subproductos. Para ello, se integraron los antecedentes de generación por planta, los destinos de valorización vigentes, las restricciones de capacidad por predio, las distancias logísticas y los costos de valorización asociados a cada combinación factible. Esta información fue organizada mediante matrices de entrada en los anexos 21-26 desarrollado en R, cuya función consiste en asignar toneladas desde plantas generadoras a predios receptores minimizando el costo total de transporte y valorización (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Desde una perspectiva metodológica, la lectura del caso base permite comprender la lógica operativa existente antes de cualquier propuesta de mejora, identificando qué variables estructuran la distribución actual y cuáles debían ser consideradas como restricciones del problema.

Sobre esa base, el eje económico contempló la formulación y comparación general de escenarios alternativos de valorización, tales como la diversificación de valorizadores externos, la incorporación de predios propios, la entrega de subproductos a costo cero de valorizador y la venta

de subproductos. La comparación entre situación actual y escenarios potenciales se diseñó bajo una lógica de eficiencia económica integral, es decir, considerando de manera conjunta el componente logístico y el componente de valorización, en lugar de evaluar aisladamente la tarifa de entrada o la distancia recorrida. Metodológicamente, ello permite analizar el problema como uno de costo total mínimo sujeto a restricciones reales del negocio, evitando decisiones parciales y generando como salida esperada una base objetiva para comparar configuraciones operacionales.

9.3 Eje estratégico-comercial

El tercer eje metodológico se orienta a evaluar, de manera preliminar, la viabilidad estratégico-comercial de comercializar subproductos valorizados como enmiendas o fertilizantes. A diferencia de una validación comercial definitiva, este eje se plantea como una aproximación aplicada para ordenar modelos de negocio plausibles, descartar alternativas poco consistentes con las capacidades actuales de CMPC y estimar rangos preliminares de precio para familias de subproductos con mayor potencial técnico-comercial.

En una primera etapa, se realizaron entrevistas exploratorias con representantes de las áreas de Innovación y Ventures de CMPC, con el propósito de contrastar los modelos de negocio inicialmente considerados frente a las capacidades, restricciones y prioridades estratégicas de la compañía. Este levantamiento permitió revisar alternativas como venta directa B2B, venta mediante distribuidores, socio técnico-comercial, maquila o acondicionamiento, consignación y modelos híbridos por familia de subproducto. La finalidad de estas entrevistas no fue cuantificar estadísticamente la preferencia por cada modelo, sino obtener juicio experto interno para filtrar opciones y orientar el análisis hacia configuraciones comercialmente realistas.

A partir de este levantamiento, se descartaron como modelos principales la venta directa B2B y la venta en consignación. La venta directa B2B fue considerada poco consistente con el estado actual del proyecto, debido a que requeriría crear una capacidad comercial propia, estructura de soporte técnico, gestión de clientes, postventa y eventualmente inversiones asociadas a una nueva línea de negocio. Por su parte, la consignación fue descartada como ruta principal porque mantiene inventario y riesgo comercial en CMPC, sin asegurar venta efectiva ni flujo inmediato de ingresos. En ambos casos, el criterio interno fue que la compañía no se encuentra actualmente invirtiendo CAPEX ni desarrollando una nueva capacidad comercial dedicada para la venta de subproductos.

En una segunda etapa, se desarrolló un cálculo preliminar de precios para subproductos de la familia de calcáreos. Este cálculo busca estimar un precio referencial de venta para subproductos comparables funcionalmente con enmiendas calcáreas disponibles en el mercado, considerando variables como valor neutralizante, humedad, equivalencia con carbonato de calcio, precio de referencia comercial, toneladas valorizables, costo evitado e ingreso potencial por venta (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

9.4 Integración de ejes y salida metodológica del estudio

De este modo, la salida del eje estratégico-comercial corresponde a una priorización cualitativa y económica. Primero, las entrevistas internas permiten descartar modelos incompatibles con la estrategia y capacidades actuales de CMPC, segundo, el cálculo de homologación y precios permite identificar qué familias de subproductos presentan mayor potencial de captura de valor. En consecuencia, el eje concluye con una recomendación de rutas comerciales más realistas, enfoca-

das principalmente en modelos con participación de terceros, baja exigencia comercial directa para CMPC y posibilidad de capturar valor económico sin crear una nueva estructura comercial propia.

10 Análisis y resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos al aplicar la metodología al caso CMPC, organizándolos según los tres ejes definidos previamente: técnico-regulatorio, económico y estratégico-comercial. La exposición se formula desde una lógica aplicada, esto es, orientada a aclarar en qué medida la valorización de subproductos de celulosa y madera puede avanzar desde una gestión eficiente de residuos hacia un plan regulatorio, operacional y comercial capaz de sostener su inscripción, distribución y eventual venta como enmiendas o fertilizantes. En consecuencia, el análisis no se limita a describir antecedentes, sino que interpreta hallazgos y extrae implicancias concretas para la toma de decisiones dentro del caso estudiado.

10.1 Resultados del eje técnico-regulatorio

El análisis técnico-regulatorio permite establecer que el caso CMPC dispone de una ruta de habilitación regulatoria potencialmente viable para transformar parte de sus subproductos en enmiendas o fertilizantes, pero dicha viabilidad se encuentra condicionada a un conjunto exigente de requisitos sectoriales y documentales. En términos aplicados, el principal resultado de este eje es que la valorización agrícola no depende únicamente de demostrar que existe un material aprovechable, sino de acreditar que dicho material puede ser clasificado, caracterizado, documentado e inscrito bajo el marco de la Ley N° 21.349 y su reglamento. Esto implica un desplazamiento relevante del problema: el desafío deja de situarse exclusivamente en la disposición de residuos y pasa a centrarse en la habilitación de productos agrícolas regulados sectorialmente (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, [2021](#), [2023](#); CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

10.1.1. Resultados SAG

El principal resultado del análisis ante el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) es que la valorización agrícola de los subproductos de CMPC cuenta con una ruta sectorial potencialmente viable, pero condicionada al cumplimiento de requisitos técnicos, documentales y de registro. Bajo el marco de la Ley N° 21.349 y del D.S. N° 61/2023, la transición desde residuo o subproducto valorizable hacia producto agrícola regulado no ocurre por la sola existencia del material, sino por su inscripción, clasificación, trazabilidad y fiscalización bajo la autoridad competente (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021, 2023; CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En consecuencia, el SAG constituye la sede regulatoria central para ordenar la eventual transformación de estos flujos en enmiendas o fertilizantes formalmente reconocidos, esto se observa de forma más clara en la figura 10.

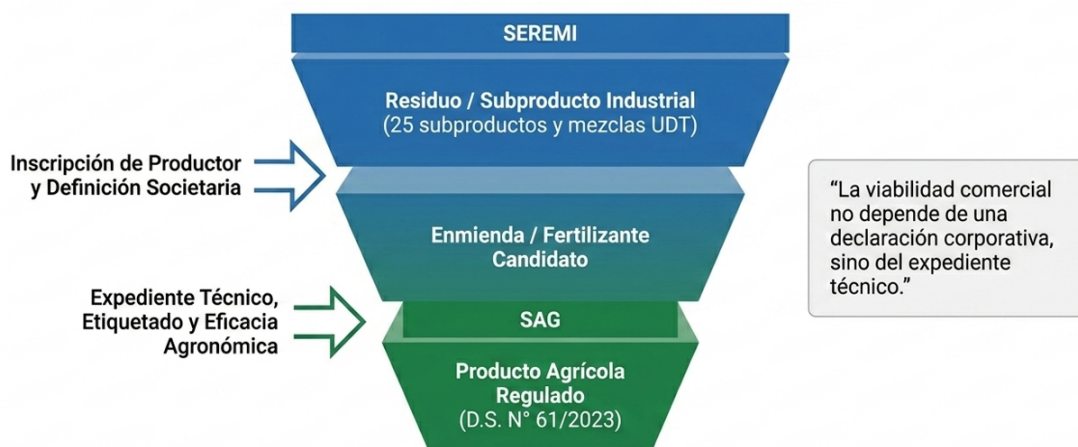


Figura 10: Transición regulatoria desde subproducto valorizable hacia producto agrícola regulado. Fuente: Elaboración propia.

La investigación identifica como requisitos críticos la inscripción del productor o de las plantas productoras, la declaración del producto, la elaboración de documentación técnica, la pro-

puesta de etiquetado o folleto, la acreditación de parámetros de calidad y composición, la ausencia de contaminantes peligrosos, la trazabilidad del material y la evidencia de eficacia agronómica según se observa en la figura 11 (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021, 2023; CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Este hallazgo es relevante porque desplaza el foco desde la gestión operacional del residuo hacia la construcción de expedientes técnicamente consistentes. Para CMPC, la inscripción del productor aparece como un hito inicial necesario, pero no suficiente, ya que cada producto o mezcla debe contar posteriormente con respaldo técnico y documental propio.



Figura 11: Requisitos críticos mínimos para el registro sectorial de subproductos como enmiendas o fertilizantes. Fuente: Elaboración propia.

Los antecedentes técnicos disponibles fortalecen la viabilidad preliminar del proceso. En particular, los análisis desarrollados por UDT de la Universidad de Concepción, permiten respaldar parte del portafolio de subproductos y mezclas, considerando macronutrientes, micronutrientes, contaminantes y parámetros de calidad asociados al marco regulatorio vigente. Las tablas 5 y 6 sintetizan los subproductos y mezclas con potencial de registro SAG (CMPC. Subgerencia Residuos,

Emisiones y Obligaciones, 2026). Sin embargo, esta evidencia no debe interpretarse como habilitación comercial completa: constituye soporte técnico preliminar para avanzar en la ruta de registro, pero todavía requiere formalización documental, presentación administrativa y coordinación con las demás sedes regulatorias.

Tabla 5: Subproductos aprobados por UDT para registro SAG.

Categoría / Planta	Laja	Santa Fe	Pacífico	Plywood	Mulchén	Bucalemu	Nacimiento
Enmienda orgánica		✓ Rechazos de clasificación (nudos y shives contaminados con arena)		✓ Lodos de Cancha de trozo ✓ Chapa con adhesivo sin fraguar ✓ Chapa con adhesivo fraguada	✓ Cenizas finas Calderas	✓ Cenizas Caldera Cogeneradora ✓ Lodos de Cancha	✓ Corteza Grado 3
Enmienda inorgánica/caliza	✓ Dregs y grits ✓ Polvos de Carbonato PPT Horno de Cal	✓ Cal apagada ✓ Polvos de Carbonato ✓ Lodos de Cal ✓ Dregs y grits ✓ Cenizas finas (Caldera Biomasa)	✓ Cal apagada ✓ Lodos de cal ✓ Dregs y grits		✓ Cenizas finas Calderas ✓ Cenizas Gruesas Calderas	✓ Cenizas Caldera Cogeneradora ✓ Escoria Caldera Cogeneradora	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Mezclas aprobadas por UDT para registro SAG.

Categoría / Planta	Laja	Santa Fe	Pacífico
Fertilizante orgánico		✓ 30% Cenizas gruesas + 70% Dregs y grits ✓ 60% Cenizas gruesas + 40% Dregs y grits ✓ 25% Cenizas finas + 75% Dregs y grits	
Fertilizante inorgánico		✓ 30% Cenizas gruesas + 70% Dregs y grits ✓ 60% Cenizas gruesas + 40% Dregs y grits ✓ 25% Cenizas finas + 75% Dregs y grits	
Fertilizante organomineral		✓ 30% Cenizas gruesas + 70% Dregs y grits ✓ 60% Cenizas gruesas + 40% Dregs y grits ✓ 25% Cenizas finas + 75% Dregs y grits	
Enmienda orgánica		✓ 30% Lodos de Efluentes + 70% Dregs y grits ✓ 30% Cenizas gruesas + 70% Dregs y grits ✓ 25% Cenizas finas + 75% Dregs y grits ✓ 30% Lodos de efluentes + 70% Dregs y grits	✓ 40% Lodos de Efluentes + 60% Dregs y grits
Enmienda inorgánica/caliza	✓ 50% Cenizas finas + 50% Polvos PPT (HC) ✓ 50% Cenizas gruesas + 50% Polvos PPT	✓ 60% Cenizas gruesas + 40% Dregs y grits ✓ 30% Cenizas gruesas + 70% Dregs y grits ✓ 60% Cenizas gruesas + 40% Dregs y grits ✓ 25% Cenizas finas + 75% Dregs y grits ✓ 30% Lodos de efluentes + 70% Dregs y grits	

Fuente: Elaboración propia.

La ruta ante el SAG no corresponde a un acto único de aprobación, sino a una secuencia de habilitación del productor, los establecimientos y los productos o mezclas específicos. En términos aplicados, esta secuencia combina hitos ya avanzados, gestiones pendientes y una etapa futura de adecuación al Registro Único Nacional del SAG, cuya entrada en vigencia operativa se proyecta para agosto de 2026 según los antecedentes del proyecto. La Tabla 7 y la figura 12 resumen los principales hitos, su estado actual, el resultado esperado y el riesgo asociado a su no completitud.

Tabla 7: Síntesis de la ruta de habilitación ante el SAG para subproductos valorizados de CMPC.

Hito	Estado actual	Resultado esperado	Riesgo si no se completa
Consolidación de respaldo técnico-productivo	Avanzado parcialmente: existen análisis fisicoquímicos y antecedentes UDT para subproductos y mezclas.	Contar con una base técnica suficiente para justificar la clasificación potencial como enmienda o fertilizante.	El portafolio no puede sostener técnicamente su presentación ante la autoridad sectorial.
Definición societaria, giro y rol del productor	Pendiente o en revisión interna, especialmente para precisar qué sociedad actuará como productor y comercializador.	Alinear la habilitación regulatoria con la estructura jurídica y tributaria de CMPC.	Riesgo de ingresar antecedentes sin coherencia societaria o sin suficiencia de giro para comercialización.
Presentación de formulario de inicio de actividades y ubicación de establecimientos	Pendiente: formularios por completar, firmar, enviar y esperar respuesta.	Identificar formalmente los establecimientos que operarán con fertilizantes, bioestimulantes o enmiendas.	Retraso en la inscripción sectorial y falta de reconocimiento administrativo de los establecimientos productivos.
Inscripción regional como productor de enmiendas	Pendiente, con posibilidad de avanzar ante oficinas regionales del SAG según antecedentes internos.	Habilitar la base institucional para operar como productor bajo control sectorial.	La empresa queda sin punto de partida formal para estructurar expedientes de productos o mezclas.
Expediente técnico por producto o mezcla	Pendiente de estructuración final para cada producto o mezcla candidata.	Integrar composición, calidad, trazabilidad, etiquetado, ausencia de contaminantes y eficacia agronómica.	La inscripción del productor no se traduce en autorización efectiva de productos específicos.
Adecuación al Registro Único Nacional SAG	Futuro: etapa asociada a la entrada en vigencia operativa del régimen en agosto de 2026.	Migrar o adecuar antecedentes bajo la nueva lógica de registro, fiscalización y control sectorial.	Riesgo de incumplimiento o reproceso documental al momento de operar plenamente el nuevo régimen.

