



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

ESTRATEGIA DE LA INDUSTRIA CEMENTERA PARA ADAPTACIÓN A EXIGENCIAS TRIBUTARIAS DE CARBONO NEUTRALIDAD

DIANA TERESA JESÚS ARNDT GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA: ALEX GODOY FAÚNDEZ

PROFESOR CO-GUÍA: RICARDO JAVIER BUSTOS SALVAGNO

PROFESOR INTEGRANTE 1: DIEGO RIVERA SALAZAR

PROFESOR INTEGRANTE 2: HÉCTOR VALDEZ GONZÁLEZ

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

SANTIAGO- CHILE

2022



ESTRATEGIA DE LA INDUSTRIA CEMENTERA PARA ADAPTACIÓN A EXIGENCIAS TRIBUTARIAS DE CARBONO NEUTRALIDAD

POR: DIANA TERESA JESÚS ARNDT GONZÁLEZ

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

PROFESOR GUÍA: ALEX GODOY FAÚNDEZ

PROFESOR CO-GUÍA: JAVIER BUSTOS SALVAGNO

PROFESOR INTEGRANTE 1: DIEGO RIVERA SALAZAR

PROFESOR INTEGRANTE 2: HÉCTOR VALDES GONZÁLEZ

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Gestión de la Sustentabilidad

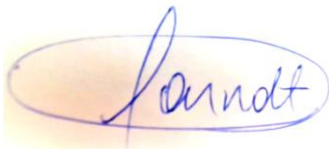
Junio, 2022

Santiago, Chile

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: Estrategia de la Industria Cementera para adaptación a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.



Diana Teresa Jesús Arndt González

*A Dios y a la santísima Virgen María
por bendecirme cada día, acompañarme y protegerme
en este sorprendente camino llamado vida*

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mi familia, principalmente a mi Madre Fresia por su amor incondicional, por apoyarme siempre y ser una guía en muchas de las decisiones que he tomado en mi vida. A mi Hermana Ingrid por su apoyo, compañía, entretención y por sobre todo amistad.

Asimismo, quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Industria del Cemento, de la cual actualmente formo parte como profesional en materias de sostenibilidad y medio ambiente. Adicionalmente quiero agradecer a instituciones clave que brindaron importante información para el desarrollo de este estudio, tales como la Federación Iberoamericana del Cemento (FICEM), el Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile (ICH) y a la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC).

De igual forma quiero agradecer profundamente a mis profesores Alex Godoy Faúndez y Javier Bustos Salvagno, quienes fueron mi constante guía durante el desarrollo de la presente investigación. Tampoco puedo dejar de mencionar a todos los profesionales que fueron entrevistados para el desarrollo de este estudio, por lo que muchas gracias a: Augusto Holmberg, Carlos Barría, Carlos Benavides, Constanza Montes, Cristian Mosella, Marina Hermosilla, Rodrigo García y Juan Escalona.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis compañeros del Magíster de Gestión de la Sustentabilidad, por todas las gratificantes experiencias académicas vividas durante estos dos últimos años, especialmente a mi gran amiga Valeria Proboste, por acompañarme en este proceso y también a Lissette Carvajal, Alejandra Salazar e Ignacio Numhauser

ESTRATEGIAS DE LA INDUSTRIA CEMENTERA PARA ADAPTACIÓN A EXIGENCIAS TRIBUTARIAS DE CARBONO NEUTRALIDAD

Diana Arndt González

Bajo la supervisión del Profesor Alex Godoy Faúndez en la Universidad del
Desarrollo de Chile

Resumen

Prontamente la industria cementera se encontrará dentro de los sujetos afectos a pago de impuesto verde por emisiones de CO₂ generadas en sus respectivos hornos de clinker. Por otro lado, actualmente se encuentran en desarrollo otras normativas, las cuales implicarán la entrada en vigencia de instrumentos de precio al carbono adicionales. Considerando esta realidad, el objetivo de la presente investigación es definir la estrategia que debe adoptar la Industria Cementera a nivel nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. Para lograr lo anterior, se ha aplicado un enfoque mixto con el objetivo de medir la implicancia económica del impuesto verde en una planta tipo con operación vigente en el país, para posteriormente recabar información con distintos expertos en la materia, sobre la operatividad futura de instrumentos de precio al carbono. Finalmente, esta investigación, en base a literatura específica junto con la recomendación experta de los entrevistados, propone en líneas generales la estrategia que debe adoptar la industria. Los principales resultados obtenidos, es que la entrada en vigencia del impuesto verde representa un factor importante que afecta la rentabilidad de las empresas cementeras a nivel nacional. Existirán nuevos instrumentos de precio al carbono que entrarán en vigencia años próximos. La industria cementera requiere una estrategia de descarbonización para garantizar la sostenibilidad de sus operaciones.

Palabras clave: Impuestos verdes, cemento, clinker, precio al carbono, descarbonización.

HIGHLIGHTS

ESTRATEGIAS DE LA INDUSTRIA CEMENTERA PARA ADAPTACIÓN A EXIGENCIAS TRIBUTARIAS DE CARBONO NEUTRALIDAD

Diana Teresa Jesús Arndt González

- Estrategia de descarbonización que debe adoptar la Industria Cementera a nivel nacional.
- Investigación realizada con un enfoque mixto para las plantas de cemento con horno de clinker en operación.
- Estudio en contexto nacional complementado con hallazgos internacionales validados por expertos.
- Si la Industria del Cemento no modifica su forma de operar, no será sostenible hacia el año 2050.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
1.1. BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA	2
1.1.1. <i>Cambio Climático</i>	2
1.1.2. <i>Emisiones de CO2 de la Industria Cementera</i>	2
1.1.3. <i>Acuerdo de París</i>	3
1.1.4. <i>NDC Chile</i>	4
1.1.5. <i>Ley Marco Cambio Climático</i>	6
1.1.6. <i>Instrumentos de Precio al Carbono</i>	8
1.1.7. <i>Implementación de Impuesto Verde en Chile</i>	10
1.1.8. <i>Proyecto de Modificación Tributaria, Impuesto Verde y su Influencia en la Industria Cementera en Chile</i>	12
1.1.9. <i>Valor Económico de la Industria del Cemento a Nivel Nacional</i>	13
1.2. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO.....	15
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.3.1. <i>Objetivos específicos</i>	16
1.4. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	17
1.4.1. <i>Implicancia Económica del Impuesto Verde en la Industria Cementera Nacional</i>	18
1.4.2. <i>Identificación y régimen de Implementación de otros Instrumentos de Precio al Carbono</i>	19
1.4.3. <i>Estrategia de Descarbonización</i>	22
1.5. ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTE TRABAJO	23
2. INFORMACIÓN Y RESULTADOS	24
2.1. IMPLICANCIA ECONÓMICA ENTRADA EN VIGENCIA DEL IMPUESTO VERDE	24
2.1.1. <i>Línea de Base Generación de CO2</i>	25
2.1.2. <i>Estimación de Recaudación por Concepto de Pago de Impuesto Verde</i>	27
2.1.3. <i>Impacto en EBITDA</i>	30
2.2. IDENTIFICACIÓN Y RÉGIMEN DE IMPLEMENTACIÓN DE OTROS INSTRUMENTOS DE PRECIO AL CARBONO.....	33
2.2.1. <i>Resultados Entrevistas Semiestructuradas</i>	33
2.3. ESTRATEGIA DE DESCARBONIZACIÓN	42
2.3.1. <i>Resultados Entrevistas Semiestructuradas</i>	42
2.3.2. <i>Revisión de Literatura Específica</i>	47
2.3.3. <i>Propuesta de Estrategia de Descarbonización</i>	52
● MEDIDA	58
● DESCRIPCIÓN	58
3. ARTÍCULO.....	67
4. CONCLUSIONES GENERALES	65

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
6. ANEXOS.....	72
ANEXO 1 PAUTA DE ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA.....	72
ANEXO 2 DATOS ASOCIADOS A PRODUCCIÓN DE CLINKER Y CEMENTO DE HORNOS DE CLINKER OPERATIVOS EN CHILE ...	75
ANEXO 3 ESTIMACIÓN DE PAGO DE IMPUESTO VERDE	78
ANEXO 4 CÁLCULOS IMPACTO EN EBITDA.....	80
ANEXO 5 LISTADO DE ENTREVISTADOS.....	83
ANEXO 6 LISTADO DE PAPERS ECRA CSI POR EJE DE REDUCCIÓN DE CO2 Y POTENCIAL DE REDUCCIÓN	85
ANEXO 7 CONSENTIMIENTOS INFORMADOS DE PARTICIPACIÓN	91

INTRODUCCIÓN

La industria del cemento es altamente necesaria para garantizar el desarrollo económico y social del país, y por lo mismo debe adaptar su funcionamiento con un horizonte bajo en carbono, con el objetivo de alinearse a las nuevas políticas medio ambientales en la materia.

Considerando la modificación a la legislación tributaria del 23 de agosto de 2018, la cual identifica al impuesto verde como único instrumento tributario aplicable a la industria para alcanzar el objetivo de la descarbonización de sus operaciones, es necesario que la Industria Cementera Nacional establezca una estrategia de descarbonización, con el objetivo de hacer frente a las nuevas disposiciones tributarias asociadas, las cuales si no se gestionan correctamente pueden llevar a la industria a una serie de complicaciones económicas que eventualmente pueden conducir al cierre de hornos productores de clinker dentro del país. Posteriormente, esta consecuencia puede desencadenar efectos negativos al sector de construcción y vivienda principalmente.

La presente investigación tiene como objetivo identificar el impacto económico que representa el pago por concepto de impuesto verde, además de identificar otros escenarios de instrumentos de precio al carbono que eventualmente comenzarán a regir en el país en los próximos años. Finalmente, una vez conocidos los antecedentes anteriormente mencionados, este trabajo realiza una propuesta general de las acciones que debería contener una Estrategia de Descarbonización de la Industria, con el objetivo de no dejar de operar dentro del territorio y realizarlo con una menor huella de carbono.

1.1. Breve discusión de la literatura

1.1.1. Cambio Climático

El cambio climático, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) es la "importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más)", fenómeno que se ha atribuido al aumento en la concentración de GEI de origen antropogénico (CO₂eq, Metano, entre otros) en la atmósfera, generando así un aumento en la temperatura media global de la superficie terrestre denominado "Calentamiento Global" (IPCC , 2013). A partir de ello y de acuerdo a una serie de proyecciones trabajadas por el IPCC, los distintos países han relevado la importancia de la acción climática global, lo cual permea a distintos sectores industriales, entre ellos la Industria del Cemento.

1.1.2. Emisiones de CO₂ de la Industria Cementera

En el año 2014 la producción mundial de cemento emitió aproximadamente 3 GTon de CO₂, lo que corresponde al 7% del total mundial. A nivel mundial, se proyecta que la demanda de cemento seguirá aumentando y sería un 20% más alta que la actual para 2050 en ausencia de esfuerzos para optimizar su uso en edificios y construcción (Science Based Targets initiative SBTi, 2022).

Las emisiones de CO₂ de la fabricación del cemento, son resultado de dos actividades principalmente:

- Combustión de combustible para calentar los hornos de clinker, en donde la calcinación se realiza en una condición superior a los 1.600 °C. Esto representa

aproximadamente el 40% de las emisiones de CO₂. Actualmente, los productores de cemento, encienden los hornos con una variedad de combustibles, entre ellos carbón, coque, biomasa, residuos, entre otros, los cuales son elegidos en base a disponibilidad y precio.

- Calcinación del carbonato de calcio, proceso que consiste en calentar la piedra caliza molida, una de las principales materias primas del cemento. La calcinación representa aproximadamente un 60% de las emisiones de CO₂ generadas, y es un proceso que se realiza a una temperatura mayor a los 1.600 °C, que implica una transformación química desde carbonato de calcio (CaCO₃) en óxido de calcio (CaO) y CO₂. Hay pocas opciones para reducir las emisiones de CO₂ de este proceso y tiene ciertas limitaciones.

Según la Hoja de Ruta de FICEM, las emisiones directas de CO₂ por tonelada de clínker producido en Chile en el año 2014 fueron de 893 kg CO₂/ton clínker, 6% encima del promedio mundial de 842 kg CO₂/ton clínker (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2019). Considerando lo anterior, las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento fueron de 581 kg CO₂/ton cemento, 10% bajo del promedio mundial de 637 kg CO₂/ton cemento, según el GNR. Este resultado, se explica principalmente por el bajo contenido de clínker en el cemento chileno entre los más bajos del mundo. Esto se debe principalmente al hecho de que no solamente Chile dispone de materias de remplazo al clínker como las escorias de alto horno, las cenizas, o la puzolana natural, sino también al hecho de que la industria cementera comenzó hace muchos años a acostumbrar el mercado a estos tipos de cementos con adiciones y bajo contenido de clinker (Cementis, 2020).

1.1.3. Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21 en

París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2,0 preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales.

Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo. El Acuerdo de París es un hito en el proceso multilateral del cambio climático porque, por primera vez, un acuerdo vinculante hace que todos los países se unan en una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos (Naciones Unidas, 2015).

El tratado funciona en un ciclo de cinco años de medidas climáticas cada vez más ambiciosas llevadas a cabo por los países. En 2020, los países presentaron sus planes de acción climática conocidos como contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés). Allí los países comunican las medidas que tomarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Asimismo, los países comunican en dichas contribuciones las acciones que tomarán para crear resiliencia y adaptarse a los efectos del aumento de las temperaturas (Naciones Unidas, 2015).

1.1.4. NDC Chile

Chile, al igual que todas las Partes que han suscrito el Acuerdo de París, debe implementar las acciones necesarias para cumplir con los compromisos adquiridos en su NDC, y así transitar hacia un desarrollo inclusivo y sostenible. Estas contribuciones son los principales instrumentos que guían la acción climática en la búsqueda por detener el aumento de la temperatura promedio global, de aumentar la resiliencia del planeta, y de movilizar inversiones públicas y privadas en la senda

de un desarrollo sostenible, que considere variables ambientales, sociales y económicas de manera equilibrada (Contribución Nacional Determinada a Nivel Nacional NDC, 2020).