Fuente: Elaboración propia con base en antecedentes internos del proyecto y marco regulatorio aplicable (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021, 2023; CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

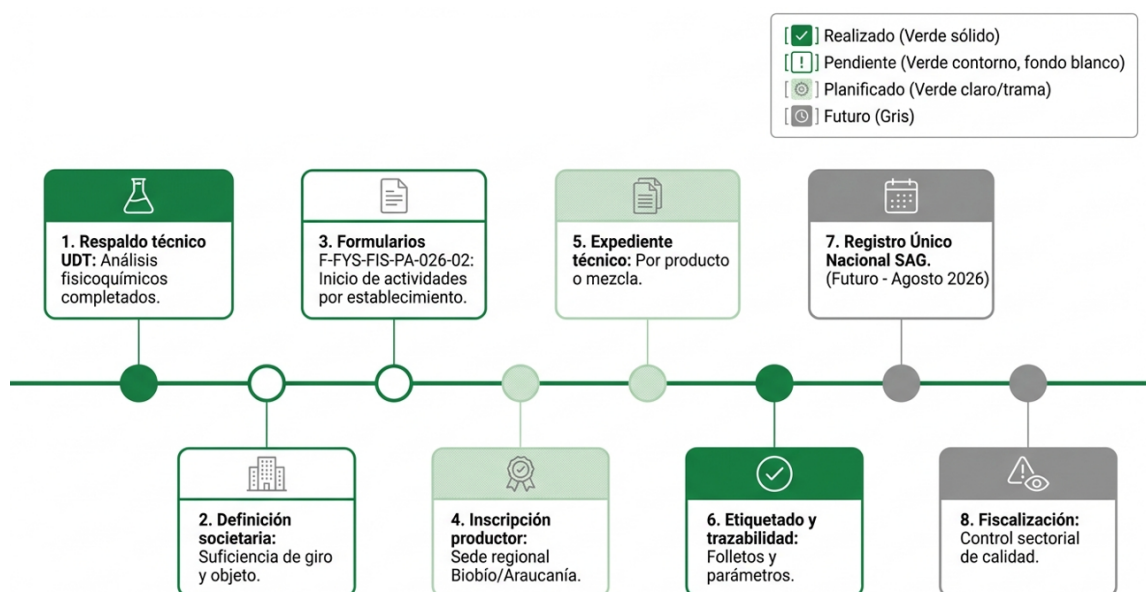


Figura 12: Ruta de habilitación sectorial ante el SAG para subproductos valorizados de CMPC. Fuente: Elaboración propia.

10.1.2. Resultados SEREMI

El resultado principal respecto de la SEREMI de Salud es que su rol no replica la función sectorial del SAG ni constituye una sede de registro del producto agrícola. Una vez que el material avance hacia su clasificación como enmienda o fertilizante inscrito, la SEREMI mantiene un rol sanitario y operacional asociado al resguardo de condiciones de manejo, almacenamiento, transporte, aplicación y prevención de contingencias, actos que se resumen en la tabla 8. En este sentido, los antecedentes levantados indican que la SEREMI no autoriza previamente la aplicación agrícola de enmiendas inscritas, pero puede intervenir cuando existan riesgos sanitarios concretos, tales como olores molestos, afectación de aguas superficiales o subterráneas, riesgos para poblaciones cercanas o condiciones inseguras de operación (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

Tabla 8: Matriz de competencias sanitarias y riesgos operacionales asociados al uso de subproductos valorizados

Riesgo Sanitario	Control Requerido	Autoridad Principal	Estado de Definición
Olores molestos	Medidas de mitigación en aplicación	SEREMI	Planificado (Caso a caso)
Afectación de aguas	Resguardo superficial/subterráneo	SEREMI / SEA	Planificado
Población cercana	Distanciamiento y prevención	SEREMI	Planificado
Almacenamiento	Condiciones de acopio seguro	SEREMI	Planificado
Salud ocupacional	Seguridad de trabajadores	SEREMI	Planificado

Fuente: Elaboración propia.

La reunión sostenida con la SEREMI de Salud del Biobío permitió observar una conformidad general con el proceso regulatorio impulsado ante el SAG y con la lógica de transición desde residuo hacia producto agrícola regulado. No obstante, este resultado no debe interpretarse como una autorización sanitaria cerrada ni como una regla extensible automáticamente a todas las plantas, regiones o corrientes materiales. Desde una perspectiva aplicada, el hallazgo relevante es que la coordinación sanitaria debe desarrollarse caso a caso, especialmente cuando existan antecedentes regulatorios previos, diferencias entre plantas pulp y maderas, o condiciones operacionales que puedan generar riesgos sanitarios específicos.

La ruta SEREMI debe entenderse como una coordinación preventiva complementaria a la ruta SAG. Los pasos pendientes se orientan a formalizar el cambio de escenario regulatorio, acordar criterios de manejo sanitario, evitar extrapolaciones automáticas entre regiones o materiales, y

preparar una reunión tripartita SEREMI–SAG–CMPC una vez que avance la inscripción como productor de enmiendas. Esta coordinación resulta necesaria para reducir incertidumbre operacional, pero no reemplaza la definición ambiental pendiente ante el SEA. La Tabla 9 y figura 13 resumen los principales hitos identificados para esta ruta.

Tabla 9: Síntesis de la ruta de coordinación sanitaria ante SEREMI de Salud.

Hito	Estado actual	Resultado esperado	Riesgo si no se completa
Presentación del nuevo escenario regulatorio agrícola	Avanzado parcialmente mediante reunión con SEREMI de Salud del Biobío.	Explicar la transición desde residuo hacia enmienda o fertilizante inscrito bajo competencia sectorial SAG.	Persistencia de interpretaciones sanitarias antiguas o no alineadas con la nueva clasificación agrícola.
Confirmación del alcance sanitario de la SEREMI	Conformidad general reportada, pero no equivalente a autorización cerrada.	Distintuir entre registro sectorial SAG y resguardo sanitario-operacional SEREMI.	Confundir coordinación sanitaria con habilitación integral del producto o de la comercialización.
Reunión tripartita SEREMI–SAG–CMPC	Planificada; aún no realizada según antecedentes del proyecto.	Ordenar competencias entre autoridad agrícola, autoridad sanitaria y empresa.	Solapamiento de criterios, incertidumbre institucional o falta de validación coordinada.
Definición de condiciones operacionales bajo control sanitario	Pendiente.	Acordar criterios sobre almacenamiento, transporte, aplicación, control de olores, aguas, seguridad y medidas de mitigación.	Riesgos de contingencias sanitarias o cuestionamientos operacionales posteriores.
Revisión caso a caso por planta, región y corriente material	Pendiente.	Evitar extrapolar criterios favorables de una región, planta o subproducto a otros contextos no evaluados.	Aplicación de criterios no respaldados en plantas o materiales con antecedentes regulatorios diferentes.
Coordinación con la definición ambiental ante SEA	Pendiente; no resuelta en esta sección.	Mantener separada la dimensión sanitaria de la evaluación o pertinencia ambiental.	Presentar la vía SEREMI como solución autosuficiente, omitiendo posibles obligaciones ambientales.

Fuente: Elaboración propia con base en antecedentes internos del proyecto (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).



Figura 13: Ruta preventiva de coordinación sanitaria ante SEREMI de Salud. Fuente: Elaboración propia.

10.2 Resultados del eje económico

El análisis económico permite distinguir dos niveles de lectura que son necesarios aclarar. Por una parte, los antecedentes corporativos de valorización reportan una escala ampliada del contrato pulp y maderas, con 57.000 toneladas mensuales a valorizar y una evolución contractual orientada a ampliar actores autorizados y reducir costos (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2025). Por otra parte, el caso base específico modelado para este proyecto se construyó sobre una base de 21.909, correspondiente al universo operativo efectivamente utilizado en la optimización del problema de distribución (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En consecuencia, ambos niveles son complementarios, pero responden a escalas distintas de análisis: el primero muestra la trayectoria del contrato y el segundo constituye la base cuantitativa del modelo aplicado en este proyecto.

10.2.1. Caso base de costos

Dentro del caso base modelado, el principal resultado es que la situación actual de distribución valorizada moviliza 21.909 ton/mes con un costo total de 9.308 UF/mes. De ese total, 5.869 UF/mes corresponden al componente de valorización y 3.439 UF/mes al transporte, equivalente a una composición aproximada de 63 % y 37 %, datos resumidos en la figura 14, respectivamente (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Esta estructura permite una primera interpretación relevante: la principal oportunidad económica del sistema no se encuentra solo en reducir kilómetros recorridos, sino especialmente en intervenir la estructura de valorizadores, sus tarifas de entrada y la configuración de la red de destino.

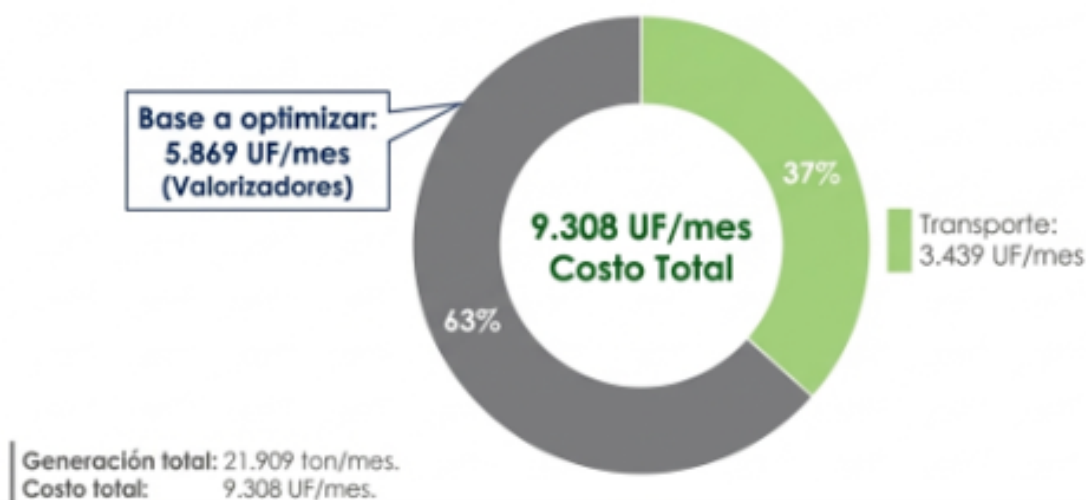


Figura 14: Desglose de costos totales del caso base. Fuente: Elaboración propia

La lectura del flujo analizado confirma además una fuerte concentración material que condiciona el comportamiento económico del sistema. Las familias de subproductos se distribuyen, según el material del proyecto, en dregs y grits con 12.000 ton/mes (55 %), cenizas con 5.000 ton/mes (23 %), materiales calcáreos con 4.500 ton/mes (20 %) y orgánicos con 400 ton/mes (2 %)

(CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Dado que los dregs y grits constituyen más de la mitad del volumen evaluado, los cambios en su tratamiento, tarifa y destino tienen un efecto desproporcionado sobre el costo total del sistema. Este resultado permite explicar por qué la optimización y la búsqueda de nuevos valorizadores se concentran principalmente en esa familia material.

El eje económico también confirmó la pertinencia del modelo de costo total mínimo como criterio de decisión. El algoritmo integra matrices de distancias, costos de valorización, capacidades autorizadas y generación por planta según los anexos 21-26, obligando a asignar toda la generación disponible bajo restricciones de capacidad y compatibilidad (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). El resultado analítico de este enfoque es que la eficiencia no puede deducirse desde una sola variable. Una tarifa de valorización más baja puede perder atractivo frente a distancias mayores o restricciones de recepción, mientras que un destino cercano puede dejar de ser conveniente si presenta costos unitarios altos o saturación operativa. En el caso CMPC, ello justifica que la decisión económica sea tratada como un problema de red y no como una simple comparación de precios unitarios.

10.2.2. Caso de tres valorizadores externos

En la comparación de escenarios de la figura 15, el primer hallazgo significativo corresponde al escenario de predios externos con tres valorizadores. Bajo esa configuración, el material del proyecto reporta un nuevo costo de valorizadores de 4.228 UF/mes, equivalente a una reducción de 1.641 UF/mes respecto del costo actual de valorización, lo que representa un ahorro del 28 % y aproximadamente 875.196 USD anuales (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligacio-

nes, 2026). El interés de este escenario radica en que mejora la eficiencia sin eliminar del todo la diversificación de actores, por lo que aparece como una alternativa de transición económicamente atractiva y operacionalmente menos concentrada que otras opciones más agresivas.



Figura 15: Resumen de caso de tres valorizadores (predios externos). Fuente: Elaboración propia.

10.2.3. Caso con dos valorizadores externos

Un segundo resultado, de acuerdo a la figura 16, es que la compresión adicional de la red hacia dos valorizadores profundiza el ahorro económico, aunque a costa de mayor dependencia operacional. En ese escenario, el costo de valorizadores se reduce a 4.015 UF/mes, con una disminución de 1.854 UF/mes frente al costo actual, equivalente a un ahorro del 32 % y aproximadamente 988.800 USD anuales (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Desde un punto de vista de decisión, la red más concentrada luce económicamente superior al esquema externo de tres actores, pero esa mejora se obtiene reduciendo redundancia y margen de maniobra ante contingencias. Por ello, el mejor resultado puramente económico no coincide necesariamente con la configuración más robusta desde la perspectiva del riesgo operacional.

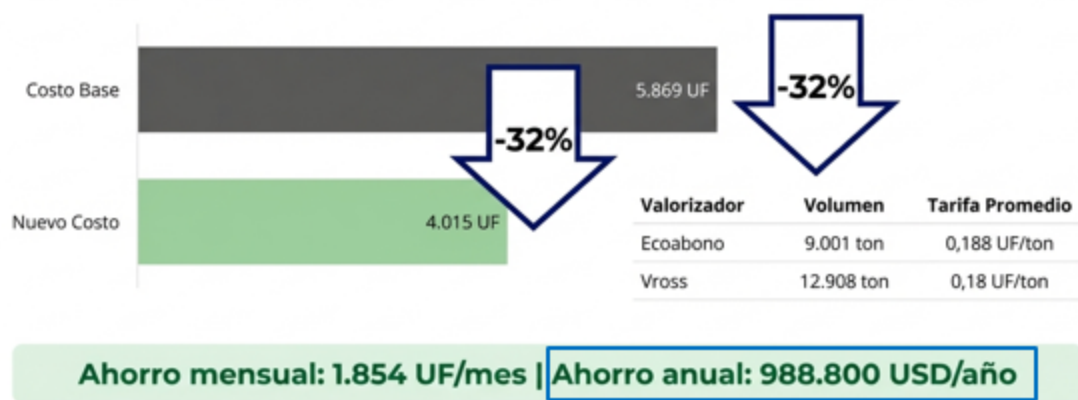


Figura 16: Resumen de caso de dos valorizadores (predios externos). Fuente: Elaboración propia.

10.2.4. Caso de aplicación en predios propios

El escenario de predios propios presenta uno de los resultados más favorables dentro de las alternativas operacionales plausibles reportadas en la figura 17. La derivación de toda la generación analizada a Ecoabono, a un costo de 0,15 UF/ton, arroja un nuevo costo de valorizadores de 3.286 UF/mes y una reducción de 2.583 UF/mes, equivalente a un ahorro del 44 % y del orden de 1.377.600 USD anuales (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Adicionalmente, el material complementario señala que la aplicación en predios propios podría capturar ahorros adicionales por menor costo de aplicación y por transporte evitado (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En términos aplicados, este resultado convierte a los predios propios en una alternativa particularmente atractiva, ya que combina menor costo unitario con mayor capacidad potencial de control sobre la operación.

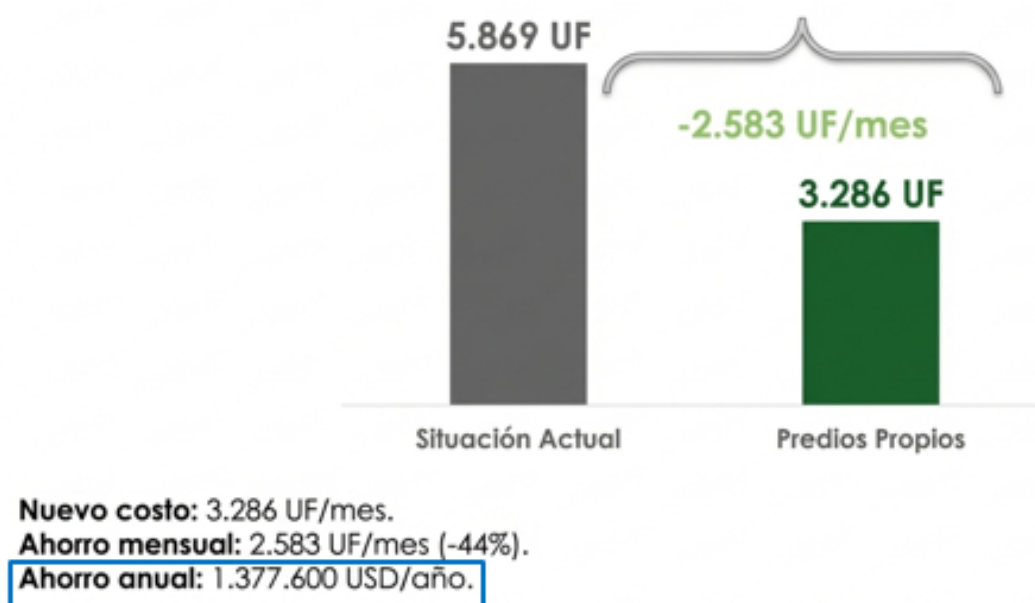


Figura 17: Resumen de caso de aplicación en predios propios. Fuente: Elaboración propia.