Desde 2015, en que se presentó la primera NDC de Chile, se ha avanzado de manera sustantiva en el desarrollo de la institucionalidad, de las políticas y de las capacidades en materia de cambio climático.

Para actualizar la NDC, se ha considerado la evidencia científica como un sólido sustento para las políticas y la acción climática, la cual indica que la influencia humana en el sistema climático es inequívoca y va en aumento; y que sus impactos se observan en todos los continentes y océanos. En particular, el “Reporte Especial de Calentamiento Global de 1,5°C”, indica que el calentamiento ya alcanza 1°C, y con la tasa actual de emisiones de GEI los 1,5°C se alcanzarían entre el 2030 y el 2052; también pone en evidencia los impactos que se producirían en los ecosistemas, la salud humana y el bienestar al limitar los impactos que tendría un calentamiento de 1,5°C, comparado con 2°C sobre los niveles pre-industriales; y hace un llamado a la urgencia de aumentar la ambición en materia de acción climática (IPCC , 2018).

Por otra parte, la participación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de Chile, en el total de emisiones a nivel mundial, es de aproximadamente 0,25% al 2016. El promedio mundial de emisiones de CO₂ por persona, para ese mismo año, es de 4,4 tCO₂ y según los cálculos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, Chile sobrepasa por muy poco esa cifra, con 4,7 tCO₂ por persona, y está muy por debajo del promedio de los países de la OCDE, que es de 9,2 tCO₂ por persona (Contribución Nacional Determinada a Nivel Nacional NDC, 2020). Sin embargo, es importante notar que las emisiones del país se han incrementado en un 114,7% desde 1990 y en un 20,0% desde 2007. El principal GEI emitido en 2018

fue el CO₂ (78,7%), seguido del CH₄ (12,5 %), N₂ O (6 %), y los gases fluorados (2,8 %) (SNI Chile, 2018).

Considerando lo anteriormente mencionado, la meta de mitigación que se establece en la NDC 2020, corresponde a 95 MtCO₂eq al 2030, comprometiendo además alcanzar el máximo de emisiones (año peak) al 2025, y un presupuesto de emisiones de GEI que no superará las 1.100 MtCO₂eq para el período 2020-2030. Esta meta, corresponde a un punto intermedio en el camino a la carbono neutralidad al 2050 que el Gobierno de Chile ha establecido en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático¹.

Asimismo, esta actualización de la NDC incorpora un nuevo componente de integración que contempla el rol de la economía circular, como elemento que contribuye de forma integral a enfrentar tanto las causas como los efectos e impactos del cambio climático. Esto claramente representa un esfuerzo por avanzar en una visión integrada y sinérgica en el diseño e implementación de la acción climática en Chile (Contribución Nacional Determinada a Nivel Nacional NDC, 2020).

1.1.5. Ley Marco Cambio Climático

El Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático, tiene como objeto hacer frente a los desafíos del cambio climático; transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero, hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de los mismos; reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático y dar cumplimiento a los compromisos

¹ El 9 de marzo de 2022, el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático se discutió en la Sala de Sesiones del Senado, donde fue aprobado por unanimidad. El proyecto no tuvo observaciones del Presidente de la República y debiera ser promulgado como Ley de la República durante el presente año.

internacionales asumidos por el Estado de Chile en la materia (Ministerio del Medio Ambiente Chile, 2020).

El proyecto de Ley Marco Cambio Climático, en el punto 2. Instrumentos de Gestión del Cambio Climático, establece que para cumplir los objetivos de mitigación y adaptación, se deben crear una serie de instrumentos de gestión.

En esa línea, se tiene contemplada la elaboración de normas que establezcan un límite a la emisión de gases de efecto invernadero y/o un contaminante climático de vida corta, para un establecimiento, fuente emisora o agrupación de éstas. Asimismo, incorpora la posibilidad de que aquellos proyectos que reduzcan o absorban emisiones de gases de efecto invernadero, puedan obtener certificados para el cumplimiento de los límites que establezcan las normas de emisión, incentivando la transformación de los procesos productivos a tecnologías bajas en emisiones.

El Título III Normas de Emisión de Gases de Efecto Invernadero y los Certificados de Reducción de Emisiones, establece en su Artículo 13 Normas de Emisión, que el Ministerio del Medio Ambiente elaborará normas que establecerán la cantidad máxima de un gas de efecto invernadero y/o un contaminante climático de vida corta que podrá emitir un establecimiento, fuente emisora o agrupación de éstas, en función de un estándar de emisiones de referencia por tecnología, sector y/o actividad, con el objetivo de cumplir los objetivos de la Estrategia Climática de Largo Plazo y la Contribución Determinada Nacional (Centro de Derecho Ambiental Universidad de Chile, 2022).

Estas normas se establecerán mediante decreto supremo y contendrán, a lo menos, lo siguiente:

- Cantidad máxima de emisión de uno o más gases de efecto invernadero, en toneladas de dióxido de carbono equivalente y/o de uno o más contaminantes climáticos de vida corta, en la unidad de medida que determine el MMA, producida individualmente por cada fuente emisora o agrupaciones de éstas.
- El estándar de emisiones de referencia por tecnología, sector y/o actividad, que se definirá considerando las mejores técnicas disponibles y aplicando criterios de costo efectividad, equidad, responsabilidad, e impactos económicos, sociales y ambientales.
- Ámbito territorial y periodo en que se aplicará la norma de emisión.
- Sinergias con otros instrumentos de cambio climático.

Asimismo, el Proyecto de Ley en su punto 7. Mecanismos y lineamientos financieros para enfrentar el cambio climático, establece que el proyecto contempla una Estrategia Financiera de Cambio Climático, que establecerá los principales lineamientos para orientar la contribución del sector privado y público en la consolidación de una economía baja en carbono y resiliente al clima (Centro de Derecho Ambiental Universidad de Chile, 2022).

1.1.6. Instrumentos de Precio al Carbono

Inicialmente, es necesario definir qué se entiende y como se expresa una Política de Precio al Carbono. La Política establece, a través de diversos medios, un precio/costo explícito o implícito sobre las emisiones de carbono con el objetivo de generar incentivos a la reducción o mitigación de emisiones. Este cargo puede ser sobre productos, actividades, procesos o decisiones de inversión. Un precio implícito a las emisiones de carbono, puede derivarse en políticas, regulaciones u otros instrumentos que regulen el máximo de emisiones desde una fuente y los costos por su incumplimiento, mientras que un precio explícito se deriva en los mismos elementos mencionados anteriormente, pero que impongan tasas

impositivas a una unidad de emisión de carbono, el establecimiento de un precio social para la evaluación de un proyecto, o bien mediante el establecimiento de un límite máximo de emisión con una posterior subasta de permisos y la generación en donde se transen (Pizarro, 2021).

En general, los Instrumentos de Precio al Carbono (IPC), tienden a ser clasificados más que definidos según la literatura, refiriéndose a éstos como iniciativas o mecanismos que ponen un precio al carbono de manera explícita a través de permisos de emisión transables, impuestos, offsets u otros mecanismos (GIZ, 2021). Por otra parte, (Pizarro, 2021) plantea una definición más amplia, estableciendo que un IPC es un vehículo de política que se implementa a través de una infraestructura legal e institucional, que puede poner un precio sobre las emisiones de carbono en sectores y/o entidades específicas, a través de regulaciones, rutinas o prácticas.

Existen múltiples opciones de instrumentos y combinaciones de éstos (GIZ, 2021). A continuación se describen los principales:

- Impuestos: Establecen un precio al carbono a través de un cargo sobre las emisiones (impuestos aguas abajo) o respecto del contenido de carbono en los combustibles fósiles (impuestos aguas arriba). Los impuestos obligan al emisor a internalizar el costo de las emisiones, pero no establecen límites a las emisiones. En consecuencia, el impuesto está puesto en el precio, intentando reflejar un costo social por contaminar.
- Permisos de Emisión Transables (ETS): Determinan un máximo de emisiones agregadas y asignan permisos limitados a las fuentes emisoras para cumplir el máximo establecido. Los permisos asignados se pueden transar, lo que permite establecer, a través de la creación de oferta y demanda de permisos, un precio de mercado para las emisiones. En estos sistemas se fija el límite máximo de

emisiones totales que permite garantizar un resultado global para todo el sistema, independiente de quien realice el esfuerzo de reducción. En definitiva, el énfasis está puesto en la cantidad de emisiones, revelando el precio a través del mercado generado.

- Sistemas de Compensaciones de Carbono (Offsets): Corresponde a un sistema de herramientas de “intercambio” de emisiones, que permiten que una medida de reducción o absorción de emisiones de GEI en una jurisdicción o sector, compense las emisiones que no se reduzcan en otra jurisdicción o sectores. Este intercambio se realiza mediante Bonos de Carbono a las Reducciones Certificadas de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (CERs por su sigla en inglés Certified Emission Reductions) que se transan en mercados de carbono.

1.1.7. Implementación de Impuesto Verde en Chile

Los impuestos verdes se definen de la siguiente manera:

“Los impuestos verdes son un instrumento económico que grava las externalidades producidas por su emisor. Su aplicación permite que quien contamine deba internalizar el costo y retribuir a través de un pago, generando un incentivo para que la fuente contaminante incorpore los costos asociados a las externalidades que producen y los reduzcan (García Bernal, 2018)”.

Teóricamente, con la aplicación del Principio de Eficiencia Económica, el impuesto verde pretende que las empresas intenten reducir su carga tributaria a través del mejoramiento de procesos, cambio de combustibles o innovación tecnológica (Pizarro, 2021).

Inicios de los Impuestos Verdes en Chile

En Chile, desde el año 2014 y en base a lo establecido en el Artículo 8° de la Ley 20.780, existen tres impuestos que gravan las emisiones de fuentes móviles y fijas:

- A la primera venta de vehículos livianos (fuentes móviles), de acuerdo a su rendimiento urbano y sus emisiones de óxido de nitrógeno (NOx).
- A fuentes fijas y grava las emisiones a la atmósfera de los contaminantes locales de NOx, material particulado (MP), y dióxido de azufre (SO2).
- Impuesto directo a la emisión de dióxido de carbono (CO2) aplicado a las mismas fuentes fijas anteriores. Actualmente, es equivalente a 5 USD².

El modelo de impuesto verde a fuentes fijas implementado en Chile es del tipo “Aguas Abajo”, lo cual implica que “grava las emisiones generadas, no el contenido de carbono de los combustibles fósiles utilizados”. Estos operan desde el 01 de enero de 2017.

Adicionalmente, se estableció un mecanismo de cálculo y pago de compensaciones para unidades generadoras cuyo costo total unitario, siendo éste el costo variable considerado en el despacho, sea mayor o igual al costo marginal (García Bernal, 2018).

Implementación del Impuesto Verde en Chile

Los impuestos verdes a las fuentes fijas entraron en régimen el 1 de enero de 2017, mientras que su Reglamento fue publicado por el Diario Oficial el 30 de diciembre de 2016.

² Específicamente se aplica un impuesto por tonelada del contaminante “i” (CO2) emitido por la comuna “j”, en US\$/Ton.

Dentro de los actores que participan en la implementación, se encuentran la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), el Servicio de Impuestos Internos (SII) y la Tesorería General de la República (TGR). La SMA tiene la función de establecer metodologías y sistemas para monitorear, reportar y verificar emisiones afectas a impuesto; el SII recibe la declaración de los establecimientos afectos al impuesto y la TGR recibe el pago en el mes de abril del año calendario siguiente a la generación de emisiones (García Bernal, 2018).

El funcionamiento de la institucionalidad actual requirió la promulgación de la Ley 20.780/2014, su respectivo Reglamento, el Protocolo de Medición de la SMA publicado a través de Resolución Exenta N° 1.053 SMA/30 diciembre 2016, la notificación de establecimientos afectos por parte del MMA, la creación del Sistema de Registro (RETC) y el desarrollo y diseño del Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) por parte de la SMA.

Para la implementación, se identificaron 93 establecimientos afectos para el 2017 al pago de impuesto verde, que representan en su conjunto cerca del 40% de emisiones totales de CO₂eq en Chile. De los establecimientos identificados el 100% se registró, y en igual porcentaje informó su metodología de cuantificación de emisiones (Centro de Derecho Ambiental Universidad de Chile, 2022).

1.1.8. Proyecto de Modificación Tributaria, Impuesto Verde y su Influencia en la Industria Cementera en Chile

La Ley de Modernización Tributaria (Ley 21.210), introduce una serie de cambios en materia de establecimientos afectos a Impuesto Verde, junto con una nueva incorporación de sistemas de compensación. De acuerdo a esta modificación, la industria cementera se encontraría dentro de los sujetos afectos al impuesto, en

donde los montos a pagar dependerán de la metodología de cuantificación y su relación con la emisión afecta al impuesto.

Las alternativas incorporadas en la Ley de Modernización Tributaria (Ley 21.210) son las siguientes:

- a. Cambio de Umbral para fuentes afectas a Pago de Impuesto Verde: El cambio de umbral, pasando de uno establecido por características técnicas (calderas o turbinas de establecimientos con una potencia térmica total de 50 MWt) a uno de emisiones anuales (≥ 25 mil toneladas anuales de CO₂ o ≥ 100 ton de MP).
- b. Incorporación de Offsets: La incorporación de offsets (compensaciones) como instrumento complementario a los impuestos verdes. Permitiendo compensar la totalidad de las emisiones de contaminantes de carbono con reducciones certificadas del mismo contaminante.

Estas modificaciones en materia normativa junto con la pronta promulgación de la Ley Marco de Cambio Climático, representan el primer hito del inicio del proceso de descarbonización al que se requiere someter la Industria Cementera a nivel nacional.

1.1.9. Valor Económico de la Industria del Cemento a Nivel Nacional

El cemento (a través del hormigón), es el material de construcción más usado en el mundo y no se vislumbra otro tipo de material que esté a la vez disponible a este costo, volumen, y características técnicas. Debido al alto volumen de generación de CO₂ de la industria, resulta altamente relevante para la gestión del cambio climático, buscar soluciones que permitan reducir las emisiones relacionadas al uso del cemento que sean implementadas de manera gradual, considerando la

influencia que pueden tener estos cambios en las estructuras de costos para la industria y precios para los consumidores.

La industria cementera en Chile ha evolucionado en estructura, composición y modelos de negocio durante los últimos años. Desde una industria exclusivamente de producción local en los años 90 y anteriores, la industria ha mutado hacia una composición mixta donde la producción local de clinker, que enfrenta complejas estructuras de costos, ha dado lugar a la importación de clinker e incluso cemento en proporciones relevantes. En la actualidad, la producción de clinker nacional se concentra en 3 plantas integradas distribuidas a lo largo del país, las cuales se encargan de producir clinker y cemento en la misma instalación, adicionalmente en la actualidad operan una serie de estaciones de molienda de clinker importado distribuidas en el territorio nacional, principalmente cercanas a puertos, las cuales se abastecen de materias primas importadas a costos competitivos.

Según la Cámara Chilena de la Construcción, la producción nacional de cemento (plantas integradas y moliendas) fue de 4.388.207 toneladas en el 2021, en donde el contenido de clinker en cemento alcanzó un 67% (Cámara Chilena de la Construcción, 2022). Asumiendo que el factor clinker promedio informado se ha mantenido constante hasta 2021, la utilización de clinker es de aproximadamente 2,9 millones de toneladas. Esta información resulta clave, para comprender que el volumen de clinker importado es importante, considerando que Chile es un país que tiene suficiente capacidad de producción local. Las razones de por qué el costo del clinker importado es tan atractivo para la industria nacional, pudiendo llegar a ser equivalente o incluso menor al costo del clinker producido localmente, son las siguientes:

- I. El costo de producción de clinker en Chile es alto, debido al hecho que, la caliza (materia prima esencial en la producción de clinker) es

de bajo contenido en carbonato de calcio, por lo que necesita un costoso proceso para mejorar su calidad. También existe el caso que si la caliza es de buena calidad, normalmente se encuentra en zonas lejanas a las plantas, lo que induce un alto costo de transporte.

- II. Chile exporta altos volúmenes de productos mineros a Asia (Vietnam, China, Tailandia, Corea del Sur, etc.). Los barcos que llevan estas mercancías, en vez de regresar sin carga, son utilizados para el transporte de clinker desde Asia hacia Chile a bajo costo (logística reversa).

No existen estadísticas sobre el consumo de hormigón premezclado en Chile, pero en base a consultas realizadas a especialistas, se puede estimar que el 60% del cemento se vende a granel y el 40% restante en saco. Sobre el consumo anual de hormigón premezclado en Chile, este se encuentra entre 10 y 11 millones de m³. Lo anterior, representa un EBITDA que ha ido en aumento desde los 120 a 150 millones de dólares aproximadamente, entre el año 2015 y el 2021 respectivamente, considerando las tres compañías más grandes que poseen más del 85% del mercado (Comisión de Mercado Financiero, 2022).

1.2. Contribución del trabajo

Debido al proyecto de ley que moderniza la Legislación Tributaria, el cual contempla como único instrumento de precio al carbono al Impuesto Verde y en donde figuran las plantas de producción de cemento como parte de las fuentes fijas afectas debido a la generación de CO₂, la presente investigación contribuye analizando las implicancias económicas que tendrá esta nueva disposición reglamentaria en las operaciones actuales de la industria del cemento a nivel nacional.

Asimismo, y considerando que eventualmente otros instrumentos de precio al carbono entrarán en vigencia mediante otras normativas, este estudio establece, a través de juicio de distintos expertos, los escenarios de convivencia de los distintos instrumentos, para posteriormente identificar cuáles son los mecanismos de transformación operacional con los que cuenta actualmente la industria cementera, proponiendo una estrategia general para viabilizar sus operaciones en el futuro, sostenible económicamente y con menor huella de carbono, permitiendo la continuidad del modelo actual que contempla producción nacional de clinker en combinación con importación de este material desde el extranjero.

1.3. Objetivo general

Definir en base a información específica recopilada, los lineamientos generales de la estrategia de descarbonización de la Industria Cementera a Nivel Nacional, para asegurar un equilibrio económico futuro considerando las nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad.

1.3.1. Objetivos específicos

- Medir la implicancia económica del Impuesto Verde para una Empresa Cementera con operaciones vigentes en Chile.
- Identificar otros Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años en base a 3 distintos escenarios, junto con su régimen de implementación.
- Identificar los distintos ejes que debería tener una estrategia de descarbonización en la Industria del Cemento Nacional para asegurar la sostenibilidad de sus operaciones para los próximos años.

1.4. Propuesta metodológica

La presente investigación posee un enfoque mixto. Inicialmente se realiza un análisis cuantitativo del impacto económico de la entrada en vigencia del impuesto verde en la Industria del Cemento Nacional, considerando 3 distintos escenarios tarifarios. Para ello, se identifica la línea de base de generación de CO₂ anual de un horno de clinker promedio, considerando datos operacionales de los 3 hornos de clinker que actualmente operan el país. Una vez identificada la generación de CO₂, se proyectan los valores de recaudación por concepto de impuesto verde, considerando 3 distintos escenarios tarifarios de Precio al Carbono hasta el año 2050. Posteriormente, se calcula la proporción que significaría el pago de impuesto verde contra EBITDA Promedio de Industria.

En segundo lugar, se realizan entrevistas semiestructuradas a 8 expertos en materias de carbono neutralidad, instrumentos de precio al carbono, cambio climático, entre otros temas afines, con el objetivo de identificar otros instrumentos de precio al carbono que regirán en Chile en los próximos años, en base a 3 distintos escenarios basados en la Planificación Energética de Largo Plazo, junto con su respectivo régimen de implementación.

Finalmente, para identificar los ejes que debería tener una estrategia de descarbonización en la Industria del Cemento Nacional, se recoge información de las entrevistas realizadas, junto con una revisión de literatura, para identificar las distintas opciones que eventualmente tienen potencial de reducir la generación de CO₂ y de esta forma proponer una Estrategia de Descarbonización en líneas generales, considerando ejes de diseño e implementación.

1.4.1. Implicancia Económica del Impuesto Verde en la Industria Cementera Nacional

Para efectos de medir la implicancia económica del Impuesto Verde, se contempla un ejercicio de cálculo del monto de pago por concepto del mencionado impuesto, considerando una línea de base de generación de CO₂, en una operación promedio de horno de clinker.

Para efectos de definir una línea de base de generación de CO₂, se consideran los promedios de datos operacionales de los 3 principales hornos de clinker que operan en Chile, de los años 2018, 2019 y 2020. Una vez recogidos los datos operacionales, se aplica el Método B1 del Protocolo de CO₂ y Energía de la GCCA (Global Cement and Concrete Association), Versión 3.0, publicado en mayo de 2011, el cual consiste en la aplicación de factores de emisión para los procesos de calcinación de materias primas y combustión.

Con el cálculo de emisiones de CO₂ generadas por el Horno de Clinker Promedio, se procede a calcular el monto de pago por concepto de Impuesto Verde para las emisiones de CO₂ generadas en el proceso de combustión, calcinación de materias primas y el proceso global. Para ello, se consideran 3 escenarios de precio al carbono.

Finalmente, se calcula un EBITDA Promedio de Industria proyectado a 2050, en base a los EBITDA de las 3 principales empresas cementeras que operan en el país. Conocidos dichos valores, se procede a calcular la proporción que representaría el pago de impuesto verde en el EBITDA Promedio.

Las variables del ejercicio corresponden a las siguientes:

- Línea de base de emisión de CO2 anual generada en Horno de Clinker Promedio [ton CO2 eq/año]
- Recaudación económica por impuesto verde por emisión de CO2 en Hornos de Clinker [USD/Año].
- Proporción que representa el Pago de Impuesto Verde en EBITDA Promedio de Industria [%]

1.4.2. Identificación y régimen de Implementación de otros Instrumentos de Precio al Carbono

Para identificar los otros Instrumentos de Precio al Carbono y su respectivo régimen de implementación, se realizó una entrevista semiestructurada a un total de 8 expertos en materias afines al tema en estudio, considerando un total de 7 preguntas de tipo abiertas y cerradas. La pauta completa de las entrevistas realizadas se encuentra en el Anexo 1.

A continuación, se presentan las preguntas realizadas:

Etapa 1: Caracterización del presente y expectativas futuras

Pregunta N° 1: En base a las siguientes alternativas, ¿Cuál es su percepción del avance de la implementación de instrumentos de precio al carbono en Chile?

- a) Estancado
- b) Lento
- c) Avanzado Moderado
- d) Rápido Progreso

Pregunta N°2: ¿Cuáles cree que son los principales drivers para la correcta implementación de los IPC en Chile?

Pregunta N°3: Según su percepción y en base a las siguientes alternativas, ¿cuál es el IPC de mayor relevancia para que Chile pueda llegar a ser carbono neutral de aquí al 2050?

- a) Impuesto Verde
- b) Permisos de Emisión Transable
- c) Sistemas de Compensación (offset)

Pregunta N° 4: De acuerdo a lo siguiente, ¿cuál cree que será el escenario de Chile (basado en los escenarios preliminares construidos en el marco de la Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía) para los próximos años?

Escenario de Recuperación Lenta Post Covid: La irrupción de la Pandemia del COVID 19 ha generado un impacto económico y social invaluable tanto a nivel mundial como local. Esto sin duda alguna cambia la predisposición de los gobiernos para avanzar hacia la Carbono neutralidad. En el caso particular de Chile, ante una menor disponibilidad de recursos, el foco de los próximos años será la recuperación económica, lo cual apunta a priorizar acciones que apunten a mejorar la calidad de los servicios. En particular, los esfuerzos de la Autoridad Ambiental durante 2020 y 2021, han sido los compromisos internacionales dispuestos en la NDC a 2030, implementando proyectos tales como la Electromovilidad, y la Ley de Eficiencia Energética.

Escenario de Carbono Neutralidad 2050: En el caso de una mejor y más rápida recuperación económica, es posible visualizar un contexto de apoyo para la carbono neutralidad, lo cual traerá consigo una caída de los costos de las tecnologías limpias, que le permitan al país avanzar tanto en materia de reducción de emisiones locales. Asimismo, la adopción de nuevas tecnologías permitirá alcanzar mayores niveles de penetración de la

electromovilidad y de medidas de eficiencia en sectores productivos, tales como la incorporación de la industria del hidrógeno verde, entre otras acciones.

Escenario de Transición Acelerada: En el caso que exista una rápida recuperación económica y social, así como un amplio espectro en el desarrollo de tecnologías limpias, permitirán una acelerada transición hacia la carbono neutralidad. Esto puede significar un tránsito progresivo a alternativas de energías renovables en el sistema eléctrico, soluciones de almacenamiento y captura de CO₂, la integración de la electromovilidad, junto con un amplio y rápida implementación de proyectos de producción de hidrógeno verde y de combustibles sintéticos, tanto para uso local como para la exportación. Esto claramente, implica un escenario de carbono neutralidad antes del 2050.

Etapas 2: Identificación de Instrumentos de Precio al Carbono

Pregunta N°5: En base a su respuesta anterior, ¿cómo cree que operarán los distintos IPC definidos por los instrumentos normativos a la fecha?

- a) Exclusivamente Impuesto verde
- b) Impuesto verde + Permisos de Emisión Transables (ETS)
- c) Impuesto verde + Permisos de Emisión Transable + Sistemas de Compensaciones de Carbono (Offset)
- d) Otras combinaciones

Pregunta N°6: De acuerdo a lo mencionado, según su percepción ¿cómo será la aplicación de estas disposiciones a la Industria del Cemento?

Pregunta N° 7: En su opinión, ¿cómo será el régimen de implementación de los IPC mencionados anteriormente?

1.4.3. Estrategia de Descarbonización

Para identificar los distintos ejes que debería tener una Estrategia de Descarbonización, se agregaron 3 preguntas adicionales a la entrevista semiestructurada realizada, principalmente para identificar factores que afectan la implementación de IPC en el país, amenazas que representan las nuevas disposiciones, junto con los cambios que debería implementar la Industria del Cemento para adaptarse a las nuevas disposiciones.

A continuación, se presentan las preguntas realizadas:

Etapas 3: Alertas sobre las transformaciones

Pregunta N° 8: Según su percepción, ¿cuáles son los factores que obstaculizarían o facilitarían la correcta implementación de los IPC mencionados anteriormente en el país?

Pregunta N°9: ¿Qué tipo de amenazas representan estas nuevas disposiciones para industrias tales como la de los materiales de la construcción, entre ellas la del cemento?

Pregunta N°10: En su opinión, ¿cuáles serían los principales cambios que debería implementar la industria del cemento para adaptarse a estas nuevas disposiciones?

Junto con lo anterior, se realiza una revisión sistemática de literatura con la identificación de opciones tecnológicas que ha explorado la Industria para reducir sus emisiones de CO₂ y poder alcanzar la carbono neutralidad al 2050.

1.5. Organización y Presentación de este Trabajo

La presente investigación se conforma por cuatro capítulos organizados de la siguiente manera:

Capítulo 1: Presenta el marco conceptual que contextualiza la investigación y la discusión de literatura atinente que fundamente la contribución del estudio. Asimismo, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que persigue la investigación, explicando la metodología respectivamente utilizada.

Capítulo 2: Presenta el levantamiento de información de manera organizada. Además, se dan a conocer los resultados obtenidos, apoyados por tablas, que resumen y complementan la información y su respectivo análisis.