10.2.5. Casos de aplicación en predios adyacentes a las plantas

De manera complementaria al escenario general de predios propios, se evaluaron tres casos focalizados de aplicación en predios adyacentes a las plantas Bucalemu, Santa Fe y Laja. Estos escenarios consideran una distancia operacional de 1 km entre planta y predio receptor, junto con una reducción de 44 % en el costo de valorización cobrado por Ecoabono. En términos económicos, esta configuración permite evaluar el efecto combinado de dos palancas: menor tarifa de valorización y reducción significativa del componente transporte, especialmente relevante en un sistema donde la distancia puede alterar la conveniencia de una alternativa aun cuando su tarifa base sea atractiva (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

El caso Santa Fe corresponde al escenario de mayor impacto económico dentro de los predios adyacentes evaluados. Para un volumen de 10.708 ton/mes, el costo actual asciende a 4.668,94 UF/mes, compuesto por 2.965,25 UF/mes de valorización y 1.703,69 UF/mes de transporte. Bajo

el escenario propuesto, el costo total disminuye a 1.706,16 UF/mes, con 1.660,54 UF/mes asociados a valorización y 45,62 UF/mes a transporte. Esta variación genera un ahorro mensual de 2.962,78 UF/mes, equivalente a aproximadamente \$1.580.150 USD/año y una eficiencia cercana al 63 % (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Este resultado confirma que, cuando existe disponibilidad de predios cercanos, la reducción de distancia puede transformar significativamente la estructura de costo del sistema, lo anterior se puede notar en la figura 18.

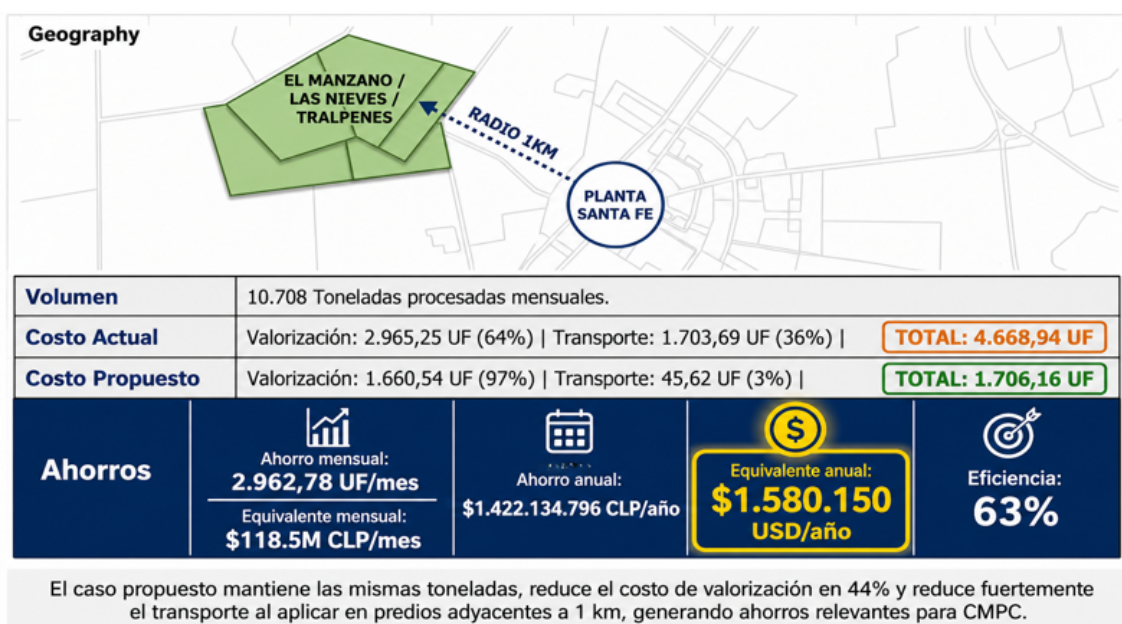


Figura 18: Resumen de caso de aplicación en predio adyacente a planta Santa Fe. Fuente: Elaboración propia.

En el caso Laja, la evaluación considera 2.317 ton/mes y muestra una reducción del costo total desde 529,81 UF/mes a 241,21 UF/mes. El ahorro resultante alcanza 288,60 UF/mes, equivalente a aproximadamente \$153.921 USD/año y a una eficiencia del 54 %. Si bien el volumen es menor que en Santa Fe, el resultado es relevante porque combina reducción tarifaria y transporte mínimo, demostrando que los predios adyacentes pueden generar ahorros relevantes incluso en escenarios de menor escala relativa (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones,

2026), lo anterior de puede apreciar en la figura 19.

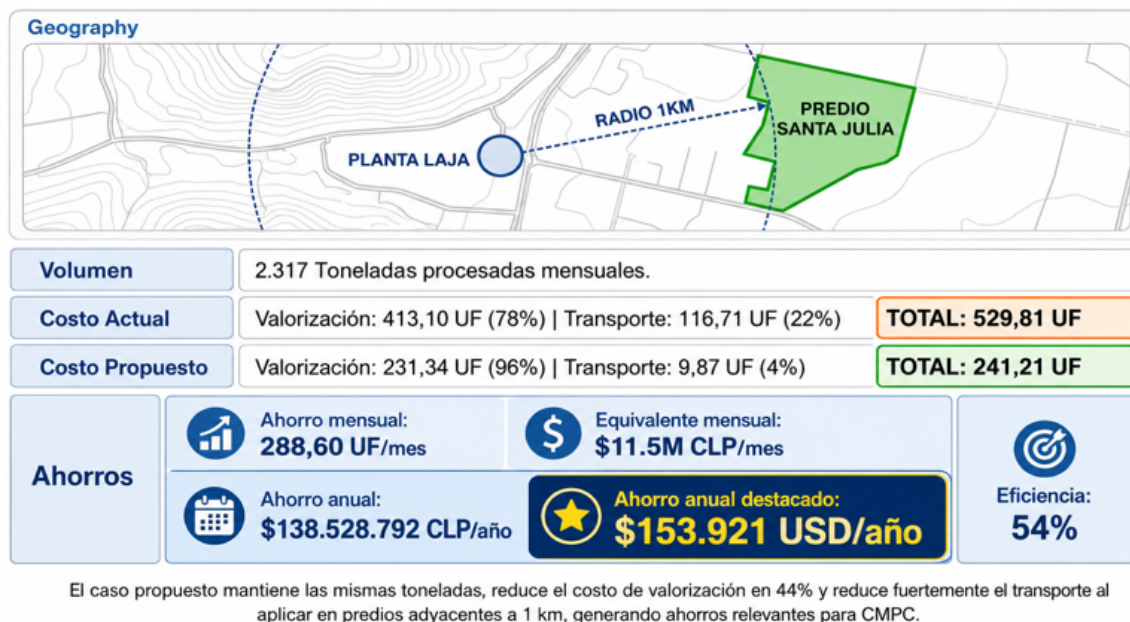


Figura 19: Resumen de caso de aplicación en predio adyacente a planta Laja. Fuente: Elaboración propia.

El caso Bucalemu representa un escenario de menor escala, con 663 ton/mes procesadas, pero igualmente favorable desde el punto de vista económico. El costo actual se reduce desde 213,76 UF/mes a 95,64 UF/mes, generando un ahorro mensual de 118,12 UF/mes, equivalente a aproximadamente \$62.998 USD/año y una eficiencia estimada de 55 %. Este resultado muestra que la alternativa de predios adyacentes no solo es relevante para plantas de gran volumen, sino también para casos donde la cercanía permite capturar eficiencias logísticas y reducir la exposición al costo de transporte (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026), lo anteriormente descrito se nota en la figura 20.



Figura 20: Resumen de caso de aplicación en predio adyacente a planta Bucalemu. Fuente: Elaboración propia.

10.2.6. Caso CBB

El caso CBB corresponde a una alternativa de transporte y valorización de cenizas y arena con CBB, estructurada bajo una tarifa fija por tonelada y un contrato proyectado a 36 meses. La propuesta considera una capacidad de recepción de 5.000 ton/mes y un volumen inicial de 1.820 ton/mes, compuesto por 720 ton/mes provenientes de Santa Fe y 1.100 ton/mes provenientes de Laja, sin volumen asignado desde Pacífico en el escenario analizado. Las tarifas consideradas son de 0,460 UF/ton para Santa Fe, 0,400 UF/ton para Laja y 0,500 UF/ton para Pacífico, lo que implica un costo mensual estimado de 771,20 UF/mes para los volúmenes efectivamente considerados (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

Desde la perspectiva económica, se reporta un gasto anual estimado de 403 kUSD/año y un ahorro aproximado de 66 kUSD/año, equivalente a un 14 % respecto del gasto previsto con otras EPS. Si bien este escenario no representa el mayor ahorro relativo frente a alternativas de predios

adyacentes, su aporte radica en ofrecer una solución contractual de continuidad operacional para cenizas y arena, con capacidad de recepción, tarifas diferenciadas por planta y exigencias técnicas explícitas sobre la calidad del material. Por ello, su conveniencia debe evaluarse no solo por el ahorro generado, sino también por su contribución a la estabilidad del sistema de valorización, la reducción de incertidumbre operativa y la disponibilidad de un proveedor técnicamente habilitado para recibir estos flujos (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026), el resumen detallado del caso de CBB se encuentra en la figura 21.

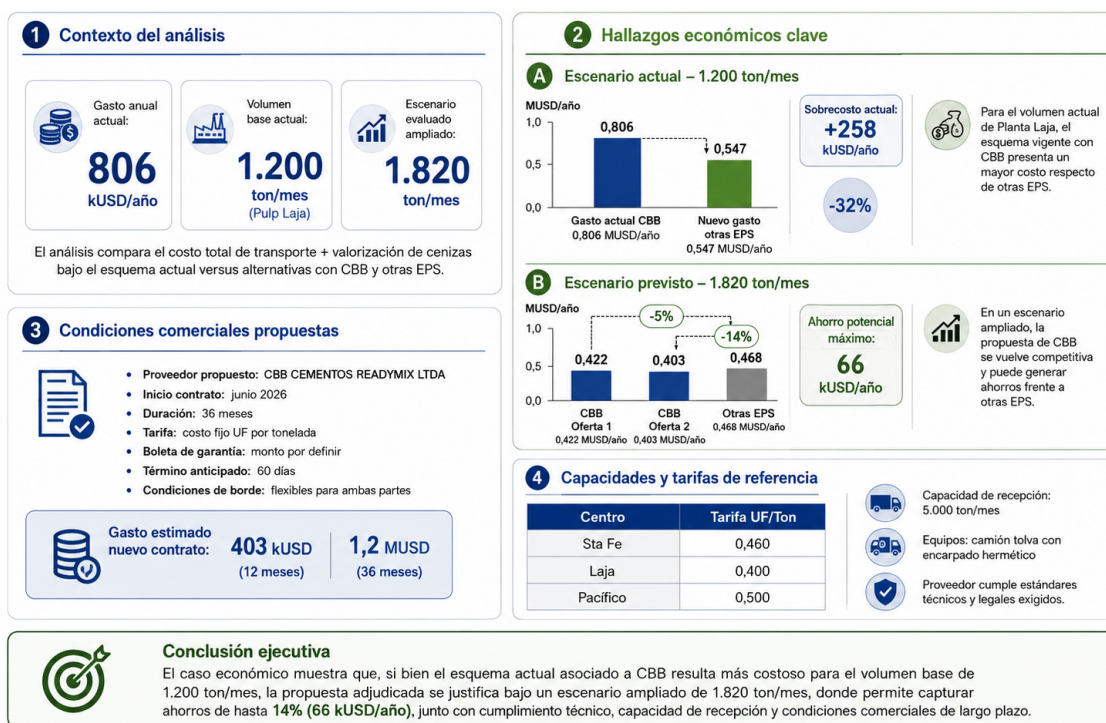


Figura 21: Resumen de caso CBB. Fuente: Elaboración propia.

10.2.7. Caso Qualitat

El escenario Qualitat de la figura 22 reporta el mayor potencial teórico de ahorro dentro de las propuestas revisadas. Bajo la hipótesis de derivar toda la generación a ese actor y conside-

rando una trayectoria de precio decreciente hasta llegar a costo de valorización cero en el tramo final del año, el proyecto estima un ahorro anual de 44.139 UF, equivalente a una reducción del 62 % y a aproximadamente USD 1.961.733 anuales (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela, dado que el área de procurement clasifica a Qualitat como oferta no consolidada e incluso descartada dentro del conjunto de actores disponibles, debido a antecedentes de riesgo comercial analizados por ellos (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En consecuencia, se trata de un escenario útil como frontera teórica de eficiencia, pero no de una alternativa operacionalmente validada en el mismo nivel que otras opciones del portafolio.

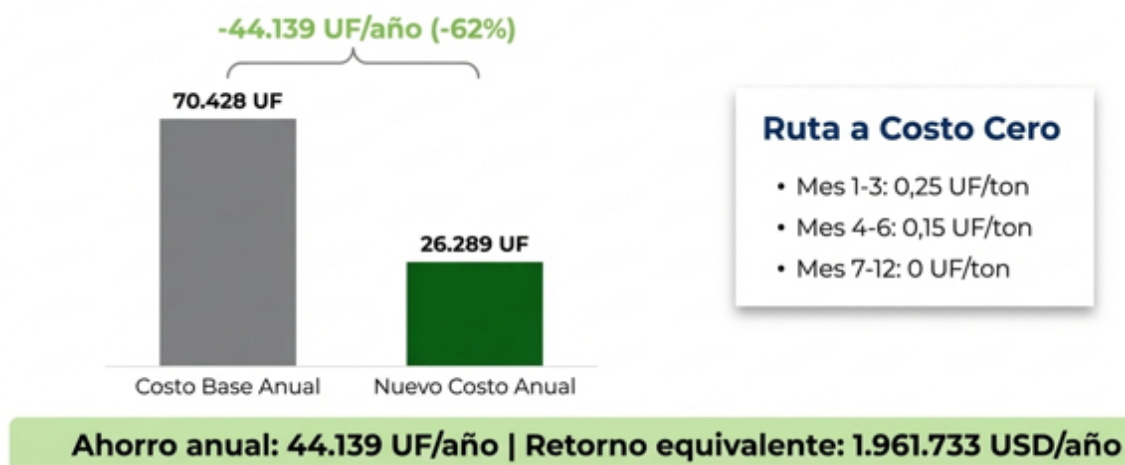


Figura 22: Quinto de caso de ahorro monetarios (caso Qualitat). Fuente: Elaboración propia.

10.2.8. Resumen y cierre

En conjunto, según la tabla 10 los resultados muestran que la eficiencia económica puede obtenerse mediante distintas rutas, cada una con una lógica de valor diferente. Los escenarios de predios externos reducen el costo mediante reconfiguración de valorizadores, los predios propios y adyacentes capturan ahorros relevantes al combinar menor tarifa con cercanía territorial, y el

nuevo caso CBB aporta una alternativa contractual de largo plazo para cenizas y arena, con menor ahorro relativo pero mayor formalización operacional. En particular, los casos de Santa Fe, Laja y Bucalemu evidencian que la distancia al destino receptor es una variable crítica para la rentabilidad del sistema, dado que una reducción a 1 km permite disminuir fuertemente el componente transporte. Por tanto, la decisión económica no debe formularse solo en función del menor costo unitario de valorización, sino considerando simultáneamente ahorro, distancia, capacidad de recepción, estabilidad contractual, riesgo operacional y factibilidad de implementación.