Capítulo 3: Se presenta la investigación en un formato reducido a través de un artículo académico estructurado de la siguiente manera:

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Metodología
5. Resultados
6. Conclusiones
7. Referencias

Capítulo 4: Presentación de las conclusiones de la investigación, junto con líneas de desarrollo de futuras investigaciones relacionadas con el tema en análisis, que permitan contribuir a robustecer el entendimiento del mismo.

2. INFORMACIÓN Y RESULTADOS

2.1. Implicancia Económica entrada en Vigencia del Impuesto Verde

Para definir la implicancia económica de la entrada en vigencia del Impuesto Verde en la Industria Cementera Nacional, se define como población a todas las plantas de cemento con procesos de producción y molienda de clinker en Chile. En particular, se define como marco muestral a las plantas que poseen hornos de clinker, considerando que corresponden a las mayores fuentes de generación de CO₂ a nivel industria. Por lo anterior, el presente estudio excluye las operaciones de molienda de clinker importado que operan dentro del país.

En base a lo descrito anteriormente, se define como muestra una planta tipo con funcionamiento continuo de un horno de clinker.

Las variables del ejercicio corresponden a las siguientes:

- Línea de base de emisión de CO₂ anual generada en Horno de Clinker [ton CO₂ eq/año]
- Recaudación económica por impuesto verde por emisión de CO₂ en Hornos de Clinker [USD/Año].

2.1.1. Línea de Base Generación de CO2

Tal como se explica en anteriormente, para calcular la línea de base de generación de CO2 de la planta con horno de clinker a analizar, se aplica el Método B1 del Protocolo de CO2 y Energía de la GCCA, Versión 3.0, publicado en mayo de 2011.

Para el análisis a realizar, se consideran los datos operacionales de los tres hornos de clinker que actualmente funcionan en el país de los años 2018, 2019 y 2020, los cuales se encuentran detallados en el Anexo 2.

Con los datos anuales de los periodos mencionados, es posible establecer el consumo de clinker, adiciones minerales y energía promedio para un horno de clinker promedio que funciona actualmente en la Industria Cementera Nacional.

Tabla 1: Producción y consumo de clinker en horno promedio. Fuente: Elaboración propia.

Consumo de Clinker	Unidad	2018	2019	2020	Promedio Periodo
Clinker producido	ton/año	463.270	465.000	550.000	492.757
Clinker comprado a fuentes externas	ton/año	13.000	25.000	15.500	17.833
Total clinker consumido	ton/año	476.270	490.000	565.500	510.590

Tabla 2: Consumo de adiciones en horno promedio. Fuente: Elaboración Propia.

Adiciones Minerales	Unidad	2018	2019	2020	Promedio Periodo
Yeso	ton/año	43.541	40.559	46.269	43.456
Caliza	ton/año	-	-	-	-
Escoria	ton/año	-	-	-	-
Cenizas Volantes	ton/año	2.362	1.003	-	1.122
Puzolana	ton/año	163.883	133.210	170.366	155.820
Otras	ton/año	-	-	-	-
Total Adiciones Minerales	ton/año	209.786	174.772	216.635	200.398

Tabla 3: Producción de cemento de horno promedio. Fuente: Elaboración propia.

Producción de Cemento	Unidad	2018	2019	2020	Promedio Periodo
Cemento Portland	ton/año	657.028	632.052	798.664	686.306

Tabla 4: Consumo energético de horno promedio. Fuente: Elaboración propia.

Consumo energético del horno	Unidad	2018	2019	2020	Promedio Periodo
Consumo total de calor del horno	TJ/Año	1.686	1.741	2.108	1.845
Consumo total de calor del horno excluyendo proceso de secado	TJ/Año	1.570	1.624	1.965	1.720
Combustibles tradicionales	TJ/Año	1.456	1.560	1.853	1.623
Combustibles alternativos	TJ/Año	321	267	339	309

En base a los datos de producción y considerando:

- Factor de emisión por calcinación de 893 [kg CO₂/ton clinker consumido] y un contenido del 0,2% de carbón orgánico en la mezcla de materias primas ingresadas al horno.
- Factor de emisión de CO₂ por unidad de potencia producida de 409 [Kg CO₂/MWh].

Los valores de generación de CO2 para los años definidos son los siguientes:

Tabla 5: Generación de CO2 proveniente de la Calcinación de Materias Primas. Fuente: Elaboración propia.

CO2 proveniente de calcinación de Materias Primas	Unidad	2018	2019	2020	Promedio Periodo
Factor de emisión por calcinación	Kg CO2/T clinker	893	893	893	525
Contenido de carbón orgánico de la mezcla de materias primas	% peso seco	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Total CO2 generado por materias primas	Ton CO2/año	425.309	437.570	504.992	455.957

Tabla 6: Generación de CO2 proveniente de la Combustión. Fuente: Elaboración propia.

CO2 proveniente del Proceso de Combustión	Unidad	2018	2019	2020	Promedio Periodo
CO2 por unidad de potencia producida externamente	Kg CO2/MWh	418	405	405	409
CO2 proveniente de Combustión de Combustibles Tradicionales	Ton CO2/año	133.961	143.856	170.807	149.541
CO2 proveniente de Combustión de Combustibles Alternativos	Ton CO2/año	17.109	13.778	19.380	16.756
Total CO2 proveniente de Proceso de Combustión	Ton CO2/año	151.070	157.634	190.187	166.297

2.1.2. Estimación de Recaudación por Concepto de Pago de Impuesto Verde

En base a los datos presentados en el punto anterior, se consideran los promedios anuales para definir la generación afecta a pago de Impuesto Verde.

Tabla 7: Generación de CO2 promedio en Horno de Clinker Promedio.

Generación Total de CO2 en Horno	Unidad	Valores	%
Promedio de CO2 generado por Calcinación de Materias Primas	Ton CO2/año	455.957	73%
Promedio CO2 proveniente de Proceso de Combustión	Ton CO2/año	166.297	27%
Total	Ton CO2/año	622.254	100%

Considerando 3 distintos escenarios tarifarios para la tonelada de CO2, es posible estimar los valores de pago por concepto de Impuesto Verde.

Tabla 8: Impuesto Verde en 3 Escenarios Tarifarios. Fuente: (Banco Mundial, 2022).

Año	Tarifa sin variación [USD/Ton CO2]	Tarifa con variación moderada [USD/Ton CO2]	Tarifa con variación acelerada [USD/Ton CO2]
2020	5	5	5
2025	5	10	30
2030	5	35	50
2035	5	35	50
2040	5	35	75
2045	5	35	75
2050	5	35	100

Considerando los valores de eventuales futuras tarifas presentadas anteriormente, los valores a pagar por concepto de Impuesto Verde para un Horno de Clinker promedio, son los siguientes:

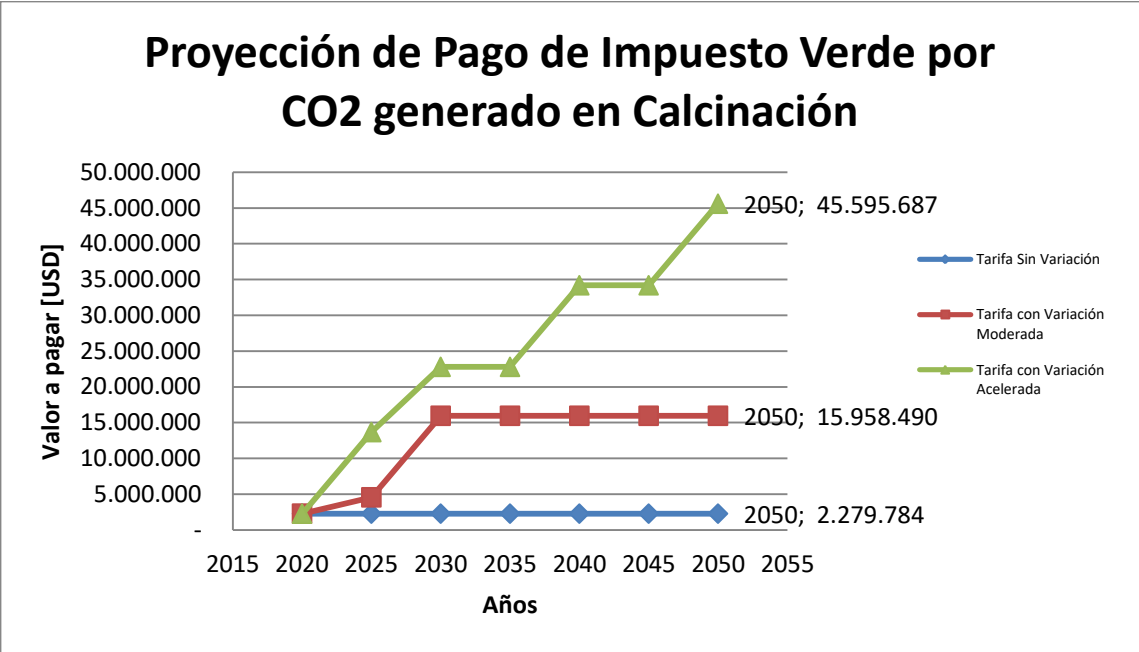


Gráfico 1: Proyección de Pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Calcinación. Fuente: Elaboración propia.

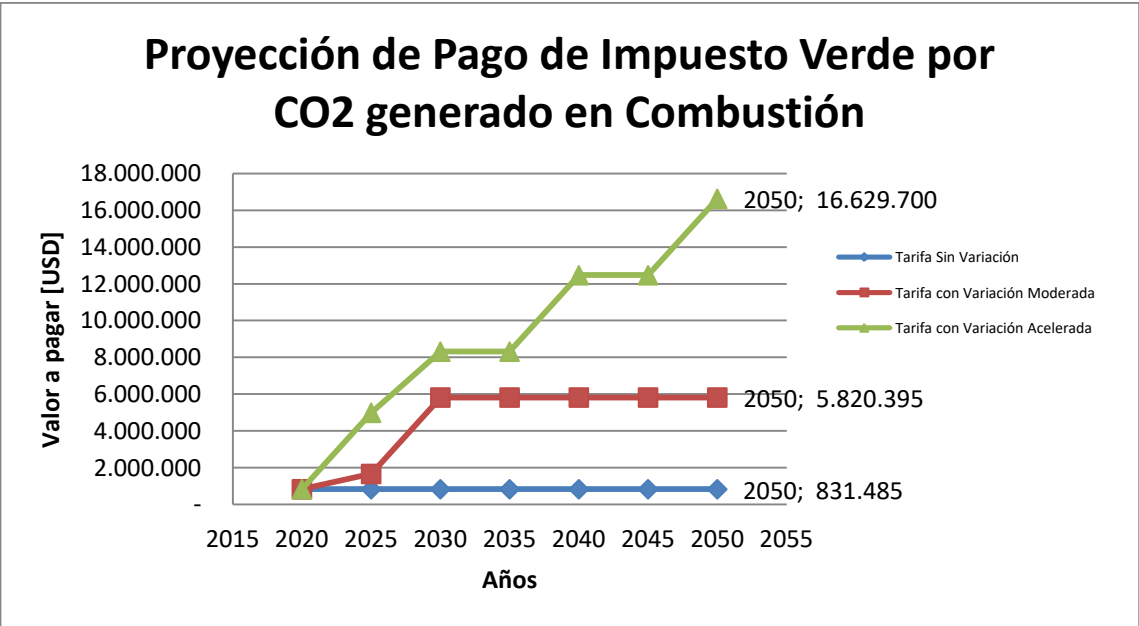


Gráfico 2: Proyección de Pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Combustión. Fuente: Elaboración propia.

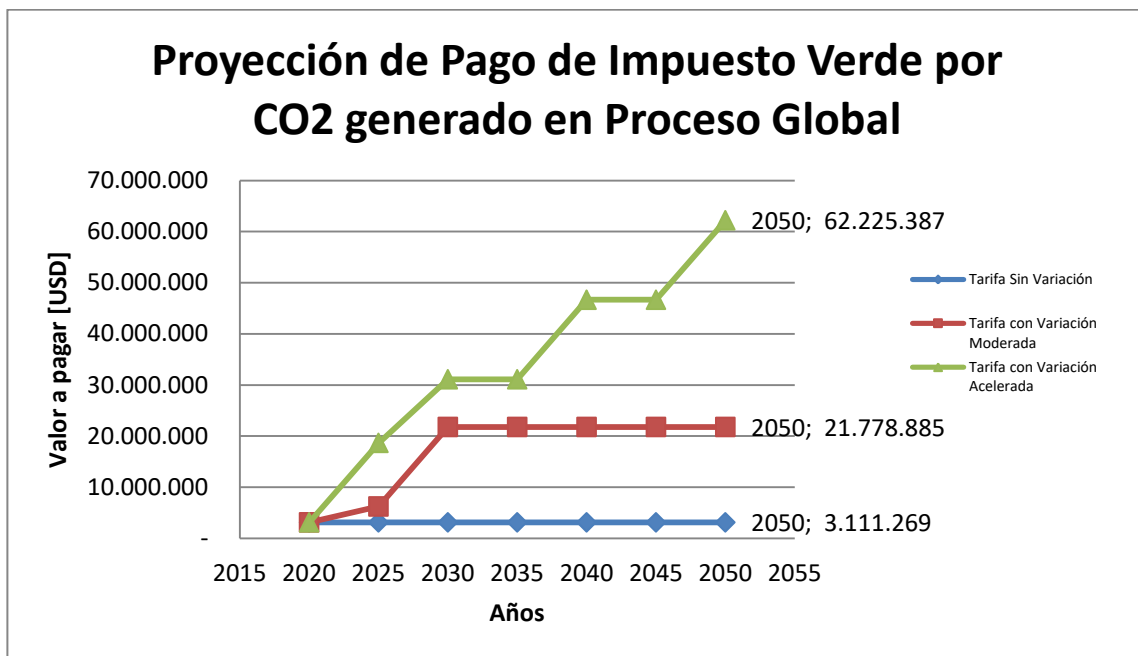


Gráfico 3: Proyección de Pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Proceso Global del Horno de Clinker. Fuente: Elaboración propia.