Tabla 10: Comparación actualizada de escenarios de valorización.

Iniciativa	Alcance	Costo actual	Costo proyectado	Ahorro	Ahorro anual
Caso 1: Situación actual	Caso base	5.869 UF/mes	5.869 UF/mes	0 %	0 USD/año
Caso 2: Predios externos, mix 3	Red externa	5.869 UF/mes	4.228 UF/mes	28 %	875.196 USD/año
Caso 2.1: Predios externos, mix 2	Red externa concentrada	5.869 UF/mes	4.015 UF/mes	32 %	988.800 USD/año
Caso 3: Predios propios, Ecoabono	Predios propios	5.869 UF/mes	3.286 UF/mes	44 %	1.377.600 USD/año
Caso 3.1: Predio adyacente Santa Fe	Aplicación a 1 km	4.668,94 UF/mes	1.706,16 UF/mes	63 %	1.580.150 USD/año
Caso 3.2: Predio adyacente Laja	Aplicación a 1 km	529,81 UF/mes	241,21 UF/mes	54 %	153.921 USD/año
Caso 3.3: Predio adyacente Bucalemu	Aplicación a 1 km	213,76 UF/mes	95,64 UF/mes	55 %	62.998 USD/año
Caso 4: CBB	Cenizas y arena	468 kUSD/año aprox.	403 kUSD/año aprox.	14 %	66.000 USD/año aprox.
Caso 5: Qualitat	Costo cero futuro	5.869 UF/mes	0 UF/ton desde mes 7	62 %	1.961.733 USD/año

10.3 Resultados del eje estratégico-comercial

10.3.1. Apertura del eje estratégico-comercial bajo escenario de venta habilitada

Para efectos analíticos de esta sección, se asume que los subproductos de CMPC ya cuentan con habilitación regulatoria y técnica suficiente para ser comercializados como enmiendas y/o fertilizantes, esto es, que se encuentran resueltas las exigencias sectoriales del SAG, las condiciones sanitarias aplicables y las materias ambientales que correspondan. Bajo este supuesto, el eje

estratégico-comercial deja de orientarse a la habilitación previa de la venta y pasa a formularse como un problema de selección estratégica entre modelos comerciales con terceros y con transacción efectiva.

Este cambio de foco modifica el criterio rector del análisis. En la etapa previa del proyecto, resultaba metodológicamente razonable privilegiar configuraciones centradas en costo evitado o control operativo. En cambio, en una etapa donde el producto ya puede venderse, la pregunta pasa a ser cuál modelo o combinación de modelos permite a CMPC capturar mayor valor económico, escalar comercialmente y construir una posición competitiva coherente con su estrategia de circularidad, innovación y creación de valor para clientes (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#); Empresas CMPC S.A., [2025](#)).

Desde esta perspectiva, el eje no debe organizarse como un inventario amplio de rutas de valorización, sino como una comparación estratégica entre configuraciones comerciales con venta. La literatura sobre modelos de negocio sostenibles y circulares indica que la elección de una arquitectura de captura de valor depende no solo del ingreso esperado, sino también del reparto de funciones dentro de la cadena, del control sobre el cliente, de la escalabilidad, de la estructura de alianzas y de la coherencia entre creación y apropiación de valor (Bocken et al., [2014](#); Boons & Lüdeke-Freund, [2013](#); Geissdoerfer et al., [2018](#); Lüdeke-Freund et al., [2019](#); Osterwalder & Pigneur, [2010](#)).

10.3.2. Fase 1: Universo de modelos de negocio con terceros y venta

Bajo el nuevo supuesto, el universo de análisis se restringe a modelos en los que exista al menos un tercero dentro de la cadena y una venta efectiva del subproducto. En consecuencia,

mecanismos como la aplicación en predios propios, la valorización pagada vía gestores o la entrega gratuita pueden ser mencionados como antecedentes de transición, pero no deben ser tratados como el destino central del análisis comercial.

Un primer modelo corresponde a la **venta directa B2B al cliente final agrícola o corporativo**. En esta configuración, CMPC comercializa directamente el producto al usuario final, reteniendo el mayor control sobre el precio, la relación comercial, la información de mercado y el posicionamiento del portafolio. Su principal atractivo radica en el mayor margen potencial y en la posibilidad de construir aprendizaje directo con el cliente. Sin embargo, exige desarrollar capacidades comerciales propias, soporte técnico, estructura de postventa y una gobernanza interna más cercana a la de un proveedor especializado de insumos (Boons & Lüdeke-Freund, 2013; Osterwalder & Pigneur, 2010), la descripción formal de este modelo se observa en la tabla 11.

Tabla 11: Mini Business Model Canvas – Venta directa B2B

Segmento de clientes	Grandes productores agrícolas, empresas frutícolas, forestales con uso agrícola, operadores de suelos degradados y clientes corporativos capaces de absorber volumen y exigir trazabilidad.
Propuesta de valor	Enmiendas/fertilizantes habilitados, trazables, de origen circular, con respaldo técnico-documental y oferta de volumen estable desde CMPC.
Canales	Venta directa mediante ejecutivos de cuenta, licitaciones privadas, contratos marco y soporte técnico-comercial propio.
Relación con clientes	Relación directa de cuenta clave, acompañamiento técnico y seguimiento de desempeño en uso.
Fuentes de ingreso	Venta por tonelada o por contrato de suministro; eventuales acuerdos de abastecimiento anual.
Recursos clave	Cartera de subproductos habilitados, laboratorio/calidad, expediente técnico, equipo comercial, marca corporativa y sistema de trazabilidad.
Actividades clave	Prospección, negociación, soporte técnico, planificación de demanda, aseguramiento de calidad y logística de entrega.
Socios clave	Operadores logísticos, laboratorios, asesores agronómicos externos y eventuales distribuidores logísticos sin rol comercial.
Estructura de costos	Fuerza comercial propia, soporte técnico, acondicionamiento, envasado si aplica, logística, postventa y gestión contractual.

Fuente: Elaboración propia.

Un segundo modelo corresponde a la **venta a través de distribuidores de insumos agrícolas**. Aquí CMPC actúa como proveedor de un producto habilitado y estandarizado, mientras el

distribuidor aporta red comercial, cobertura territorial, capilaridad y acceso a cartera de clientes. Su principal ventaja es que permite acelerar escalamiento comercial sin obligar a CMPC a construir desde cero una fuerza de ventas agrícola. Su principal limitación consiste en la cesión de parte del margen y de la relación directa con el cliente final (Lüdeke-Freund et al., 2019; Osterwalder & Pigneur, 2010), la estructura formal del modelo puede observarse en la tabla 12.

Tabla 12: Mini Business Model Canvas – Venta vía distribuidor

Segmento de clientes	Distribuidores nacionales o regionales de nutrición vegetal, mejoradores de suelo y bioestimulantes con cartera agrícola establecida.
Propuesta de valor	Producto habilitado y estandarizado con respaldo técnico, trazabilidad, volumen y narrativa de circularidad que el distribuidor pueda incorporar a su portafolio.
Canales	Venta B2B a distribuidores, acuerdos de abastecimiento, capacitación comercial y apoyo técnico al canal.
Relación con clientes	Relación proveedor-distribuidor con soporte técnico, fichas, entrenamiento y seguimiento de desempeño del canal.
Fuentes de ingreso	Venta mayorista al distribuidor; contratos anuales o semestrales; descuentos por volumen.
Recursos clave	Producto habilitado, marca o submarca, documentación técnica, capacidad de abastecimiento y coordinación comercial.
Actividades clave	Negociación de canal, planificación de volumen, estandarización de SKU, soporte técnico-comercial y gestión de inventario.
Socios clave	Distribuidor, operador logístico, laboratorios y eventualmente empresa de packaging.
Estructura de costos	Margen de canal, acondicionamiento comercial, material técnico, trade support, logística y control de calidad.

Fuente: Elaboración propia.

Un tercer modelo corresponde a la **venta mediante un socio técnico-comercial o integrador de solución**. En este esquema, el tercero no solo distribuye, sino que además incorpora soporte agronómico, implementación en terreno, coordinación logística o acompañamiento técnico de uso. Esta ruta adquiere especial relevancia cuando el valor del producto depende no solo de su condición de insumo, sino también de su correcta aplicación, de la demostración de desempeño o del acompañamiento en adopción. Su ventaja es que reduce la fricción de entrada al mercado, su riesgo es que puede trasladar poder relacional y parte de la propuesta de valor hacia el integrador (Geissdoerfer et al., 2018; Lüdeke-Freund et al., 2019), la descripción formal del modelo queda reflejada en la tabla 13.

Tabla 13: Mini Business Model Canvas – Socio técnico-comercial

Segmento de clientes	Clientes que requieren no solo un insumo, sino solución aplicada: recuperación de suelos, uso técnico en predios, proyectos con fuerte componente de implementación.
Propuesta de valor	Solución integral que combina producto habilitado, soporte técnico, logística de aplicación y menor fricción de adopción.
Canales	Venta mediante socio integrador con llegada territorial, asistencia técnica y capacidad de implementación.
Relación con clientes	Relación compartida entre CMPC y el integrador, el tercero lidera implementación y CMPC resguarda especificación del producto.
Fuentes de ingreso	Venta del producto base a integrador o esquema de revenue sharing asociado a proyecto o servicio.
Recursos clave	Producto habilitado, especificación técnica, datos de desempeño, protocolos de aplicación y red de socios.
Actividades clave	Selección de socio, definición de roles, pilotaje, soporte técnico, control de desempeño y trazabilidad.
Socios clave	Integradores técnicos, consultoras agronómicas, operadores de aplicación, logística y control de calidad.
Estructura de costos	Soporte técnico, gobernanza del acuerdo, seguimiento de implementación, control de calidad y apoyo comercial conjunto.

Fuente: Elaboración propia.

Un cuarto modelo corresponde a la **venta mediante maquila o acondicionamiento por terceros**. En esta configuración, CMPC suministra la base material y un tercero formula, mezcla, acondiciona o envasa el producto para su posterior comercialización. Este modelo es especialmente pertinente cuando ciertas familias de subproducto no son comercialmente óptimas en su estado original, pero sí adquieren mayor valor como formulación más madura. Su ventaja es la posibilidad de capturar una prima de valor por upgrading, su principal costo es la mayor complejidad contractual, de trazabilidad y de reparto de margen (Bocken et al., 2014; Geissdoerfer et al., 2018), la configuración formal del modelo se visualiza en la tabla 14.

Tabla 14: Mini Business Model Canvas – Maquila/acondicionamiento

Segmento de clientes	Canales o clientes que demandan un producto más formulado, mezclado, envasado o comercialmente maduro.
Propuesta de valor	Transformación del subproducto base en una formulación de mayor valor comercial, con mejores atributos de presentación, uso o portafolio.
Canales	Venta a través de canal especializado, distribuidor o cliente final, una vez formulado por tercero.
Relación con clientes	CMPC puede mantener rol de dueño del producto base y codiseñador de la formulación, con relación indirecta o compartida con el mercado.
Fuentes de ingreso	Venta del producto formulado, margen mayor al flujo base, sujeto a reparto con formulador o maquilador.
Recursos clave	Subproducto habilitado, propiedad intelectual o diseño de mezcla, especificaciones técnicas y control de calidad.
Actividades clave	Selección de formulador, codiseño de mezcla, validación técnica, aseguramiento de calidad, negociación de marca y trazabilidad.
Socios clave	Maquilador/formulador, laboratorio, empresa de envases, canal comercial y logística.
Estructura de costos	Servicio de formulación, validación, envase, control de calidad, coordinación contractual y eventuales regalías o reparto de margen.

Fuente: Elaboración propia.

Un quinto modelo corresponde a la **venta en consignación a través de canal o socio comercial**. Bajo esta modalidad, el producto se posiciona en un canal tercero, pero CMPC mantiene ciertas condiciones sobre inventario o propiedad hasta la salida efectiva. El atractivo de este modelo radica en su utilidad para probar rotación real, aceptación del mercado y desempeño del canal. No obstante, exige trazabilidad fina, definición contractual robusta y tolerancia a stock inmovilizado, por lo que su uso parece más apropiado como piloto comercial acotado que como mecanismo principal de escalamiento (Lüdeke-Freund et al., 2019; Osterwalder & Pigneur, 2010), la formulación formal de este modelo se presenta en la tabla 15.

Tabla 15: Mini Business Model Canvas – Consignación

Segmento de clientes	Canales especializados o distribuidores dispuestos a testear rotación sin compra plena inicial.
Propuesta de valor	Permite introducir el producto en canal con menor barrera inicial para el tercero y mayor aprendizaje de mercado para CMPC.
Canales	Colocación en canal consignatario, punto de venta técnico o red comercial asociada.
Relación con clientes	Relación principal con el socio consignatario, CMPC mantiene seguimiento sobre inventario, salida y desempeño comercial.
Fuentes de ingreso	Ingreso diferido por venta efectiva; posibles cargos o condiciones por permanencia, reposición o devolución.
Recursos clave	Sistema de trazabilidad por lote, control de inventario, contrato de consignación, documentación comercial y soporte de canal.
Actividades clave	Gestión de stock, conciliación de ventas, monitoreo de rotación, devoluciones y análisis de desempeño de canal.
Socios clave	Distribuidor consignatario, operador logístico, auditoría de inventario y soporte técnico-comercial.
Estructura de costos	Inventario inmovilizado, costos de seguimiento, logística reversa potencial, soporte de canal y administración contractual.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, un sexto modelo corresponde al **modelo híbrido por familia de subproducto**. En este caso, la decisión comercial no se resuelve en una única ruta, sino en una arquitectura de portafolio donde distintas familias siguen diferentes salidas comerciales según madurez, estandarización, escala, valor agronómico y tipo de cliente. Esta alternativa podría ser interesante en el caso CMPC, ya que anteriormente se distingue familias inertes, calcáreas y orgánicas, con lógicas de volumen, composición y uso potencial no homogéneas (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026). En términos estratégicos, el modelo híbrido no maximiza una sola variable, pero sí permite optimizar la captura de valor del portafolio completo, la especificación formal del modelo se expone en la tabla 16.

Tabla 16: Mini Business Model Canvas – Modelo híbrido por familia

Segmento de clientes	Portafolio mixto: distribuidores para corrientes estandarizables, integradores para soluciones aplicadas, clientes ancla para cuentas directas y formuladores para mezclas de mayor valor.
Propuesta de valor	Asignar a cada familia de subproducto la ruta comercial que maximice su captura de valor según madurez, escala, composición y tipo de demanda.
Canales	Combinación de canal distribuidor, socio técnico-comercial, maquila selectiva, venta directa, etc.
Relación con clientes	Diferenciada por familia y por canal. CMPC conserva gobernanza de portafolio y criterios de asignación comercial.
Fuentes de ingreso	Ingresos combinados por venta mayorista, cuentas directas y productos formulados, con distinta estructura de margen por familia.
Recursos clave	Inteligencia comercial por familia material, sistema de clasificación de portafolio, calidad, trazabilidad y gobernanza comercial.
Actividades clave	Segmentación de subproductos, selección de canal, negociación por modelo, gestión de portafolio, seguimiento de desempeño y reasignación dinámica.
Socios clave	Distribuidores, integradores técnicos, formuladores, logística y clientes ancla.
Estructura de costos	Costos diferenciados por familia, gobernanza más compleja, coordinación de portafolio, soporte técnico y comercial múltiple.

Fuente: Elaboración propia.

De forma compacta, los modelos de negocios se resumen en la tabla 17:

Tabla 17: Comparación de modelos de negocio con presencia de terceros para la comercialización de subproductos valorizados en CMPC.

Modelo de negocio	Descripción	Ventajas principales	Desafíos / riesgos
Venta directa B2B	CMPC comercializa directamente al cliente final agrícola o corporativo, controlando precio, relación comercial y posicionamiento.	Mayor margen potencial; control comercial; aprendizaje directo del cliente.	Requiere capacidades comerciales propias, soporte técnico, postventa y mayor complejidad organizacional.
Distribuidores agrícolas	Venta a través de distribuidores que aportan red comercial, cobertura territorial y acceso a clientes.	Escalamiento rápido; acceso a cartera existente; menor necesidad de estructura comercial propia.	Pérdida parcial de margen y de relación directa con el cliente final.
Socio técnico-comercial / integrador	Tercero que no solo distribuye, sino que entrega soporte agronómico, implementación y acompañamiento técnico.	Reduce fricción de entrada; facilita adopción; agrega valor en uso del producto.	Transferencia de poder relacional; dependencia del integrador en la propuesta de valor.
Maquila / acondicionamiento	Un tercero formula, mezcla o envasa el subproducto para mejorar su condición comercial.	Permite upgrading del producto; captura mayor valor; habilita nuevas aplicaciones.	Mayor complejidad contractual, trazabilidad y reparto de margen.
Consignación en canal	Producto se posiciona en canal externo, manteniendo CMPC control parcial sobre inventario hasta su venta.	Permite testear mercado real; valida rotación y aceptación comercial.	Riesgo de stock inmovilizado; necesidad de trazabilidad y contratos robustos.
Modelo híbrido por familia	Diferentes subproductos siguen distintas rutas comerciales según su naturaleza, madurez y uso.	Optimiza valor del portafolio completo; flexibilidad estratégica; mejor ajuste producto-mercado.	Mayor complejidad de gestión; requiere segmentación y coordinación interna avanzada.

Fuente: Elaboración propia.

10.3.3. Fase 2: Filtro estratégico mediante entrevistas internas

El primer resultado del eje estratégico-comercial corresponde al filtro cualitativo de modelos de negocio realizado a partir de entrevistas exploratorias con las áreas de Innovación y Ventures de CMPC. Este levantamiento permitió contrastar las alternativas inicialmente propuestas con la estrategia corporativa, las capacidades comerciales disponibles y el grado de inversión que la compañía estaría dispuesta a asumir para habilitar la venta de subproductos valorizados. En este contexto, el análisis se basa en evaluar cuáles rutas resultan compatibles con una estrategia de comercialización liviana, apoyada en terceros y sin creación inmediata de una nueva unidad comercial interna.

Como resultado de las entrevistas, la venta directa B2B fue descartada como modelo principal, debido a que exigiría a CMPC asumir funciones comerciales fuera del rubro principal que hoy no forman parte del alcance operativo del proyecto, como lo son la exploración de clientes agrícolas, gestión de cuentas, soporte técnico, postventa, administración de cartera y eventualmente inversiones adicionales para estructurar una línea de negocio propia. Bajo esta lógica, aunque la venta directa podría maximizar el margen teórico, su implementación no se considera prioritaria mientras la compañía no defina una estrategia explícita de inversión comercial o CAPEX asociado a esta nueva actividad.

La venta en consignación también fue descartada como modelo objetivo, dado que traslada a CMPC parte relevante del riesgo comercial sin asegurar una venta efectiva. En este esquema, el producto queda disponible en un canal o socio comercial, pero el ingreso se materializa solo cuando ocurre la venta final. Por tanto, la empresa asumiría riesgo de inventario, seguimiento de

stock, trazabilidad, posibles devoluciones y administración contractual, sin contar necesariamente con una capacidad comercial propia para gestionar la rotación del producto. En consecuencia, este modelo podría tener valor solo como piloto acotado, pero no como estrategia principal de escalamiento comercial.

A partir del filtro realizado y con resultados resumidos en la tabla 18, los modelos que permanecen como alternativas más coherentes son aquellos donde un tercero asume parte relevante de la función comercial, técnica o de acondicionamiento. En particular, se mantienen como rutas prioritarias la venta mediante distribuidores de insumos agrícolas, el trabajo con socios técnico-comerciales o integradores, la maquila o acondicionamiento por terceros y un modelo híbrido por familia de subproducto. Estas alternativas permiten avanzar hacia la captura de valor económico sin exigir que CMPC desarrolle inmediatamente una estructura comercial completa para atender directamente al mercado agrícola.

Tabla 18: Filtro estratégico de modelos de negocio a partir de entrevistas internas.

Modelo	Resultado del filtro	Justificación	Implicancia para el estudio
Venta directa B2B	Descartado como modelo principal	Requiere capacidad comercial propia, soporte técnico, gestión de clientes, postventa y eventual inversión adicional.	No se prioriza mientras CMPC no defina una nueva estructura comercial o CAPEX asociado.
Venta en consignación	Descartado como modelo principal	Mantiene riesgo de inventario, dependencia de rotación del canal y pago diferido hasta venta efectiva.	Puede considerarse solo como piloto acotado, no como ruta principal de escalamiento.
Venta vía distribuidor	Modelo plausible	Permite utilizar una red comercial existente y reduce la necesidad de construir fuerza de ventas propia.	Se mantiene como ruta prioritaria para productos más estandarizables.
Socio técnico-comercial	Modelo plausible	El tercero aporta soporte técnico, llegada territorial, implementación y acompañamiento en terreno.	Se mantiene para productos que requieren explicación técnica o aplicación asistida.
Maquila o acondicionamiento	Modelo plausible	Permite transformar, formular o acondicionar subproductos para mejorar su condición comercial.	Se mantiene para familias que requieran mayor madurez técnica o presentación comercial.
Modelo híbrido por familia	Modelo recomendado como arquitectura general	Reconoce que las familias de subproductos no tienen igual madurez, volumen, función ni canal.	Se propone como enfoque más realista para ordenar rutas diferenciadas de comercialización.

Fuente: Elaboración propia.

10.3.4. Fase 3: Cálculo preliminar de precios para subproductos calcáreos

Una vez filtrados los modelos de negocio, el análisis se concentró en estimar precios preliminares para subproductos con mayor potencial de homologación comercial. En particular, se priorizó la familia de subproductos calcáreos, debido a que su función puede aproximarse a la de enmiendas orientadas a corrección o mejora de suelos, siempre que exista respaldo técnico suficiente respecto de valor neutralizante, humedad, composición y equivalencia con carbonato de calcio. (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, [2026](#)).

Resumida en la figura [23](#), la lógica del cálculo consiste en estimar un precio de venta referencial para cada subproducto a partir de su equivalencia técnica con una enmienda calcárea comercial, en este caso corresponde a la cal agrícola que ofrece Soprocal en un saco de 25 Kg de producto. El cálculo utiliza como base su precio de referencia de 5.060 CLP, lo transforma a precio neto por tonelada y luego ajusta dicho valor según el escenario comercial definido en la figura [24](#). Posteriormente, el precio se corrige por la equivalencia de carbonato de calcio del subproducto en condición tal cual, considerando su valor neutralizante y humedad real. De este modo, el precio preliminar no se asigna de manera arbitraria, sino que se vincula con la capacidad técnica del material para entregar una función comparable a una referencia de mercado, según se nota en la figura [25](#) y [26](#).



Figura 23: Resumen de metodología de cálculo de precios equivalentes de subproductos calcáreos. Fuente: Elaboración propia.



Figura 24: Conversión de precio base de Soprocál a precio CMPC equivalente. Fuente: Elaboración propia.

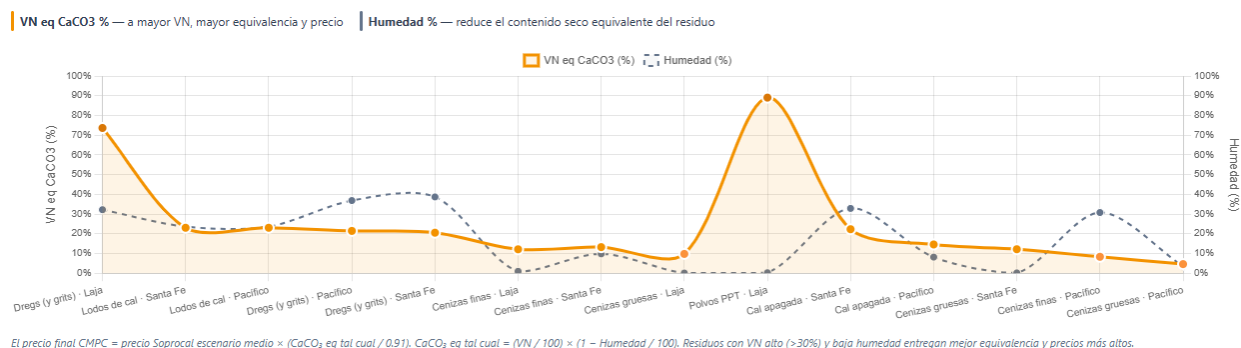


Figura 25: Gráfico comparativo de valor neutralizante CaCO₃ y humedad por subproducto. Fuente: Elaboración propia.

El resultado económico del modelo se expresa como una mejora total anual compuesta por dos fuentes de valor: el ingreso potencial por venta y el costo evitado. La Figura 27 permite visualizar esta lógica de forma comparativa. En el gráfico, las barras rojas ubicadas hacia la izquierda

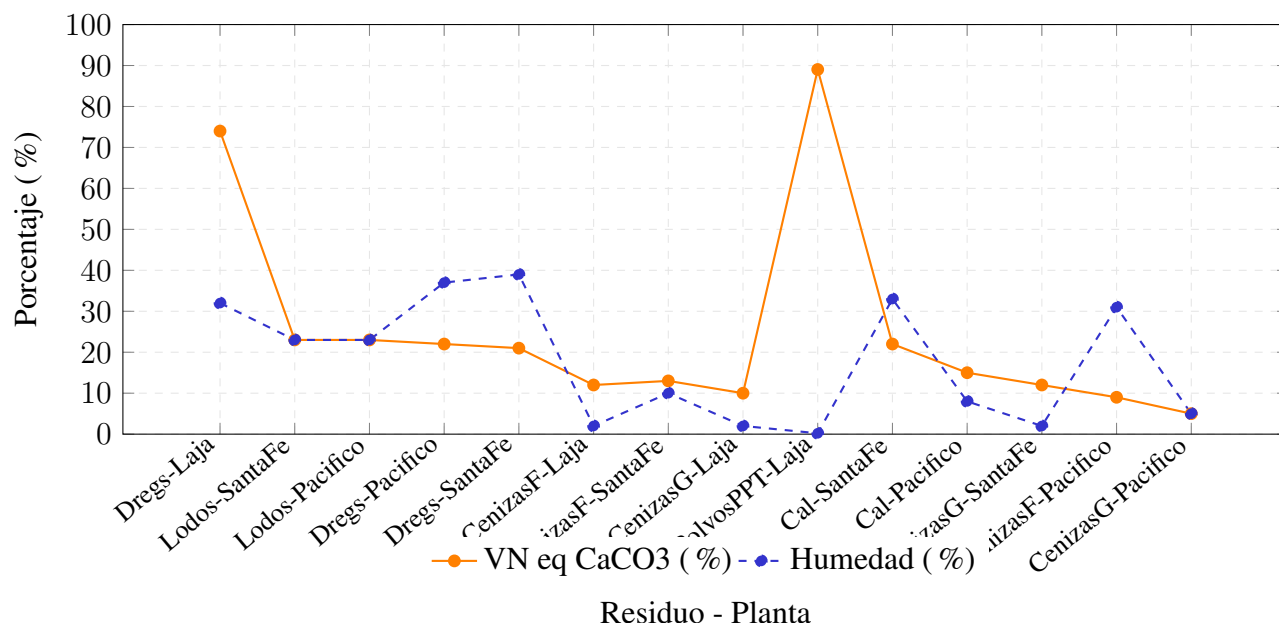


Figura 26: Gráfico comparativo de valor neutralizante CaCO_3 y humedad por subproducto. Fuente: Elaboración propia.

de la línea cero representan el costo actual por tonelada que CMPC paga por la gestión del subproducto, considerando valorización y transporte. En cambio, las barras ubicadas hacia la derecha representan el precio nuevo estimado por tonelada que CMPC podría cobrar bajo el escenario medio de homologación comercial. La línea vertical en cero corresponde al punto de equilibrio: hacia la izquierda se observan egresos actuales para CMPC y hacia la derecha se observa el potencial de ingreso por venta.

De esta forma, la mejora económica no depende únicamente del precio comercial estimado, sino de la combinación entre dejar de pagar por la gestión actual del residuo y comenzar a capturar ingresos por su venta. En los subproductos donde existe costo actual, la oportunidad económica se compone del precio de venta más el costo evitado; mientras que en aquellos casos donde el costo actual es igual a cero, la mejora proviene principalmente del ingreso potencial por venta. Por ello, el gráfico permite identificar qué subproductos presentan una mayor brecha económica favorable

para CMPC y cuáles requieren mayor cautela, ya sea por menor precio estimado, menor costo evitado o ausencia de valorización formal registrada en el modelo actual.

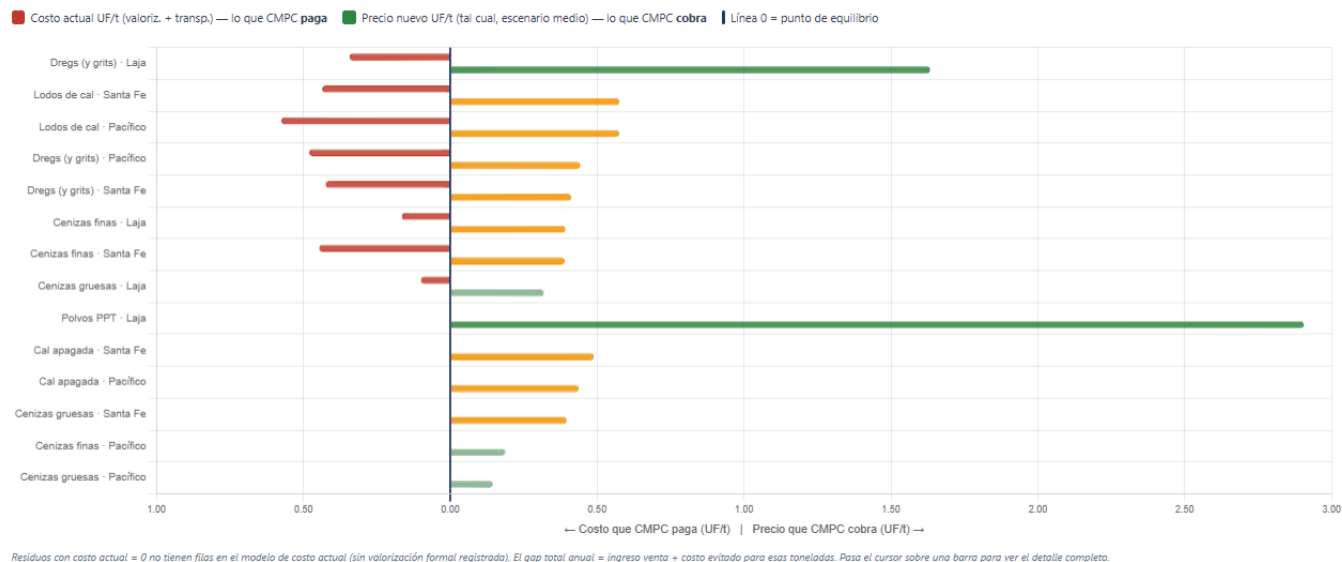


Figura 27: Comparación entre costo actual pagado por CMPC y precio nuevo estimado por tonelada de subproducto. Fuente: Elaboración propia.

Nota. Las barras rojas representan el costo actual por tonelada que CMPC paga por valorización y transporte. Las barras hacia la derecha representan el precio nuevo estimado que CMPC podría cobrar bajo el escenario medio, este se compone de precios bajos como líneas de color gris, precios medios de color amarillo y precios más altos en color verde. La línea vertical en cero indica el punto de equilibrio.