En Anexo 3 se detallan los valores originan los gráficos presentados en esta sección.

2.1.3. Impacto en EBITDA

Para el análisis del impacto que tendría el impuesto verde en la rentabilidad de la industria del cemento, se define al EBITDA como el indicador para analizar la proporcionalidad con los montos de pago por concepto de impuesto verde para el periodo de 2025 a 2050.

Para ello, se calcula un EBITDA Promedio de la Industria, en base a los valores que las principales empresas cementeras han declarado a la Comisión de Mercado Financiero desde el año 2015 a 2021. A continuación, se presenta la línea de tendencia que tiene el EBITDA Promedio de la Industria:

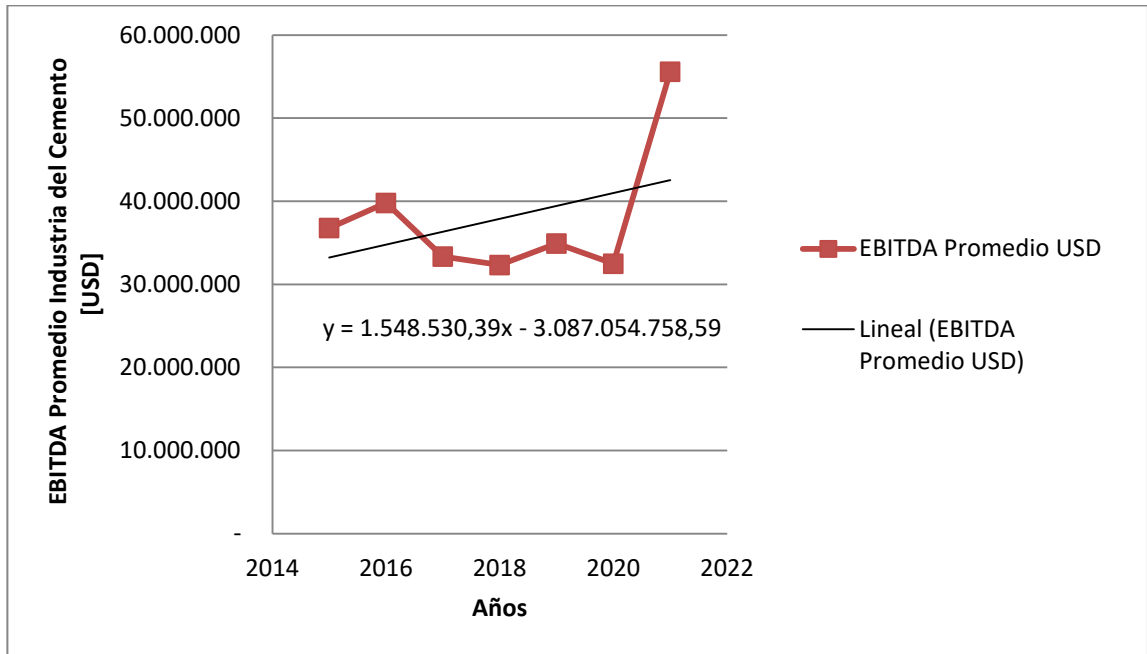


Gráfico 4: Línea de Tendencia en EBITDA³. Fuente: Elaboración Propia.

El detalle de la base de cálculo para el EBITDA de industria, se encuentra disponible en el Anexo 4.

Una vez definida la línea de tendencia del EBITDA de la industria, es posible proyectar un comportamiento del indicador para los próximos años y contrastar dichos valores con los montos de pago de impuesto verde, lo cual se presenta en los siguientes gráficos.

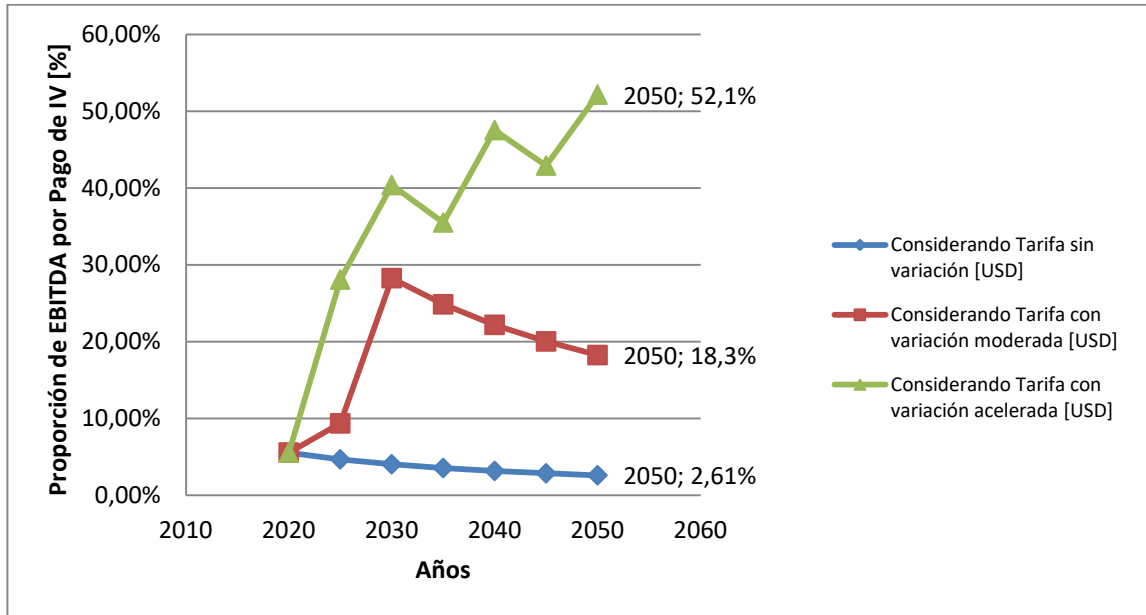


Gráfico 5: Proporción de EBITDA correspondiente al pago de Impuesto Verde por emisiones de calcinación de materias primas. Fuente: Elaboración propia.

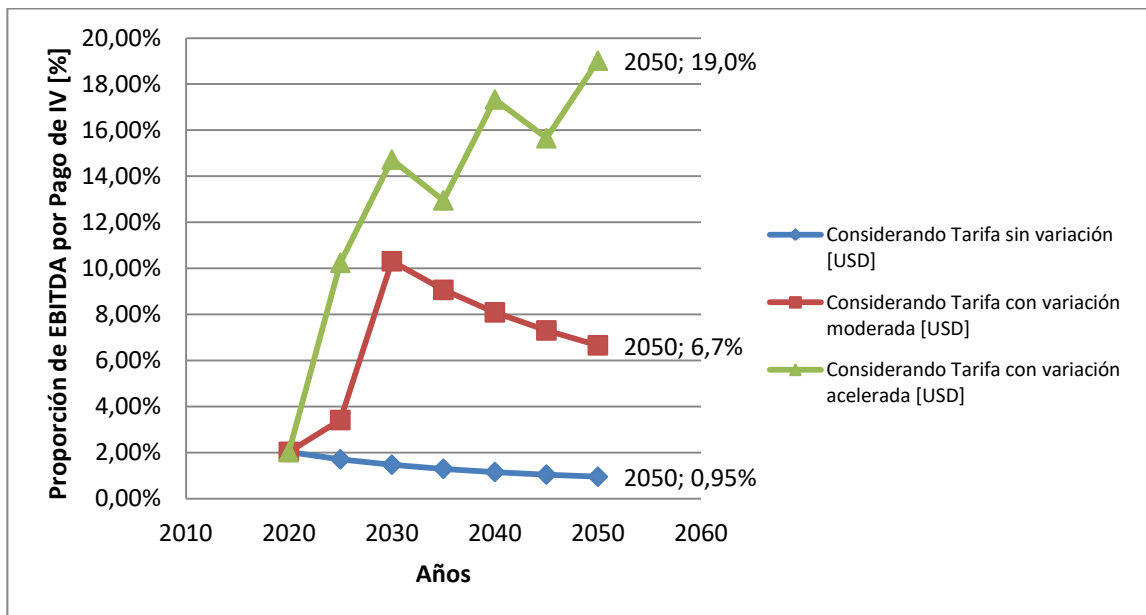


Gráfico 6: Proporción de EBITDA correspondiente al pago de Impuesto Verde por emisiones de combustión. Fuente: Elaboración propia.

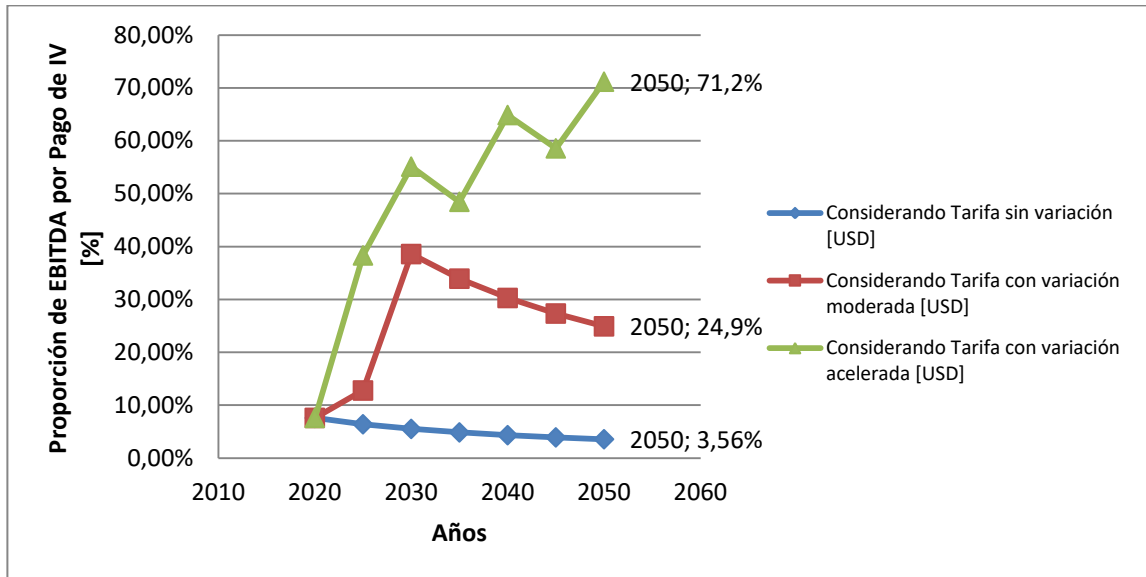


Gráfico 7: Proporción de EBITDA correspondiente al pago de Impuesto Verde por emisiones de proceso global de horno de clinker. Fuente: Elaboración propia.

El detalle de los cálculos de este ejercicio, se presentan en el Anexo 4.

2.2. Identificación y Régimen de Implementación de otros Instrumentos de Precio al Carbono

2.2.1. Resultados Entrevistas Semiestructuradas

Entre el 9 de noviembre de 2021 y el día 30 de enero de 2022, se realizaron 8 entrevistas semiestructuradas con preguntas abiertas y cerradas, a profesionales y académicos del ámbito de cambio climático, instrumentos de precio al carbono, industria del cemento, entre otros aspectos. En el Anexo 5, se presenta el listado de entrevistados realizadas en el contexto de la investigación, mientras que en el Anexo 7 se presentan los consentimientos informados de participación en este estudio de los mismos.

A continuación, se presentan los resultados en base a cada una de las preguntas realizadas durante las entrevistas.

Etapa N°1 Caracterizar el Presente y Comprensión de la Realidad

Pregunta N°1: En base a las siguientes alternativas, ¿Cuál es su percepción del avance de la implementación de instrumentos de precio al carbono en Chile?:

- a. Estancado**
- b. Lento**
- c. Avanzado Moderado**
- d. Rápido Progreso**

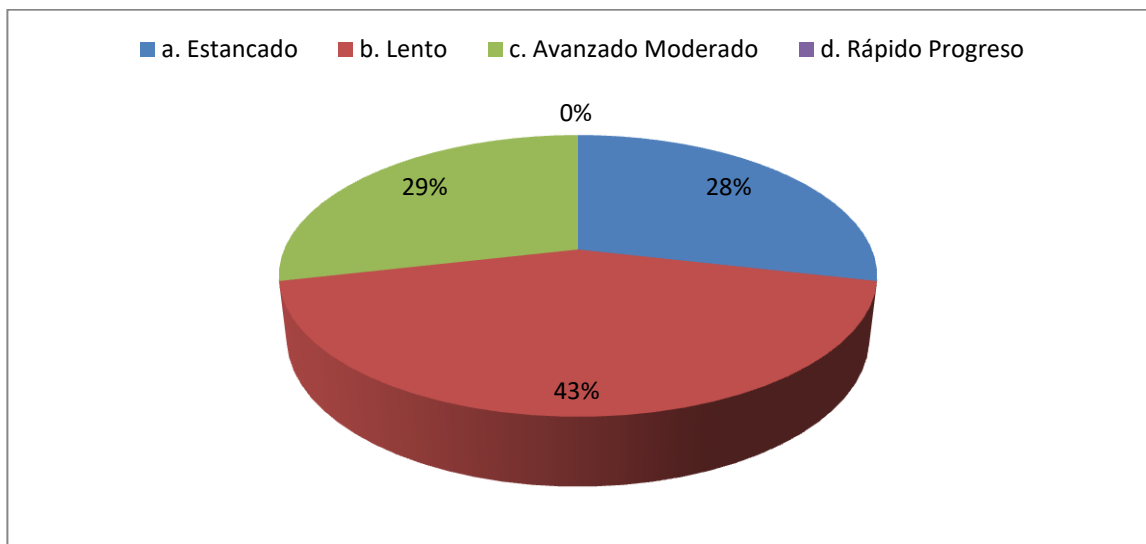


Gráfico 8: Percepción del avance en la implementación de Instrumentos de Precio al Carbono en Chile. Fuente: Elaboración Propia.

Pregunta N° 2: ¿Cuáles cree que son los principales drivers para la correcta implementación de los IPC en Chile?