Los resultados preliminares de la figura 28 muestran que el potencial económico se concentra en los subproductos con caracterización técnica disponible y con equivalencia funcional respecto de cal agrícola. En términos agregados, el ejercicio identifica 245.208 toneladas anuales homologadas, un ingreso potencial por venta de 5.381.122 USD/año, un costo evitado de 4.964.666 USD/año y una mejora total aproximada de 10.345.787 USD/año bajo el escenario base de valorización actual sin venta. A nivel de plantas, según se aprecia en la tabla 19 y las figuras 28 y 29, Santa Fe, Pacífico y Laja concentran la mayor parte de la oportunidad, debido a que cuentan con residuos caracterizados y volúmenes relevantes para la estimación económica (CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones, 2026).

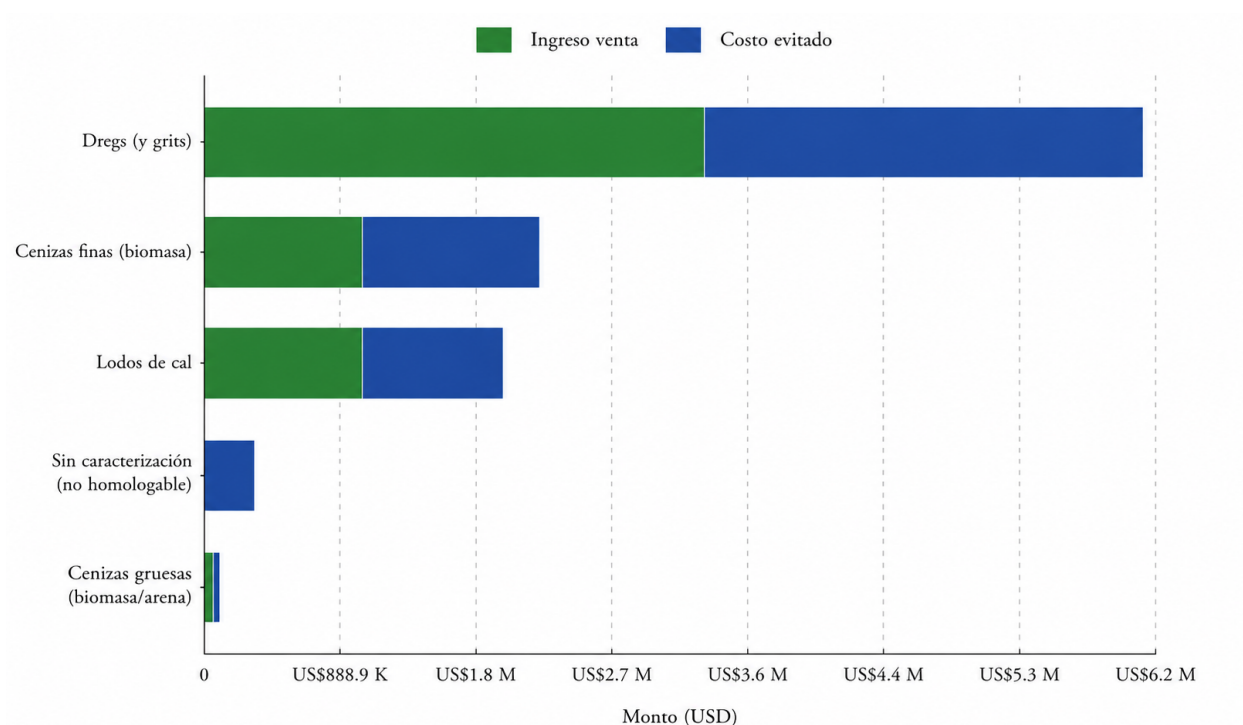


Figura 28: Desempeño económicos de los mejores subproductos. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Ranking por planta según mejora total anual.

#	Planta	Ton vendibles	Ingreso venta	Costo evitado	Mejora total	% venta
1	Santa Fe	128.496	US\$2.544.233	US\$2.490.100	US\$5.034.332	50.5 %
2	Pacífico	92.460	US\$1.807.572	US\$1.991.060	US\$3.798.631	47.6 %
3	Laja	27.804	US\$1.029.317	US\$282.564	US\$1.311.882	78.5 %
4	Bucalemu	7.932	—	US\$113.664	US\$113.664	0.0 %
5	Mulchén	4.140	—	US\$46.360	US\$46.360	0.0 %
6	Nacimiento	1.596	—	US\$34.957	US\$34.957	0.0 %
7	Plywood	480	—	US\$5.961	US\$5.961	0.0 %
TOTAL CMPC		262.908	US\$5.381.122	US\$4.964.666	US\$10.345.787	52.0 %

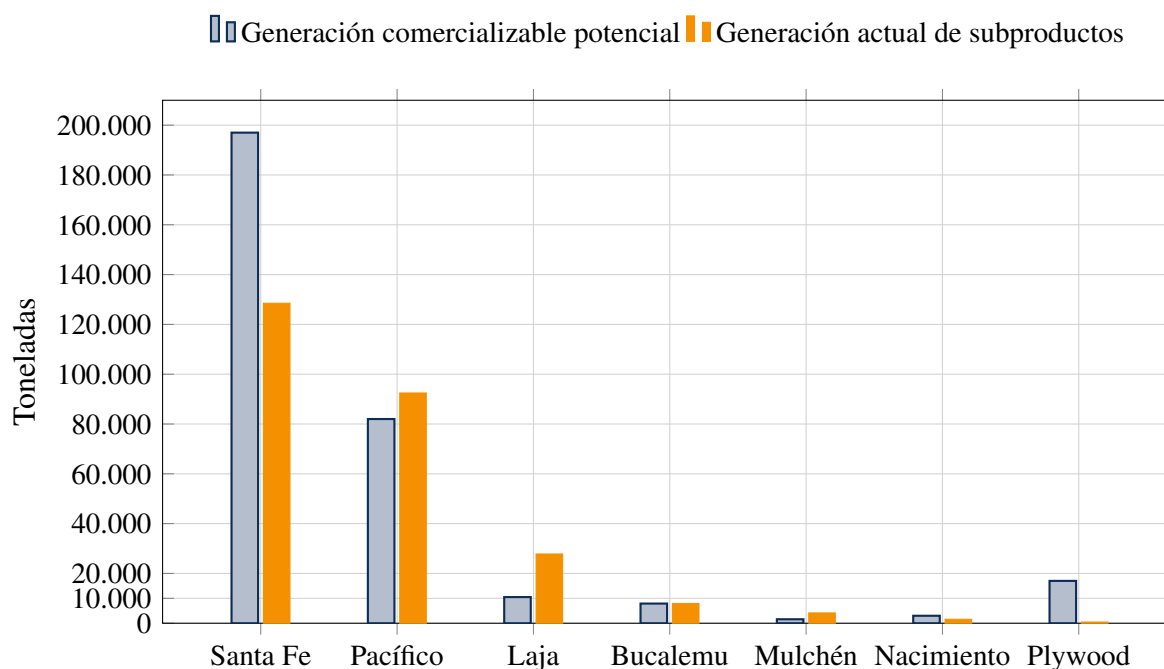


Figura 29: Generación comercializable potencial versus generación actual de subproductos.

La Tabla 20 resume el potencial económico preliminar por residuo técnico homologado y planta de origen. Para cada subproducto se compara el costo actual por tonelada que CMPC paga por su gestión, valorización o transporte, con el precio nuevo estimado por tonelada que podría cobrarse bajo el escenario de homologación comercial. En este análisis, el *GAP* corresponde a la mejora económica unitaria por tonelada, entendida como la suma entre el costo que CMPC dejaría de pagar y el ingreso potencial que podría obtener por la venta del subproducto. Por ello, el *GAP* no representa solamente una diferencia de precios, sino el cambio económico completo entre el escenario actual de pago por gestión y un escenario potencial de valorización comercial.

De forma simplificada, el *GAP* unitario se calcula como: $GAP \text{ UF/t} = \text{costo actual evitado UF/t} + \text{precio nuevo estimado UF/t}$. Luego, este valor se multiplica por las toneladas anuales activas de cada residuo para estimar el impacto económico anual en dólares y pesos chilenos. En consecuencia, los valores de la tabla permiten identificar qué residuos presentan mayor potencial de captura de

valor, ya sea porque actualmente implican un costo relevante para CMPC, porque poseen un precio estimado atractivo, o porque concentran un volumen anual significativo. No obstante, estos resultados deben interpretarse como una estimación preliminar de potencial económico y no como precios comerciales definitivos, ya que la venta efectiva requiere validar caracterización por lote, condiciones logísticas, aceptación del cliente, modelo de comercialización y cumplimiento técnico-regulatorio

Tabla 20: Resumen del GAP por residuo homologado e impacto económico anual.

Residuo técnico	Planta	Costo actual UF/t	Precio nuevo UF/t	GAP UF/t	Ton/año activas	GAP total USD/año	GAP total CLP/año
Dregs (y grits)	Pacífico	0.481	0.443	+0.924	81.456	US\$3.343.800	\$3.009.420.344
Dregs (y grits)	Santa Fe	0.425	0.412	+0.837	48.072	US\$1.787.824	\$1.609.041.961
Cenizas finas (biomasa)	Santa Fe	0.447	0.390	+0.836	47.520	US\$1.766.614	\$1.589.952.638
Lodos de cal	Santa Fe	0.437	0.575	+1.012	32.904	US\$1.479.894	\$1.331.904.501
Dregs (y grits)	Laja	0.344	1.633	+1.977	10.200	US\$896.321	\$806.688.939
Lodos de cal	Pacífico	0.576	0.575	+1.151	8.004	US\$409.596	\$368.636.214
Cenizas finas (biomasa)	Laja	0.166	0.392	+0.558	14.484	US\$359.234	\$323.310.464
Cenizas gruesas (biomasa/arena)	Laja	0.101	0.319	+0.420	2.568	US\$47.894	\$43.104.714
Cal apagada	Santa Fe	—	0.489	+0.489	—	—	—
Cal apagada	Pacífico	—	0.437	+0.437	—	—	—
Polvos PPT (Horno de Cal)	Laja	—	2.908	+2.908	—	—	—
Cenizas gruesas (biomasa/arena)	Santa Fe	—	0.397	+0.397	—	—	—
Cenizas finas (biomasa)	Pacífico	—	0.188	+0.188	—	—	—
Cenizas gruesas (biomasa/arena)	Pacífico	—	0.145	+0.145	—	—	—
TOTAL				—	245.208	US\$10.091.178	\$9.082.059.775

Fuente: Elaboración propia.

10.3.5. Cierre del eje estratégico-comercial

El eje estratégico-comercial permite concluir que la comercialización de subproductos valorizados no debe abordarse como una venta directa inmediata desde CMPC al cliente final, sino como una estrategia gradual apoyada en terceros. Las entrevistas internas con Innovación y Venturas permitieron descartar modelos que requieren construir capacidades comerciales propias o asumir riesgo de inventario, como la venta directa B2B y la consignación. En contraste, se mantienen

como rutas más consistentes la venta vía distribuidores, el trabajo con socios técnico-comerciales, la maquila o acondicionamiento y un modelo híbrido por familia de subproducto.

Desde el punto de vista económico-comercial, el cálculo preliminar de precios para subproductos calcáreos muestra que existe una oportunidad relevante de captura de valor cuando el material cuenta con caracterización técnica y puede homologarse funcionalmente con referencias de mercado. Sin embargo, esta oportunidad no debe entenderse como comercialización ya habilitada, sino como una primera estimación de potencial económico. Por ello, la recomendación estratégica es avanzar con un modelo híbrido: utilizar distribuidores o socios técnicos para familias estandarizables, explorar maquila para materiales que requieran acondicionamiento y priorizar pilotos comerciales con terceros antes de escalar una venta formal.

11 Conclusiones

La presente memoria permitió diseñar y evaluar un modelo técnico-regulatorio, logístico, económico y estratégico-comercial para la valorización de subproductos de celulosa y madera de CMPC como potenciales enmiendas o fertilizantes. Los resultados muestran que la eficiencia económica no depende exclusivamente del costo de transporte, de la tarifa de valorización o del precio de venta, sino de la articulación entre cumplimiento regulatorio, respaldo técnico, factibilidad operacional y captura de valor. En consecuencia, estos materiales requieren rutas diferenciadas según sus características, volúmenes, ubicación y grado de madurez.

En el eje técnico-regulatorio se identificó una ruta potencialmente viable para avanzar hacia el reconocimiento de determinados subproductos como productos agrícolas regulados. Los análisis fisicoquímicos disponibles constituyen un respaldo preliminar, pero no equivalen por sí solos a una autorización de uso o comercialización. La inscripción de las plantas de CMPC como productores corresponde a un primer hito, al que deben seguir los expedientes de cada producto o mezcla, incorporando composición, calidad, contaminantes, trazabilidad, eficacia agronómica y etiquetado. Asimismo, la ruta ante el SAG debe complementarse con las definiciones sanitarias y ambientales aplicables, debido a que la clasificación agrícola no elimina las obligaciones asociadas a la SEREMI de Salud o al SEA.

Respecto del eje económico, el modelo de asignación permitió evaluar conjuntamente los costos de transporte y valorización, distribuyendo las toneladas hacia destinos factibles bajo restricciones de generación y capacidad. Frente al costo base de 5.869 UF/mes, los escenarios generales con valorizadores externos proyectan ahorros de entre 28 % y 32 %, mientras que la aplicación en predios propios alcanza 44 %. Los casos focalizados en predios adyacentes presentan reducciones

de 63 % en Santa Fe, 54 % en Laja y 55 % en Bucalemu, principalmente por la disminución de la distancia de transporte. Esto confirma que la proximidad territorial es una fuente relevante de eficiencia, aunque la decisión final también debe considerar capacidad de recepción, continuidad operacional y condiciones contractuales.

En el eje estratégico-comercial, las entrevistas con Innovación y Ventures permitieron filtrar los modelos de negocio de acuerdo con las capacidades actuales de CMPC. La venta directa B2B fue descartada como ruta inicial, debido a que requeriría inversión, fuerza comercial y gestión directa de clientes. La consignación tampoco se consideró prioritaria, pues mantendría en la empresa el riesgo de inventario y la incertidumbre de rotación. Por ello, las alternativas más consistentes corresponden a modelos apoyados en distribuidores, socios técnico-comerciales, maquiladores o configuraciones híbridas por familia de subproducto.

El cálculo preliminar de precios para la familia calcárea permitió estimar su potencial económico mediante un GAP compuesto por el ingreso esperado por venta y el costo evitado de la gestión actual. Este análisis facilita la priorización de materiales, pero no representa precios definitivos ni demanda validada, debido a que aún deben verificarse la caracterización por lote, el desempeño agronómico, la logística, el acondicionamiento y la aceptación comercial.

En síntesis, el estudio cumplió con identificar los requisitos regulatorios, analizar el sistema actual, formalizar el modelo de asignación, comparar escenarios económicos y proponer rutas preliminares de comercialización. Se recomienda avanzar gradualmente: completar la habilitación de los productos priorizados, pilotear alternativas logísticas asociadas a destinos cercanos y desarrollar pruebas comerciales con terceros especializados. El aporte principal de la memoria consiste en integrar antecedentes técnicos, regulatorios y económicos en una estructura de apoyo a la decisión, orientada a una gestión de subproductos más circular, eficiente y capaz de capturar valor.

12 Limitaciones

Las limitaciones de esta investigación se relacionan principalmente con actividades que no pudieron completarse dentro del período de ejecución de la memoria. Estas restricciones no invalidan los resultados obtenidos, pero condicionan su nivel de implementación y obligan a interpretar algunas conclusiones como propuestas preliminares que requieren continuidad posterior.