En base a las respuestas de los entrevistados, es posible agrupar los drivers identificados en las siguientes categorías:

- **Drivers Políticos**
 - Compromisos Internacionales
 - Certezas a largo plazo
 - Claridad en fuentes afectas
 - Voluntad del Gobierno
 - Reconocimiento de particularidades de sectores industriales
 - Pre disposición del entorno para aceptar la carbononeutralidad
 - Normativa asociada a más y mejores IPC

- **Drivers Económicos**
 - Precio del carbono
 - Minimización de costos de transacción
 - Capitalización de sectores que tienen capacidad de transición
 - Capacitación en el sector público y privado
 - Fondos del Gobierno
 - Alineación de incentivos o castigos
 - Buena disposición del sector privado

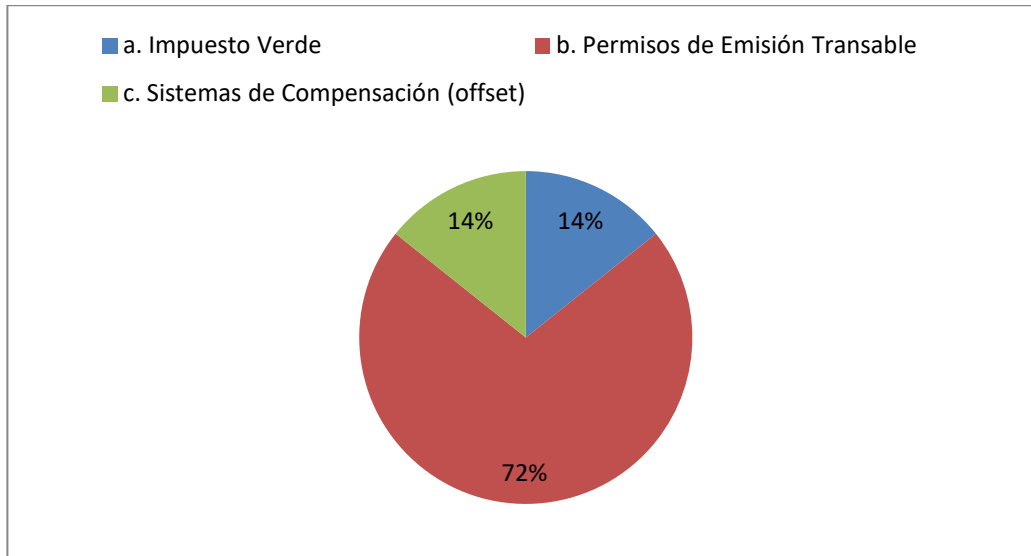
- **Drivers Técnicos y Tecnológicos**
 - Identificación de opciones de mitigación y compensación para distintos sectores industriales
 - Nuevas tecnologías para la captura de CO2

Pregunta N° 3: Según su percepción y en base a las siguientes alternativas, ¿cuál es el IPC de mayor relevancia para que Chile pueda llegar a ser carbono neutral de aquí al 2050?

a. Impuesto Verde

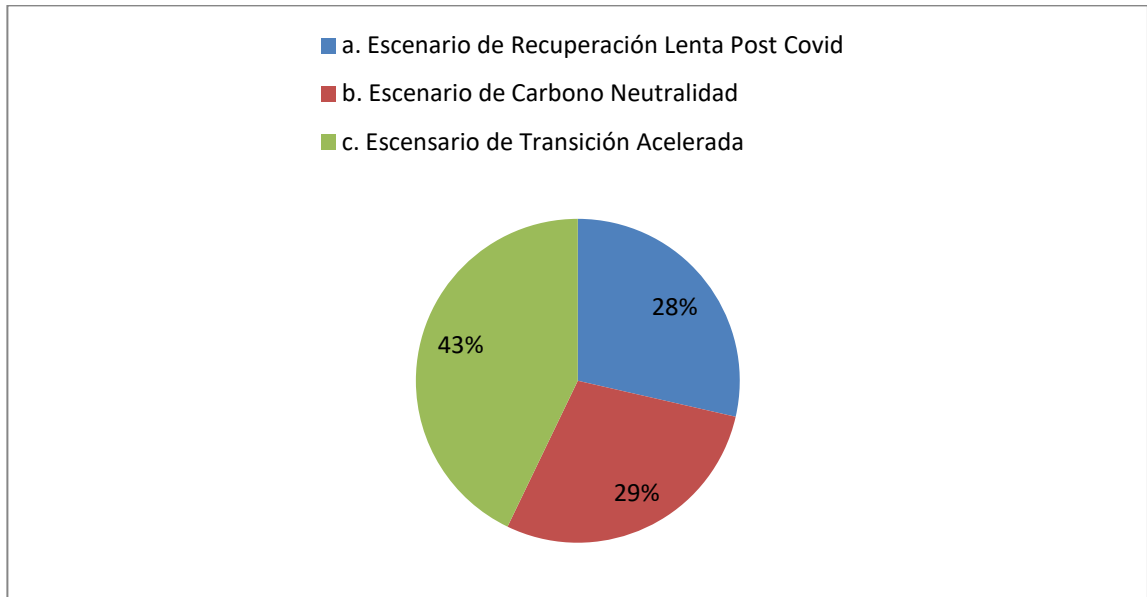
b. Permisos de Emisión Transable

c. Sistemas de Compensación (offset)



Pregunta N° 4: ¿cuál cree que será el escenario de Chile (basado en los escenarios preliminares construidos en el marco de la Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía) para los próximos años?

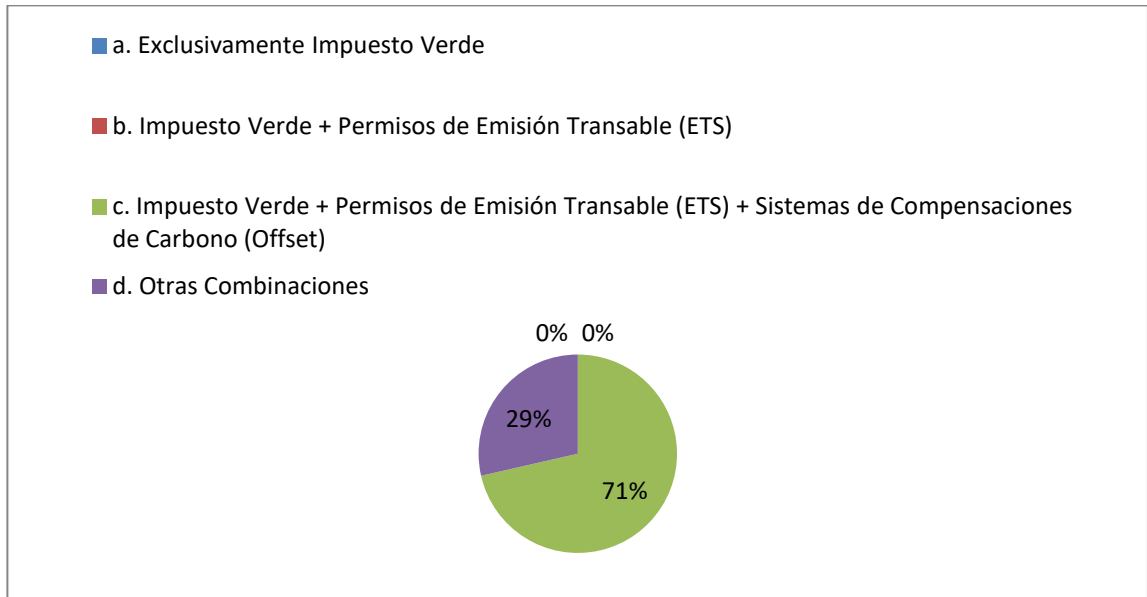
- a. Escenario de recuperación lenta Post Covid.**
- b. Escenario de Carbono Neutralidad 2050.**
- c. Escenario de Transición Acelerada.**



Etapa N°2 Propuestas de Alto Impacto

Pregunta N° 5: En base a su respuesta anterior, ¿cómo cree que operarán los distintos IPC definidos por los instrumentos normativos a la fecha?

- a. Exclusivamente Impuesto verde**
- b. Impuesto verde + Permisos de Emisión Transables (ETS)**
- c. Impuesto verde + Permisos de Emisión Transable + Sistemas de Compensaciones de Carbono (Offset)**
- d. Otras combinaciones**



Pregunta N° 6: De acuerdo a lo mencionado, según su percepción ¿cómo será la aplicación de estas disposiciones a la Industria del Cemento?

Al consultar a los entrevistados, la totalidad de ellos expresa que existe ambigüedad sobre como se le aplicará a la Industria del Cemento los distintos IPC. Lo anterior, debido a que las modificaciones normativas sobre el impuesto verde aún se encuentran en discusión parlamentaria. Asimismo, el 100% de los entrevistados plantean que actualmente Chile cuenta con una normativa que no presenta uniformidad de aplicación a los sectores industriales involucrados.

Existe una respuesta unánime en los entrevistados, en relación a la compleja aplicación a la Industria del Cemento considerando el esquema de impuesto que Chile posee actualmente. La mayoría concuerda con que el instrumento idóneo para regular las emisiones de CO₂ de este tipo de industrias, debería corresponder a los permisos de emisión transable. Complementariamente, los entrevistados se refieren al valor del impuesto verde, que actualmente se mantiene en 5 USD/Ton CO₂, subirá sin poseer correctos fundamentos para justificar el alza de tarifa.

Asimismo, el 29% de los entrevistados plantea que en el marco de los sistemas de compensaciones, existen muchas oportunidades de utilizar el coprocesamiento como mecanismo de compensación, principalmente por la contribución en la disminución en la generación de metano en los rellenos sanitarios.

El 29% de los entrevistados plantea que si no existe una resolución clara sobre las emisiones que se encontrarán afectas a pago de Impuesto Verde; considerando que aún existe la discusión sobre si solo corresponde gravar las emisiones del proceso de combustión o bien agregar las emisiones de la calcinación de materias primas; probablemente la Industria del Cemento esté pagando valores más altos, que incluso los que actualmente se esta misma industria paga en Europa, en donde existe sólo pago por concepto de combustión con una tarifa de 1,7 USD/Ton.

El 57% de los entrevistados, planteo en su respuesta la preocupación asociada a que en el caso hipotético de que resulte económicamente más rentable mantener un negocio cementero solo basado molienda de clinker importado desde Asia que uno con operaciones nacionales de producción de clinker, en donde el pago por la entrada en vigencia del Impuesto Verde represente un pago muy alto respecto de los ingresos de las compañías, el proceso de descarbonización no se llevará a cabo, debido a las altas emisiones de CO₂ por el concepto de transporte de la materia prima vía marítima. En ese sentido, los mismos entrevistados afirman que los instrumentos económicos tienen que cargar o hacerse cargo de los avances tecnológicos. El impuesto al CO₂ no puede tener lógica de recaudación, ya que distorsiona el objetivo del instrumento, lo cual puede generar el efecto de fuga de carbono.

Bajo ese escenario, los entrevistados plantean que actualmente Chile no cuenta con una visión de planificación económica estatal que se adelante a este tipo de problemas, que contemple que existen industrias estratégicas que requieren

funcionar, tales como lo son el cemento y acero, por ejemplo. En ese sentido, el 86% de los entrevistados plantea que si se requiere descarbonizar, el Gobierno debe entregar apoyo a los distintos sectores, a través de subsidios, como por ejemplo mecanismos de compras públicas que movilicen materiales verdes (cemento verde, cobre verde, etc.).

El 57% de los entrevistados plantea que la implementación debe ser diferenciada, por ser la Industria del Cemento un Sector EITE (Emission Intensive Trade Exposed) (Department of Ecology State of Washington, 2022). Por lo mismo, la implementación debiese ser gradual, inicialmente con una marcha blanca, en donde se le exigirá más al sector energía, para posteriormente exigir poco a poco a los demás sectores, recogiendo la restricciones y limitantes tecnológicas del sector.

Por otro lado, el 43% de los entrevistados, plantea que la industria del cemento en particular, tiene emisiones bajas en comparación con el benchmark internacional y tiene altas posibilidades tecnológicas para implementar mejoras, junto con offsets y alternativas de compensación. En el caso de que la industria del cemento este sujeto a un sistema de norma de emisiones, las compensaciones debiesen ejecutarse considerando procesos de recambio tecnológico.

Pregunta N° 7: En su opinión, ¿cómo será el régimen de implementación de los IPC mencionados anteriormente?

El 100% de los entrevistados plantea que el proceso de implementación debe ser gradual, independiente de los compromisos internacionales que haya adoptado Chile. Se destaca en todas las respuestas, la importancia que se le otorga al calendario de incorporación de nuevos sectores afectos al Impuesto Verde. Lo anterior, debido a que el 43% de los entrevistados plantea que los Permisos de Emisión Transable son costosos, difíciles de implementar y de monitorear,

mientras que el impuesto verde tiene una aplicación directa, a pesar de sólo tener un enfoque recaudatorio.

En el caso de la Industria del Cemento, la gradualidad es clave debido a las limitaciones que tiene el sector. En el caso de que el Impuesto Verde entre en vigencia al 2023, eventualmente nuevas normativas asociadas podría entrar en vigencia a partir del 2025, sobre todo las asociadas a compensaciones, las cuales deberían ser el instrumento protagonista en la transición. Esto resulta clave, ya que los entrevistados plantean que sectores vulnerables, tales como el Acero y el Cemento, son necesarios para el desarrollo del país, sin embargo sin nuevas tecnologías, es difícil que puedan alcanzar la carbono neutralidad. Por lo mismo, si la implementación de IPC no es gradual, estos sectores podrían adoptar las disposiciones, pero con muchos riesgos económicos.

En resumen, la totalidad de entrevistados plantea que el régimen de implementación debería ser gradual, considerando el siguiente flujo en la entrada en vigencia:

- Dependiendo de las limitaciones del sector:
 - ❖ Impuesto Verde + Compensaciones: Inmediato a partir de 2023.
 - ❖ Permisos de Emisión: A partir de 2025 a 2030, en adelante.

Asimismo, se rescatan algunas reflexiones de los entrevistados, respecto de la operatividad futura de los distintos IPC:

- Entrevistado N°4: “El impuesto está funcionando, en el corto plazo no se ven posibilidades de modificación. Las compensaciones deberían salir el reglamento en diciembre, y el próximo año avanzar el procedimiento de las casas certificadoras, para posteriormente en 2023 implementarse. Respecto

de los Permisos de Emisión, probablemente, eso requiere del regulador, la transacción de emisiones puedan estar en 2024 – 2025, eso también dependerá del contexto político, ya que la legislación debe ser articulada por la Autoridad, sobre todo del Ministerio de Medio Ambiente y Energía, no como una iniciativa parlamentaria”.

- Entrevistado N°6: “El año 2030 deberíamos tener un sistema trabajado e implementado en régimen permanente, puede ser con mix de IPC o sólo Permisos de Emisión. Ese año debería resolverse en Chile, considerando un precio al carbono adecuado para transacciones de emisiones, equivalente al costo social de 32 USD/ton CO2 eq. Con 5 USD tenemos solo incentivo recaudatorio. La UE esta transando a 80 euros, lo cual se pronostica que subirá a 100, ya que Chile está en desarrollo y no tiene condiciones para un mercado de emisiones robusto. Posteriormente, debería haber reforma tributaria que se deberían revisar los impuestos verdes”.

2.3. Estrategia de Descarbonización

2.3.1. Resultados Entrevistas Semiestructuradas

Tal como se plantea anteriormente, para el cumplimiento del Objetivo Específico N° 3, relacionado con la definición de una Estrategia de Descarbonización que debería adoptar la Industria del Cemento, se agregaron a las entrevistas realizadas 3 preguntas adicionales, asociadas a las distintas recomendaciones que pueden entregar los entrevistados en su calidad de expertos a la Industria.

Etapa N°3 Alertas sobre las Transformaciones

Pregunta N° 8: Según su percepción, ¿cuáles son los factores que obstaculizarían o facilitarían la correcta implementación de los IPC mencionados anteriormente en el país?

Los entrevistados entregaron sus respuestas, entregando una lista de los factores que a su juicio obstaculizarían o bien facilitarían la correcta implementación de los IPC en el país.

Tabla 9: Listado de factores que obstaculizarían o facilitarían la correcta implementación de los IPC. Fuente: Elaboración propia en base a entrevistas realizadas.

Listado de Factores	
Obstaculizarían	Facilitarían
<ul style="list-style-type: none"> • Factores políticos que retrasan discusiones clave, además de la falta de conocimiento de ciertos actores clave. • Temas no resueltos a nivel normativo para sectores difíciles de regular. • Falta de capacitación de los profesionales y ejecutivos de los sectores industriales, y del Gobierno y Ministerios involucrados. • Mala estandarización de los MRV. • Percepción negativa de algunos instrumentos de reducción (por ejemplo: compensaciones). • Exclusión de la visión ambiental integrada del problema, y sólo visión económica. • Falta de priorización del tema por otras 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de monitoreo/trazabilidad que han implementado los distintos sectores. • Disposición del sector público y privado para avanzar en materia de reducción de emisiones. • Dialogo permanente entre los sectores industriales y el Gobierno. • Estrategia Climática a Largo Plazo (con una correcta actualización periódica). • Integración con mercado internacional de emisiones, formando alianzas para el cumplimiento del Art. N° 6 del Acuerdo de París. • Implementación de Impuestos de Frontera. • Incentivos económicos para

Listado de Factores	
Obstaculizarían	Facilitarían
<p>urgencias ambientales en el país, por ejemplo, las Zonas de Sacrificio.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falta de recursos económicos por parte del Poder Ejecutivo. • Falta de infraestructura tecnológica. • Falta de conocimiento de las particularidades específicas de ciertos sectores industriales. • Temas imponderables: por ejemplo, la Pandemia del Covid 19 y el proceso de recuperación económica asociado en cada uno de los países. 	<p>implementar instrumentos o herramientas de compensación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Apoyo internacional para la investigación. Por ejemplo Programa del PMR. • Esquema de IPC con flexibilidad, por ejemplo, optar entre compensar o bien pagar valores asociados a Impuesto Verde. • Presión de los inversionistas en temáticas asociados a sostenibilidad. • Nuevas opciones de tecnologías innovadoras en materia de carbononeutralidad • Uso de energías renovables y la entrada del H2 como combustible.

Pregunta N°9: ¿Qué tipo de amenazas representan estas nuevas disposiciones para industrias tales como la de los materiales de la construcción, entre ellas la del cemento?

La totalidad de los entrevistados plantea que la Industria del Cemento, se reconoce como una industria vulnerable, es decir, que por sus ingresos marginales, cualquier cambio en OPEX puede generar problemas de rentabilidad en el corto plazo. En ese contexto, los entrevistados responden que la mayor amenaza que posee la industria actualmente, es que se prefiera sólo la operación de las moliendas con clinker importado.

Dado lo anterior, los hornos de clinker inevitablemente pierden competitividad, lo que generaría operaciones con clinker extranjero generado fugas de carbono.

Adicionalmente y considerando que el cemento posee un rol relevante en materia de generar infraestructura resiliente para enfrentar los riesgos del cambio climático, el hecho de adoptar nuevas exigencias, sobre todo en materia tributaria, independiente de si la fabricación es con clinker nacional o extranjero, podría traer las siguientes consecuencias:

- Aumento en los precios para que las constructoras opten a adquirir un cemento “verde”.
- Cambios relevantes a toda la cadena de suministro.
- Ajustes en políticas públicas asociadas a vivienda, construcción y edificaciones.
- Nuevas condiciones para proyectos de inversión en el país, en donde la construcción es un indicador relevante de las condiciones económicas.

Por lo tanto, la totalidad de los entrevistados plantean que el cemento tiene una situación bien particular, dada la competencia del clinker extranjero. Actualmente Chile exporta distintas materias primas a China, y los barcos en el retorno pueden traer clinker, por lo que se produce una situación de competencia que no pasa en otras industrias. El clinker chino tiene otro estándar. Si se impone impuesto y/o se elevan sus tarifas, no considerando dicha esa vulnerabilidad, es posible poner en riesgo la industria nacional.

Por lo mismo, los entrevistados concuerdan en que se debería mirar con detención lo que pasa en la industria del cemento, ya que mientras no haya alternativas tecnológicamente viables y escalables, deberían existir ciertas concesiones para las

emisiones generadas, no sólo a nivel de proceso sino que también las asociadas al consumo de combustible.

Pregunta N°10: En su opinión, ¿cuáles serían los principales cambios que debería implementar la industria del cemento para adaptarse a estas nuevas disposiciones?

Los entrevistados plantean una serie de ideas que se estructuran de la siguiente manera:

Tabla 10: Listado de medidas planteadas respecto de cambios a implementar en la Industria del Cemento Nacional. Fuente: Elaboración propia en base a entrevistas realizadas.

Gestión del Cambio	Medidas
Organizacional y de Gobernanza	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios organizacionales, incluyendo formación de áreas para cambio climático. • Implementar Estrategia de Sostenibilidad, que incluya un Plan de Descarbonización. • Cambiar forma de operar, no sólo dentro de los procesos productivos, sino que también en comercialización de productos.
Asuntos Corporativos y Públicos	<ul style="list-style-type: none"> • Ejecutar Hoja de Ruta pública con compromisos de la industria. • Participación activa en la elaboración de políticas públicas.
Sostenibilidad e Innovación	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliar y mejorar las Líneas de Base de CO2. • Seguimiento de reducciones de emisiones GEI. • Ampliar portafolio de proyectos de inversión, incluyendo iniciativas de compensación. • Investigación sobre opciones de financiamiento para tecnología de captura de CO2 y compensaciones. • Portafolio de proyectos de innovación y

2.3.2. Revisión de Literatura Específica

2.3.2.1. Revisión de Tecnologías para Reducción de CO2: Papers Tecnológicos CSI/ECRA

En 2009, la Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento (CSI, por sus siglas en inglés) en cooperación con Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) encargaron a la Academia Europea de Investigación del Cemento (ECRA, por sus siglas en inglés) una serie de estudios para actualizar la perspectiva de las distintas tecnologías disponibles para la reducción de CO2 y la eficiencia energética en el sector del cemento.

En junio de 2017, CSI y ECRA publicaron una serie de documentos técnicos, en donde se analizan las tecnologías existentes y futuras con potencial para aumentar la eficiencia energética y disminuir las emisiones de CO2 en la producción de cemento. La decisión para el desarrollo de la investigación de tecnología en 2017, fue tomada por la CSI a la luz de la ratificación del Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con respecto a la reducción del calentamiento global y la creación de un camino hacia un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. CSI asignó el proyecto a ECRA, que tiene estrechos vínculos con las principales partes interesadas de la industria del cemento y los proveedores de tecnología entre sus miembros y aportó su competencia en el campo de la tecnología del cemento.

En 2018, la Asociación Global de Cemento y Concreto (GCCA, por sus siglas en inglés) anunció la formación de una asociación estratégica con el WBCSD para

facilitar el desarrollo sostenible de los sectores del cemento y el concreto y sus cadenas de valor.

Los estudios realizados corresponden a un total de 50 papers, los cuales representan una visión global de los principales ejes de reducción de CO₂ en la producción de cemento, además de las respectivas oportunidades y barreras para su implementación (European Cement Research Academy, 2022). En el Anexo 6 se presenta el listado de la totalidad de los papers publicados por ECRA, junto con el respectivo detalle del potencial de reducción de CO₂ por cada tecnología analizada.

2.3.2.2. Priorización de Tecnologías de Reducción

FICEM realizó una revisión de los Papers ECRA, e identificó las tecnologías de mayor y mejor aplicación para las plantas que cuentan con hornos de clinker operativos en Chile. A continuación, se presenta el listado de las tecnologías seleccionadas para directa implementación en Chile, considerando las condiciones operacionales actuales de las plantas (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2018):

Tabla 11: Listado de tecnologías con mayor aplicabilidad en la Industria del Cemento en Chile. Fuente: Resultados Taller de Potencial de Reducción Industria del Cemento en Chile, (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2018)

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO ₂
Eje de Reducción: Eficiencia Energética	
Enfriador de clinker de tecnología eficiente.	Reduce entre 22 y 26 Kg CO ₂ /ton clinker
Materias primas alternativas descarbonatadas para la producción de clinker.	Reduce entre 0 y 100 Kg CO ₂ /ton clinker
Eje de Reducción: Combustibles Alternativos	
Cambio de combustible: Carbón/pet-coke por petróleo/gas/biomasa.	Reduce entre 50 y 80 kg CO ₂ /ton clinker
Combustibles alternativos, reemplazando	Reducción entre 0 y 80 kg CO ₂ /ton clinker

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
combustibles fósiles convencionales.	
Pretratamiento de combustibles alternativos (molienda y secado)	Reduce entre 0 y 14 kg CO2/ton clinker
Eje de Reducción: Eficiencia Eléctrica	
Optimización en el control y automatización de plantas.	Reduce entre 4 y 17 kg CO2/ton clinker
Eje de Reducción: Reducción de Factor Clinker	
Reducción adicional del contenido de clinker mediante uso de escorias granuladas de alto horno.	Reduce entre 0 y 390 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de ceniza volante.	Reduce entre 0 y 90 kg CO2/ ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de puzolanas naturales.	Reduce entre 0 y 90 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de otros materiales.	Reduce entre 0 y 88 kg CO2/ton cemento

Tal como se aprecia en la Tabla N° 11, la priorización realizada por FICEM considera sólo 4 ejes de reducción definidos por ECRA. Lo anterior, se debe a las características de las plantas que actualmente operan en Chile, sobre todo considerando la antigüedad de algunas y las difíciles opciones de cambios en infraestructura. Ahora bien, lo anterior no significa que la Industria del Cemento Nacional no se encuentre explorando nuevas opciones de reducción, sin embargo, las presentadas en la tabla son las que cuentan con mayor evidencia para una implementación más rápida (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2018).

2.3.2.3. Desafíos de Implementación en Ejes de Reducción

Los ejes de reducción de emisiones de CO2, basados en las tecnologías investigadas por ECRA, tienen como objetivo apoyar la transición de la Industria del Cemento

hacia una economía baja en carbono (Cement Sustainability Initiative CSI, 2018). A continuación se presenta una síntesis de los desafíos de implementar cada eje de reducción.

Análisis de los desafíos de implementar cada Eje de Reducción. Fuente: Resultados Taller de Potencial de Reducción Industria del Cemento en Chile, (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2018)

Eje de Reducción	Desafíos de Implementación
Eficiencia Energética y Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Costos de de capital altos, por modificaciones estructurales necesarias. • Necesidad de mejorare los sistemas de operación, junto con capacitaciones a los operadores. • Complemento con exigencias ambientales de mayor exigencia, que pueden conllevar aumentar el consumo de energía.
Combustibles Alternativos	<ul style="list-style-type: none"> • Mercado de combustibles alternativos idóneos para aumentar % de reemplazo, con condiciones óptimas de poder calorífico, humedad, concentración de cloro, entre otros aspectos que son clave para garantizar una correcta operación de los hornos. • Implementación de procesos de pretratamiento de combustibles para garantizar composición y combustión óptima. • Normativa ad hoc en tiempo y forma para aumentar % de reemplazo. • Aceptación social del proceso de Coprocesamiento. • Barreras de tramitación de permisos asociados.
Nuevas Materias Primas	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad regional de adiciones para cemento, en términos de cantidad y calidad y su impacto en los precios. • Estándares de construcción con mayor flexibilidad dependiendo de las necesidades de materiales de construcción. • Logística compleja entre las fuentes de las adiciones y las plantas de cemento y hormigones. • Análisis de ciclo de vida e investigación sobre propiedades de materiales aglomerantes alternativos al clinker.