La principal limitación del eje regulatorio fue que el proceso formal de inscripción no alcanzó a concluir durante el desarrollo del estudio. Si bien se identificaron los formularios, requisitos y antecedentes necesarios, quedó pendiente completar, firmar y presentar los avisos de inicio de actividades y ubicación de los establecimientos, así como esperar la respuesta de la autoridad. Tampoco fue posible completar la inscripción regional de CMPC como productor ni ingresar los expedientes técnicos definitivos de cada producto o mezcla. En consecuencia, la memoria desarrolla y ordena la ruta SAG, pero no puede presentar como resultado una inscripción administrativa aprobada.

Aunque se desarrollaron reuniones y consultas iniciales con autoridades, no fue posible realizar la reunión tripartita planificada entre la SEREMI de Salud, el SAG y CMPC. También quedaron pendientes reuniones y pronunciamientos específicos ante el SEA respecto de la aplicación de la nueva clasificación en las distintas plantas, resoluciones ambientales y corrientes materiales. Esta situación limitó la posibilidad de cerrar una interpretación regulatoria uniforme y obligó a mantener las conclusiones sanitarias y ambientales sujetas a revisión caso a caso.

Los análisis fisicoquímicos desarrollados por UDT permitieron caracterizar subproductos y mezclas, pero no fue posible ejecutar durante la memoria ensayos agronómicos de campo que

permitieran medir su comportamiento en diferentes suelos, cultivos, dosis y períodos. Tampoco se evaluó de manera longitudinal la variabilidad entre lotes, la estabilidad durante almacenamiento o el efecto de cambios de humedad y granulometría. Por ello, el potencial agrícola identificado se sustenta en caracterización técnica y normativa, pero no constituye una demostración definitiva de desempeño en condiciones comerciales de uso.

La formulación y validación del algoritmo se realizaron con las matrices y parámetros disponibles, pero no fue posible integrarlo a los sistemas corporativos ni automatizar su actualización con datos operacionales en tiempo real. Tampoco se implementó un piloto completo de asignación de cargas basado en la solución propuesta. En consecuencia, el modelo demuestra la lógica de optimización y permite comparar escenarios, pero su uso periódico requerirá desarrollar mecanismos de actualización, gobernanza de datos e integración con las herramientas operacionales de la compañía.

Las tarifas, volúmenes, capacidades y condiciones contractuales cambiaron durante el desarrollo de la memoria debido a nuevas propuestas y negociaciones con proveedores. Casos como CBB, Ecoabono, Qualitat y los predios adyacentes fueron evaluados con los antecedentes disponibles en momentos determinados, pero no fue posible comprobar su desempeño durante un período operacional completo. Además, algunos escenarios representan soluciones generales para la red y otros corresponden a oportunidades focalizadas por planta, lo que limita su comparación directa y exige analizar cada resultado de acuerdo con su alcance específico.

El eje estratégico-comercial se apoyó en entrevistas con las áreas internas de Innovación y Ventures, pero no fue posible realizar una ronda sistemática de entrevistas con distribuidores, formadores, clientes agrícolas o socios técnico-comerciales externos. Tampoco se ejecutaron pilotos

de venta, pruebas de disposición a pagar, contratos comerciales ni mediciones de rotación. Por esta razón, los modelos de negocio seleccionados representan rutas compatibles con las capacidades actuales de CMPC, pero no pueden considerarse modelos validados por el mercado.

La simulación de precios se desarrolló para materiales que podían homologarse funcionalmente con referencias de enmiendas calcáreas. No fue posible aplicar la misma metodología con igual profundidad a todas las familias orgánicas, inertes o mixtas, debido a diferencias de función, caracterización y referencias de mercado. Además, el cálculo no incorpora de manera definitiva todos los costos que podrían surgir en una comercialización real, como formulación, secado, mezcla, envasado, almacenamiento, soporte técnico, comisiones de canal o devoluciones. Por lo tanto, los valores estimados representan un potencial económico preliminar y no precios finales de venta.

Finalmente, el desarrollo estuvo condicionado por el tiempo disponible para la memoria y por el carácter confidencial y dinámico de parte de la información empresarial. Algunos antecedentes no pudieron incorporarse con todo su nivel de detalle, y varias decisiones dependían de áreas, autoridades o terceros cuyos plazos excedían el calendario académico. Estas condiciones limitaron la posibilidad de cerrar administrativamente las rutas propuestas, pero permitieron identificar con claridad los trabajos que deberán continuar después de la finalización de esta investigación.

En síntesis, la memoria logró estructurar, analizar y comparar las principales alternativas, pero no alcanzó la etapa de implementación integral. Las actividades pendientes registro formal, pronunciamientos ambientales, pilotos agronómicos, implementación del algoritmo y validación comercial externa constituyen la continuidad natural del proyecto y deberán abordarse antes de transformar las estimaciones obtenidas en decisiones operacionales y comerciales definitivas.

13 Anexos

13.1 Matriz de distancias

Predio	Santa Fe	Nacimiento	Pacífico	Plywood	Laja	Mulchén	Bucalemu	Coronel	Los Ángeles
Reciclaje organico (ap. Benefica) - El Guindo	57	57	80	80	64	43	46	160	25
Reciclaje organico (ap. Benefica) - El Manzano	57	57	80	80	64	43	46	160	25
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Las Lomas	57	57	80	80	64	43	46	160	25
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Santa Patricia	57	57	80	80	64	43	46	160	25
Reciclaje organico (Compos) - Rebalses	64	64	85	85	69	48	51	165	29
Reciclaje organico (ap. Benefica) - El Quillay	63	68	103	97	22	65	17	99	23
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Perales	63	68	94	97	21	65	17	99	23
Reciclaje organico (Compos) - Yahuillo	62	63	93	92	21	65	17	96	21
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Tarpellanca	63	64	103	93	22	66	18	111	22
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Los Guindos	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Reciclaje organico (Compos) - El Quillay	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
VROSS - Golondrinas	40,2	40,2	44	44	80	10,2	79,4	137	59,2
VROSS - Lapito	38,9	38,9	46,6	46,6	68,9	12,7	81,6	136	61,4
VROSS - Las Golondrinas (Compostaje)	40,2	40,2	44	44	80	10,2	79,4	137	59,2
VROSS - Miguel Boisier	40,2	40,2	44,3	44,3	80	10,2	79,4	137	59,2
VROSS - Parcelas N° 12	40,5	40,5	49,2	49,2	85,7	15,1	84,3	138	64
VROSS - San Francisco	73,9	73,9	99,9	99,9	83	63,1	68	171	47,8
VROSS - San Ignacio	70,2	70,2	106	106	25,6	69,2	12,3	129	26,4
VROSS - San Ignacio (Compostaje)	70,2	70,2	106	106	25,6	69,2	12,3	129	26,4
VROSS - Los Cipreses	78,3	78,3	104	104	91,4	67,3	72,2	175	52
VROSS - Los Gallos	60,6	60,6	50,8	50,8	69,7	14	68,3	158	48
VROSS - Santa Lucia	35,6	35,6	42	42	58	25,4	57,7	147	17,7

Continúa en la página siguiente

Predio	Santa Fe	Nacimiento	Pacífico	Plywood	Laja	Mulchén	Bucalemu	Coronel	Los Ángeles
VROSS - Malven	48,5	48,5	37,4	37,4	74	14,2	83,6	133	43,6
AddSoils - El Rosario	16,7	16,7	52	52	32	44,8	53,1	117	21,4
AddSoils - Hushiuisi	16,7	16,7	52	52	32	44,8	53,1	117	21,4
AddSoils - Los Abedules	15,8	15,8	45,3	44,7	34,6	47,7	55,9	116	29,3
Ecocorp - Quillayes	999999	999999	50	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Ecocorp - Bulnes	999999	999999	999999	999999	90	999999	999999	999999	999999
CBB - Talcahuano	999999	999999	999999	999999	138,5	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - Rapelco	24	24	57	57	68	22	76	125	56
Misión Verde - D1 - El Renacer	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D2 - El Peral I	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D3 - El Manzando PC25	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D4 - El Manzando PC28	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D5 - Mesamavida	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D6 - El Peral II	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D7 - La reserva	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D8 - Chiquimavida	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Qualitat (sogreen) - Planta la suerte	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999	999999

Tabla 21: Matriz de distancias entre predios y plantas. Fuente: Elaboración propia

13.2 Matriz de costos de valorización

Predio	Dregs y grits	Cenizas Calderas	Arenas Caldereras	Ceniza precipitadores	Lodo de cal	Rechazo de cal
VROSS - San Ignacio (Compostaje)	999999	999999	999999	999999	999999	999999
VROSS - Los Cipreses	999999	999999	999999	999999	0,39	999999

Continúa en la página siguiente

Predio	Dregs y grits	Cenizas Calderas	Arenas Calderas	Ceniza precipitadora	Lodo de cal	Rechazo de cal
VROSS - Los Gallos	999999	999999	999999	999999	0,39	999999
VROSS - Santa Lucia	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
VROSS - Malven	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
AddSoils - El Rosario	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	999999
AddSoils - Hushiuisi	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	999999
AddSoils - Los Abedules	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Ecocorp - Quillayes	0,216	999999	999999	999999	999999	0,216
Ecocorp - Bulnes	999999	999999	999999	999999	999999	999999
CBB - Talcahuano	999999	0,1	0,1	999999	999999	999999
Misión Verde - Rapelco	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Misión Verde - D1 - El Renacer	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D2 - El Peral I	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D3 - El Manzando PC25	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D4 - El Manzando PC28	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D5 - Mesamavida	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D6 - El Peral II	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D7 - La reserva	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D8 - Chiquimavida	999999	999999	999999	999999	999999	999999
Qualitat (sogreen) - Planta la suerte	999999	999999	999999	999999	999999	999999

Tabla 22: Matriz de costos de valorización por predio y residuo (parte A). Fuente: Elaboración propia

Predio	Corteza Sucia	Aserrín	Lodos de Madera	Lodo Efluentes	Chapa fenólica
VROSS - San Ignacio (Compostaje)	0,39	0,39	999999	999999	999999
VROSS - Los Cipreses	999999	999999	999999	999999	999999

Continúa en la página siguiente

Predio	Corteza Sucia	Aserrín	Lodos de Madera	Lodo Efuentes	Chapa fenólica
VROSS - Los Gallos	999999	999999	999999	999999	999999
VROSS - Santa Lucia	0,39	999999	0,39	0,39	0,39
VROSS - Malven	0,39	999999	0,39	0,39	0,39
AddSoils - El Rosario	999999	999999	999999	0,3	999999
AddSoils - Hushiuisi	999999	999999	999999	0,3	999999
AddSoils - Los Abedules	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Ecocorp - Quillayes	999999	999999	999999	999999	999999
Ecocorp - Bulnes	999999	999999	999999	999999	999999
CBB - Talcahuano	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - Rapelco	0,3	0,3	0,3	0,3	999999
Misión Verde - D1 - El Renacer	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D2 - El Peral I	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D3 - El Manzando PC25	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D4 - El Manzando PC28	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D5 - Mesamavida	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D6 - El Peral II	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D7 - La reserva	999999	999999	999999	999999	999999
Misión Verde - D8 - Chiquimavida	999999	999999	999999	999999	999999
Qualitat (sogreen) - Planta la suerte	999999	999999	999999	999999	999999

Tabla 23: Matriz de costos de valorización por predio y residuo (parte B). Fuente: Elaboración propia

13.3 Matriz de restricciones de capacidad

Tabla 24: Capacidad autorizada por predio. Fuente: Elaboración propia

Predio	Capacidad (ton/mes)
Reciclaje organico (ap. Benefica) - El Guindo	1.500
Reciclaje organico (ap. Benefica) - El Manzano	1.500
Reciclaje organico (ap. Benefica) - El Quillay	1.500
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Las Lomas	1.500
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Los Guindos	0
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Perales	0
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Santa Patricia	1.500
Reciclaje organico (ap. Benefica) - Tarpellanca	1.500
Reciclaje organico (Compos) - Rebalses	870
Reciclaje organico (Compos) - Yahuilto	870
Reciclaje organico (Compos) - El Quillay	0
VROSS - Golondrinas	0
VROSS - Lapito	1.500
VROSS - Las Golondrinas (Compostaje)	400
VROSS - Miguel Boisier	1.500
VROSS - Parcelas N° 12	1.500
VROSS - San Francisco	1.500
VROSS - San Ignacio	1.500
VROSS - San Ignacio (Compostaje)	400
VROSS - Los Cipreses	1.500
VROSS - Los Gallos	1.500
VROSS - Santa Lucia	1.500
VROSS - Malven	1.500
AddSoils - El Rosario	1.500
AddSoils - Hushiuisi	1.500
AddSoils - Los Abedules	1.500
Ecocorp - Quillayes	4.200
Ecocorp - Bulnes	0
CBB - Talcahuano	1.500
Misión Verde - Rapelco	3.000
Misión Verde - D1 - El Renacer	0
Misión Verde - D2 - El Peral I	0
Misión Verde - D3 - El Manzando PC25	0
Misión Verde - D4 - El Manzando PC28	0
Misión Verde - D5 - Mesamavida	0
Misión Verde - D6 - El Peral II	0
Misión Verde - D7 - La reserva	0

13.4 Matriz de generación

Planta	Dregs y grits	Cenizas Calderas	Arenas Caldereras	Ceniza precipitadores	Lodo de cal	Rechazo de cal
Laja	850	972	214	235	46	0
Pacífico	6788	0	0	0	667	100
Santa Fe	4006	3125	0	835	2742	0
Mulchén	0	83	52	0	0	0
Nacimiento	0	72	61	0	0	0
Plywood	0	0	0	0	0	0
Bucalemu	0	659	2	0	0	0
Coronel	0	0	0	0	0	0
Los Ángeles	0	0	0	0	0	0

Tabla 25: Matriz de generación de residuos por planta (parte A). Fuente: Elaboración propia

Planta	Corteza Sucia	Aserrín	Lodos de Madera	Lodo Efuentes	Chapa fenólica
Laja	0	0	0	0	0
Pacífico	150	0	0	0	0
Santa Fe	0	0	0	0	0
Mulchén	210	0	0	0	0
Nacimiento	0	0	0	0	0
Plywood	0	40	0	0	0
Bucalemu	0	0	0	0	0
Coronel	0	0	0	0	0
Los Ángeles	0	0	0	0	0

Tabla 26: Matriz de generación de residuos por planta (parte B). Fuente: Elaboración propia

13.5 Código de optimización de distribución de carga de caso base en R

Listing 1: Función de optimización en R

```
1 optimizar_residuos = function(matriz_distancias, matriz_costos_  
  valorizacion, matriz_generacion, matriz_restricciones_capacidad){  
2  
3  distancias = matriz_distancias %>%  
4    pivot_longer(cols = 2:ncol(matriz_distancias), names_to = "Planta",  
    values_to = "distancia")  
5  
6  costos_valorizacion = matriz_costos_valorizacion %>%  
7    pivot_longer(cols = 2:ncol(matriz_costos_valorizacion), names_to = "  
    Residuo", values_to = "costo_uf_ton") %>%  
8    filter(!is.na(costo_uf_ton))  
9  
10  matriz_combinaciones = expand.grid(unique(distancias$Predio), unique(  
    distancias$Planta), unique(costos_valorizacion$Residuo)) %>%  
11    dplyr::rename(Predio = Var1, Planta = Var2, Residuo = Var3) %>%  
12    left_join(distancias, by = c("Predio", "Planta")) %>%  
13    left_join(costos_valorizacion, by = c("Predio", "Residuo")) %>%  
14    mutate(index = row_number())  
15  
16  costo_UF_por_km_ton = 0.1278/30  
17  objetivo = matriz_combinaciones %>%  
18    mutate(costo_distancia = distancia * costo_UF_por_km_ton) %>%  
19    mutate(costo_por_tonelada = costo_distancia + costo_uf_ton)  
20
```

```
21  n_variables = nrow(objetivo)
22  n_restricciones_capacidad = nrow(matriz_restricciones_capacidad)
23  n_restricciones_generacion = (ncol(matriz_generacion)-1) * nrow(matriz
    _generacion)
24
25  print(paste0("n_variables:_", n_variables))
26  print(paste0("n_restricciones_capacidad:_", n_restricciones_capacidad)
    )
27  print(paste0("n_restricciones_generacion:_", n_restricciones_
    generacion))
28
29  f.con_1 = matrix(0, nrow = n_restricciones_capacidad, ncol = n_
    variables)
30  f.con_2 = matrix(0, nrow = n_restricciones_generacion, ncol = n_
    variables)
31
32  for (k in 1:n_restricciones_capacidad){
33    indices = objetivo %>% filter(Predio == matriz_restricciones_
    capacidad$Predio[k]) %>% pull(index)
34    for (i in 1:n_variables){
35      if (i %in% indices){
36        f.con_1[k,i] = 1
37      } else {
38        f.con_1[k,i] = 0
```

```
39     }
40
41 }
42
43 generacion = matriz_generacion %>%
44   pivot_longer(cols = 2:ncol(matriz_generacion), values_to = "ton",
45     names_to = "Residuo")
46
47 for (i in 1:nrow(generacion)){
48   planta = generacion$Planta[i]
49   residuo = generacion$Residuo[i]
50   x = objetivo %>% filter(Planta == planta, Residuo == residuo) %>%
51     pull(index)
52   for (k in 1:n_variables){
53     if (k %in% x){
54       f.con_2[i,k] = 1
55     } else {
56       f.con_2[i,k] = 0
57     }
58   }
59 }
60
61 f.con = rbind(f.con_1, f.con_2)
```

```
61 const.dir <- c(  
62   rep("<=", nrow(matriz_restricciones_capacidad)),  
63   rep("=", nrow(generacion))  
64 )  
65  
66 rhs = c(matriz_restricciones_capacidad$`Capacidad (ton/mes)`,  
        generacion$ton)  
67  
68 solucion <- lp(  
69   direction = "min",  
70   objective.in = objetivo$costo_por_tonelada,  
71   const.mat = f.con,  
72   const.dir = const.dir,  
73   const.rhs = rhs  
74 )  
75  
76 objetivo$solucion = solucion$solucion  
77  
78 base = objetivo %>%  
79   mutate(costo = solucion * costo_por_tonelada) %>%  
80   filter(solucion != 0)  
81  
82 return(base)  
83 }
```

13.6 Distribución de carga actual de valorizadores

VALORIZADOR	COSTO VALORIZAR (UF/TON)	COSTO DISTANCIA (UF/TON)	COSTO POR TONELADA (UF/TON)	CARGA ENVIADA (TON/MES)	COSTO TOTAL (UF/MES)
Addsoils	0,3	Laja: 0,136 Santa Fe: 0,071	Laja: 0,436 Santa Fe: 0,371	Laja: 235 Santa Fe: 2765	1129
CBB	0,1	Laja: 0,00059	Laja: 0,10059	1186	120
Ecocorp	0,216	Pacífico: 0,213	Pacífico: 0,429	Pacífico: 4200	1802
Misión verde	0,3	Santa fe: 0,102	Santa fe: 0,402	3000	1207
Reciclaje orgánico	0,250	Santa fe: 0,243 Laja: 0,094 Nacimiento: 0,243 Mulchén: 0,183 Bucalemu: 0,072	Santa fe: 0,493 Laja: 0,344 Maderas: 0,493 Mulchén: 0,433 Bucalemu: 0,322	Santa fe: 4943 Laja: 896 Maderas: 133 Mulchén: 135 Bucalemu: 661	3081
Vross	Pacífico: Inorgánico: 0,392 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 0,092	Pacífico: Inorgánico: 0,18 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 0,19	Pacífico: Inorgánico: 0,58 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 0,28	Pacífico: Inorgánico: 3355 Mulchén/Plywood/Pacífico Orgánico: 400	1971
				21.909 Ton/mes	9.308 UF/mes 413.689 USD/año

Figura 30: Distribución de carga actual a valorizadores. Fuente: Elaboración propia.

15 Lista de Tablas

1	Clasificación de subproductos: enmienda, fertilizante y bioestimulantes.	32
2	Marco legal y exigencias regulatorias para subproductos comercializados como enmiendas, fertilizantes o bioestimulantes (Chile).	34
3	Esquema de la red actual de distribución de subproductos entre plantas generadoras, tipologías materiales y destinos de valorización en CMPC.	37
4	Resumen del objetivo y funcionamiento del algoritmo.	40
5	Subproductos aprobados por UDT para registro SAG.	54
6	Mezclas aprobadas por UDT para registro SAG.	54
7	Síntesis de la ruta de habilitación ante el SAG para subproductos valorizados de CMPC.	55
8	Matriz de competencias sanitarias y riesgos operacionales asociados al uso de subproductos valorizados	57
9	Síntesis de la ruta de coordinación sanitaria ante SEREMI de Salud.	58
10	Comparación actualizada de escenarios de valorización.	70
11	Mini Business Model Canvas – Venta directa B2B	72
12	Mini Business Model Canvas – Venta vía distribuidor	73
13	Mini Business Model Canvas – Socio técnico-comercial	74
14	Mini Business Model Canvas – Maquila/acondicionamiento	75
15	Mini Business Model Canvas – Consignación	76
16	Mini Business Model Canvas – Modelo híbrido por familia	77

17	Comparación de modelos de negocio con presencia de terceros para la comercialización de subproductos valorizados en CMPC.	78
18	Filtro estratégico de modelos de negocio a partir de entrevistas internas.	80
19	Ranking por planta según mejora total anual.	85
20	Resumen del GAP por residuo homologado e impacto económico anual.	87
21	Matriz de distancias entre predios y plantas. Fuente: Elaboración propia	95
22	Matriz de costos de valorización por predio y residuo (parte A). Fuente: Elaboración propia	96
23	Matriz de costos de valorización por predio y residuo (parte B). Fuente: Elaboración propia	97
24	Capacidad autorizada por predio. Fuente: Elaboración propia	98
25	Matriz de generación de residuos por planta (parte A). Fuente: Elaboración propia .	99
26	Matriz de generación de residuos por planta (parte B). Fuente: Elaboración propia .	99

16 Lista de Figuras

1	Benchmarking ambiental de Chile frente al promedio OCDE. Fuente: Elaboración propia	14
2	Dinamismo y Volatilidad del PIB Forestal (2018-2023). Fuente: Banco Central de Chile.	17
3	Composición del PIB forestal por actividad. Fuente: Banco Central de Chile.	17
4	Brecha crítica de valorización de residuos en el contexto nacional. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente de Chile	26
5	Participación principales productos exportados enero-noviembre 2025. Fuente: INFOR, con base en datos del Servicio Nacional de Aduanas.	28
6	Evolución del precio de exportación e pulpas exportadas en Chile. Fuente: INFOR, en base a información del Servicio Nacional de Aduanas	29
7	Distribución de la oferta actual de subproductos por planta generadora, con concentración predominante en Santa Fe y Pacífico. Fuente: Elaboración propia	36
8	Factores estructurales que condicionan el costo actual de disposición valorizada: distancia, saturación de predios, tarifas de entrada y tipo de residuo. Fuente: Elaboración propia	39
9	Escenarios de diversificación de valorizadores y cierre de brechas para venta. Fuente: Elaboración propia.	43
10	Transición regulatoria desde subproducto valorizable hacia producto agrícola regulado. Fuente: Elaboración propia.	52

11	Requisitos críticos mínimos para el registro sectorial de subproductos como enmiendas o fertilizantes. Fuente: Elaboración propia.	53
12	Ruta de habilitación sectorial ante el SAG para subproductos valorizados de CMPC. Fuente: Elaboración propia.	56
13	Ruta preventiva de coordinación sanitaria ante SEREMI de Salud. Fuente: Elaboración propia.	59
14	Desglose de costos totales del caso base. Fuente: Elaboración propia	60
15	Resumen de caso de tres valorizadores (predios externos). Fuente: Elaboración propia.	62
16	Resumen de caso de dos valorizadores (predios externos). Fuente: Elaboración propia.	63
17	Resumen de caso de aplicación en predios propios. Fuente: Elaboración propia. . .	64
18	Resumen de caso de aplicación en predio adyacente a planta Santa Fe. Fuente: Elaboración propia.	65
19	Resumen de caso de aplicación en predio adyacente a planta Laja. Fuente: Elaboración propia.	66
20	Resumen de caso de aplicación en predio adyacente a planta Bucalemu. Fuente: Elaboración propia.	67
21	Resumen de caso CBB. Fuente: Elaboración propia.	68
22	Quinto de caso de ahorro monetarios (caso Qualitat). Fuente: Elaboración propia. .	69
23	Resumen de metodología de cálculo de precios equivalentes de subproductos calóricos. Fuente: Elaboración propia.	82

24	Conversión de precio base de Soprocal a precio CMPC equivalente. Fuente: Elaboración propia.	82
25	Gráfico comparativo de valor neutralizante CaCO_3 y humedad por subproducto. Fuente: Elaboración propia.	82
26	Gráfico comparativo de valor neutralizante CaCO_3 y humedad por subproducto. Fuente: Elaboración propia.	83
27	Comparación entre costo actual pagado por CMPC y precio nuevo estimado por tonelada de subproducto. Fuente: Elaboración propia.	84
28	Desempeño económicos de los mejores subproductos. Fuente: Elaboración propia.	85
29	Generación comercializable potencial versus generación actual de subproductos. . .	86
30	Distribución de carga actual a valorizadores. Fuente: Elaboración propia.	104

Referencias

Anasac Chile S.A. (2026a). Etiqueta Fosfight [Usado para verificar presencia de Anasac en fertilizantes líquidos]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://anasac.cl/agropecuario/wp-content/uploads/sites/2/2025/02/Etiqueta-Fosfight-web-marca-de-agua.pdf>

Anasac Chile S.A. (2026b). Release LPH [Usado para verificar presencia de Anasac en enmiendas orgánicas y bioestimulantes]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde https://anasac.cl/agropecuario/wp-content/uploads/sites/2/2025/02/RELEASE-LPH_ET.WEB_20240801.pdf

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021). *Ley N° 21.349: Establece normas sobre composición, etiquetado y comercialización de los fertilizantes y bioestimulantes* [Promulgada el 9 de junio de 2021 y publicada el 26 de junio de 2021]. Consultado el 14 de marzo de 2026, desde <https://www.bcn.cl/leychile/Navegar?idNorma=1162023>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023). *Decreto 61: Aprueba reglamento de la Ley N° 21.349, que establece normas sobre composición, etiquetado y comercialización de los fertilizantes y bioestimulantes* [Publicado el 28 de agosto de 2023]. Consultado el 14 de marzo de 2026, desde <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1195412>

- Biodiversa. (2026). *Gestión de Biosólidos* [Sitio oficial consultado para identificar encaje como integrador técnico de aplicación]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://www.biodiversa.com/gestion-de-biosolidos/>
- Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). A Literature and Practice Review to Develop Sustainable Business Model Archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
- Boons, F., & Lüdeke-Freund, F. (2013). Business Models for Sustainable Innovation: State-of-the-Art and Steps Towards a Research Agenda. *Journal of Cleaner Production*, 45, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.007>
- CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones. (2025). Escenario contrato de valorización de residuos pulp + maderas [Presentación interna de antecedentes y evolución del modelo de valorización, julio de 2025].
- CMPC. Subgerencia Residuos, Emisiones y Obligaciones. (2026). Documentación interna de subgerencia SGREO CMPC.
- Coagra. (2026a). *Coagra* [Sitio oficial consultado para identificar rol como distribuidor agrícola]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://coagra.cl/>

Coagra. (2026b). *Nutrición Vegetal* [Sitio oficial consultado para verificar oferta de bioestimulantes y nutrición vegetal]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://coagra.cl/foliares-y-bioestimulantes/>

Copeval. (2026a). *Mejoradores de Suelo* [Sitio oficial consultado para identificar oferta de mejoradores de suelo y encaje como distribuidor agrícola]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://copeval.cl/mejoradores-de-suelo/>

Copeval. (2026b). *Nutrición Vegetal* [Sitio oficial consultado para identificar categorías de bioestimulantes y correctores]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://copeval.cl/nutricin-vegetal/>

Empresas CMPC S.A. (2025). *Reporte Integrado 2024*. CMPC.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Global forest products facts and figures 2024*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd8005en>

Geissdoerfer, M., Vladimirova, D., & Evans, S. (2018). Sustainable Business Model Innovation: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 198, 401-416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.240>

Hortifrut. (2026). *Company* [Sitio oficial consultado para validar a Hortifrut como cliente agrícola/corporativo potencial]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://investor.hortifrut.com/en/company/>

Instituto Forestal. (2024). *Anuario Forestal 2024* (Boletín Estadístico No. 199). INFOR.

Instituto Nacional de Estadísticas. (2026). *Estadísticas del medio ambiente: Informe anual 2025*. INE.

Kahler González, C., Gysling Caselli, J., Pardo Velásquez, E., Celis Cantillana, B., & Hernández Pineda, J. (2025, diciembre). *Mercado Forestal* (Boletín No. 103) (Versión digital, ISSN 2452-4336). Instituto Forestal. Santiago, Chile. <http://wef.infor.cl/>

Lüdeke-Freund, F., Gold, S., & Bocken, N. M. P. (2019). A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 36-61. <https://doi.org/10.1111/jiec.12763>

Martínez y Valdivieso. (2026a). *Especialidades de Suelo* [Sitio oficial consultado para validar presencia en especialidades de suelo]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://www.myv.cl/HOME/NUTRICION-VEGETAL-Y-BIOESTIMULANTES/NUTRICION-VEGETAL-Y-BIOESTIMULANTES/ESPECIALIDADES-DE-SUELO/c/200001000110000004>

Martínez y Valdivieso. (2026b). *Nutrición Vegetal y Bioestimulantes* [Sitio oficial consultado para identificar encaje como canal técnico especializado]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://www.myv.cl/HOME/NUTRICION-VEGETAL-Y-BIOESTIMULANTES/c/20000>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2024). *Informe consolidado de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC), 2022*. Ministerio del Medio Ambiente.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile 2024. Aspectos destacados*. OECD.

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. John Wiley & Sons.

Poblete Hernández, P., & Hernández Pineda, J. (2025). *Exportaciones Forestales: Enero–noviembre 2025* (Boletín estadístico) (Versión digital, ISSN 0717-7003). Instituto Forestal. Santiago, Chile. <http://wef.infor.cl/>

Resiter. (2026a). *Economía Circular* [Sitio oficial consultado para verificar foco en valorización y comercialización]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://www.resiter.com/economia-circular/>

Resiter. (2026b). *Productos* [Sitio oficial consultado para verificar comercialización de productos provenientes de valorización]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://www.resiter.com/productos/>

Servicio de Evaluación Ambiental. (2026). *Guías de descripción de proyecto* [Consultado el 28 de marzo de 2026]. <https://www.sea.gob.cl/guias-de-descripcion-de-proyecto>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2024). *Anuario de la Minería de Chile 2023*. SERNA-GEOMIN.

Sistema Nacional de Información Ambiental. (2025). *Capítulo 6: Economía circular*. SINIA.

Soquimich Comercial S.A. (2018). Memoria Anual 2017 [Usado para respaldar capacidad de planta de mezclas solubles y rol en nutrición vegetal]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://sqmc.cl/wp-content/uploads/2022/06/memoria-sqm-2017-agosto-2018.pdf>

Soquimich Comercial S.A. (2022). Memoria Anual 2021 [Usado para respaldar objeto social con formulación, mezclado, consignación y distribución]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde https://sqmc.cl/wp-content/uploads/2022/06/memoria_2021_sqmc.pdf

Soquimich Comercial S.A. (2026). *Reseña Histórica* [Sitio oficial consultado para validar a SQMC como actor relevante de nutrición vegetal]. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://sqmc.cl/resena-historica/>



Strategyzer. (2026, enero). *The Business Model Canvas* [Consultado el 28 de marzo de 2026].

<https://www.strategyzer.com/library/the-business-model-canvas>