Eje de Reducción	Desafíos de Implementación
Captura de carbono, almacenaje y uso	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos asociados a la captura de CO₂, en comparación con el costo específico de la producción de cemento. • Desarrollo de mercado de opciones de captura, almacenaje y uso de CO₂. • Desafíos técnicos y de innovación para la utilización de CO₂, considerando el aumento en la eficiencia de los procesos químicos y la innovación para nuevas vías de utilización de CO₂. • Enfoque de evaluación del ciclo de vida.

Junto con lo mencionado anteriormente, todos los Ejes de Reducción analizados por CSI, requieren un esfuerzo importante en materia de definir objetivos en materia de investigación y desarrollo (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2019).

2.3.2.4. Guía SBTi para el Establecimiento de Objetivos

En el mes de marzo de 2022, Science Based Targets Initiative (SBTi) emite un documento para consulta pública denominado Cement Science Based Target Setting Guidance, el cual junto con mencionar algunas de las tecnologías analizadas por ECRA, concluye que la captura y el almacenamiento de carbono corresponden a ejes "centrales" para mitigar las emisiones del proceso de producción de clinker. El informe establece que todos los escenarios de descarbonización en el ámbito de la producción de cemento incluyen la necesidad de tecnologías desconocidas o innovadoras para hacer frente a las emisiones del proceso del cemento (Science Based Targets initiative SBTi, 2022) .

Asimismo, el informe plantea que la asignación del presupuesto global de carbono a los sectores a través de modelos ascendentes. Por lo tanto, el tamaño de la

asignación a cada sector depende en parte de las palancas de descarbonización disponibles y su costo. El cemento, por ser un gran sector industrial, y por la naturaleza de su proceso, puede tener una tasa de descarbonización que podría diferir de la tasa general de descarbonización posible de la sociedad en su conjunto. Por estas razones, se justifica una ruta específica dedicada al cemento que permita a las empresas establecer objetivos basados en alternativas de compensación, junto con la implementación gradual de proyectos de innovación asociados a nuevas tecnologías debido a las dificultades de implementación que pueden tener estas tecnologías en el corto plazo (Science Based Targets initiative SBTi, 2022).

2.3.3. Propuesta de Estrategia de Descarbonización

La Industria del Cemento en Chile debe implementar una Estrategia de Descarbonización con el objetivo de asegurar la sostenibilidad de sus operaciones en el tiempo, contemplando las nuevas exigencias en materia tributaria y además de los compromisos adquiridos por Chile en materia de Carbononeutralidad.

Considerando las recomendaciones entregadas por los entrevistados, junto con los resultados de la revisión de literatura específica realizada para el desarrollo de la presente investigación, a continuación se presenta una propuesta de estrategia de Descarbonización.

2.3.3.1. Hallazgos Relevantes de la Investigación

Independiente de que los expertos entrevistados tengan una percepción sobre el lento avance que ha tenido la implementación de IPC en Chile, de todas formas se vislumbra con una mayor probabilidad futura los escenarios de Transición Acelerada y Carbono Neutralidad, quedando atrás la opción de Escenario de Recuperación Lenta Post Covid. Lo anterior, demuestra que la industria cementera

requiere con urgencia transitar hacia la carbono neutralidad disminuyendo sus emisiones en una proporción importante antes del año 2030, ante la inminente entrada en vigencia de los distintos Instrumentos de Precio al Carbono.

La mayoría de los entrevistados concuerda que el instrumento idóneo para regular las emisiones de CO₂ de este tipo de industrias, debería corresponder a los permisos de emisión transable. Independiente de ello, y considerando que en los próximos años eventualmente comenzará a regir un mix de IPC, que consideran la operatividad simultánea del Impuesto Verde, Permisos de Emisión Transable y Sistemas de Compensaciones (Offset), esta implementación debe ser diferenciada y gradual considerando las limitaciones que tiene el sector cementero, la cual debe controlar el aumento desproporcionado en los precios de sus productos, con ocasión de la adquisiciones de cemento “verde” por parte de las constructoras.

Por lo anterior, la estrategia debe contemplar ser la identificación de las medidas de descarbonización a corto, mediano y largo plazo, con una respectiva priorización considerando disponibilidad, costos y la contribución que realizará la industria a la mitigación del cambio climático.

2.3.3.2. Proceso de Diseño de Estrategia

La estrategia al momento de ser diseñada debe contemplar los siguientes elementos clave, considerando la complejidad que conlleva modificar la actual forma de operar de la Industria:

- **Enfoque pragmático:** La estrategia debe ser construida para identificar resultados concretos en tiempo y espacio.
- **Involucramiento de Stakeholders:** La estrategia debe reunir en todas sus etapas a distintos líderes, internos y externos a la Industria del Cemento Nacional, con

el objetivo de ampliar visiones respecto de las nuevas disposiciones y los cambios que deben implementarse.

- Intercambio de experiencias: La estrategia debe considerar adquirir conocimiento sobre experiencias de otros sectores industriales, ya sea que cuenten con limitantes o no, sometidos a exigencias en materia de carbononeutralidad en el país, con el objetivo de generar alianzas y aunar esfuerzos.
- Predisposición a la acción: La estrategia debe ser diseñada para abordar problemas reales en torno a la descarbonización, centrándose en la implementación de iniciativas viables y destinando fondos para investigación y desarrollo para las opciones tecnológicas que aún no poseen las condiciones técnico económicas para ser implementadas.
- Identificación de presupuestos asociados: Para garantizar el éxito de la etapa de diseño, se requiere identificar claramente las necesidades económicas de impulsar una estrategia de este tipo a nivel organizacional, técnico, político, entre otros aspectos.

Desde el punto de vista del equipo requerido, y considerando un enfoque colaborativo, la estrategia necesita de la participación de líderes en los siguientes ámbitos: Sostenibilidad, finanzas, proyectos, adquisición y cadena de suministro, estrategia e innovación, personas y talento, asuntos públicos y comunicaciones. Adicionalmente, necesitará de la contratación de expertos en las siguientes materias: transformación a gran escala, energía, digitalización, captura y uso de CO₂, nuevos combustibles, hidrogeno verde, offsets, cadena de suministro, circularidad, entre otros.

2.3.3.3. Proceso de Elaboración e Implementación

La estrategia deberá conformarse por las siguientes etapas:

- **Reconocimiento de situación actual y línea de base:** Si bien la Industria del Cemento continuamente realiza una revisión y construcción de sus inventario de emisiones y línea de base para alcances 1, 2 y 3, es necesario identificar puntos críticos para desarrollar metodología, con el objetivo de abordar las brechas que existen en este tipo de levantamientos, sobre todo lo asociado a emisiones de Alcance 3. Esta etapa es clave para identificar y discutir sobre los principales contribuyentes de las emisiones de CO₂ en las operaciones.

- **Definición de ambiciones y horizonte de tiempo:** Se requiere de la alineación de distintas áreas de la Industria sobre la ambición, focos, alcance, compromisos, horizonte, tecnologías y recursos para abordar la meta cero emisiones en su conjunto. Asimismo, debe considerar la selección de plantas, procesos y tecnologías, y su respectiva secuencia de abordaje. En esta etapa se deberían producir los siguientes hitos:
 - Alineamiento en objetivos de transformación operacional.
 - Análisis de estudios de casos y/o tendencias tecnológicas con aplicabilidad en Plantas.
 - Definición de rol de la Industria Cementera en el proceso de descarbonización del país.

- **Implementación y seguimiento de resultados:** Una vez se hayan definido las ambiciones y el horizonte de tiempo del cumplimiento de cada objetivo, es necesario diseñar un sistema de seguimiento y control de resultados. Esto sin duda alguna no será una tarea sencilla, considerando la cantidad de

proyectos que se verán involucrados en la estrategia. Asimismo, es necesario que cada compañía de la industria, establezca modelos de gobernanza para la transición, con actualizaciones periódicas de metas, objetivos y resultados. Lo anterior resulta relevante, en la medida que probablemente una estrategia de descarbonización de este tipo tendrá cambios cada 5 o 10 años, incorporando nuevos proyectos o desechando los que no se encuentran dando los resultados esperados.

2.3.3.4. Abordaje de Ejes de Reducción de CO2

Independiente de la perspectiva social, política y legislativa asociada a la entrada en vigencia de los instrumentos de precio al carbono y las nuevas disposiciones que deberá enfrentar la industria para alcanzar la carbono neutralidad, la Estrategia de Descarbonización debe centrarse en la implementación de proyectos de reducción de CO2, lo cual es posible vislumbrar considerando de los antecedentes recopilados, tanto en las entrevistas semiestructuradas como en la revisión de tecnologías realizada a través de literatura específica. A continuación, se presenta una propuesta de los ejes de trabajo que debería contener la Estrategia de Descarbonización.

Una reducción efectiva de las emisiones de CO2 implica actuar sobre toda la cadena de valor: Cemento, hormigón y construcción. Dada la amplitud de la cadena, la presente investigación sólo se enfocará en identificar los ejes de reducción de CO2 en la producción de cemento, los cuales se agruparán de la siguiente manera:

- En Producción de clinker:
 - Coprocesamiento de combustibles alternativos
 - Eficiencia energética térmica
- En la producción de cemento

- Reducción del contenido de clinker en el cemento (factor clinker)
- Eficiencia energética eléctrica

Coprocesamiento de Combustibles Alternativos

El coprocesamiento corresponde a un concepto de desarrollo sostenible basado en los principios de la ecología industrial, que se centra en el papel potencial de la industria para reducir las cargas ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, siendo uno de los objetivos principales convertir los residuos de una industria en materia prima o recursos energéticos de otra. En el sector del cemento, la aplicación del concepto es el uso de residuos como combustibles y materias primas.

La Hoja de Ruta FICEM prevé una sustitución por coprocesamiento de 30% al año 2030⁴. Esto implicaría coprocesar aproximadamente unas 148.000 toneladas anuales de combustible alternativo (de tipo líquido o sólido) y 7.500 toneladas anuales de neumáticos fuera de uso.

Suponiendo el cumplimiento del compromiso de sustitución por coprocesamiento de hasta un 30% del combustible fósil, para el año 2030 se estima una reducción de emisiones de 59 kg CO₂ por tonelada de clínker teniendo como base el año 2021.

La tasa promedio de coprocesamiento en Chile informada para 2014 se ha mantenido en el mismo orden de magnitud hasta la actualidad (aumentó de 12,0% a 12,6% al año 2021), mientras que los países más avanzados siguen mostrando avances según lo reportado por GNR para el año 2017, con la Unión Europea por

⁴ El Coprocesamiento alcanzó un 12% en 2014 según hoja de ruta FICEM-ICH y 12,6% en 2021 según datos entregados por especialistas de empresas cementeras que realizan coprocesamiento.

ejemplo, presentando una tasa de sustitución promedio de un 46,5 %. Considerando que el 12,6% de coprocesamiento registrado en Chile en 2021 se encuentra muy por debajo de la mejor experiencia internacional, y por debajo de las proyecciones de CSI para 2030 y 2050 (17% y 30% respectivamente), existe un importante potencial de desarrollo a nivel local de este eje de reducción.

De acuerdo con los papers de la ECRA, alcanzar un 40% de coprocesamiento implica reducir aproximadamente 50 kg de CO2 por tonelada de cemento, lo que podría representar una reducción de un 8% del total de emisiones de CO2 de la industria cementera en Chile. Es necesario destacar que el coprocesamiento no sólo aporta a la reducción de CO2, sino que también es una alternativa segura de gestión de residuos mediante su valorización energética, aspecto relevante de gestión consagrado en los nuevos marcos regulatorios a nivel nacional.

Ahora bien, tal como se ha detallado en secciones anteriores, el Coprocesamiento representa un importante desafío, que sin duda alguna actualmente posee algunas barreras de implementación. En vista de ello, a continuación se proponen algunas medidas a implementar, las cuales deben ser abordadas al inicio de la ejecución de la Estrategia de Descarbonización.

Tabla 12: Descripción de medidas específicas para implementación de aumento en Tasas de Coprocesamiento en Chile. Fuente: Elaboración Propia.

● Medida	● Descripción
Apoyo en capacitación de autoridad sanitaria y ambiental en Coprocesamiento	Diseñar y materializar programas específicos de capacitación orientados al sector público (funcionarios pertenecientes al Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Salud y Seremías correspondientes, responsables del desarrollo regulatorio, evaluación ambiental y fiscalización), los que podrían comprometerse a facilitar las condiciones para un desarrollo armónico del coprocesamiento, tanto desde la responsabilidad de las empresas como del compromiso del sector público involucrado.

● Medida	● Descripción
Mesa de Trabajo Autoridad - Industria	Se recomienda que, bajo el marco de un instrumento formal de cooperación público-privada, como un Acuerdo de Producción Limpia, se desarrolle un proceso de discusión constante entre la Industria de las Autoridades respectivas, que tenga como objetivo formalizar el compromiso de la industria para el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente con énfasis en las emisiones de CO2, promoviendo y regulando al mismo tiempo el coprocesamiento mediante distintos instrumentos regulatorios y guías.
Ratificación de la opción de Coprocesamiento para valorización de fracción no reciclable de envases y embalajes Ley REP	Presentar a la Autoridad proyectos en donde el coprocesamiento pueda ser una solución para fracción no reciclable de envases y embalajes. Actualmente el Reglamento específico de metas de envases y embalajes de la Ley, incluye al coprocesamiento como alternativa de valorización, sin embargo, no la ubica como opción inicial. Por lo anterior, los actores de la Industria deben iniciar un proceso colaborativo en apoyo de los generadores de residuos que requieran cumplir las metas asociadas a la Ley REP. Los proyectos a presentar a la Autoridad, deben destacar los beneficios de la solución desde un punto de vista de ecología industrial.
Involucramiento Proactivo con Sistemas de Gestión en Ley REP	Sin lugar a dudas la implementación de la Ley 20.920 se convertirá en una de las principales plataformas de negocio para el futuro coprocesamiento en Chile. En este sentido, será fundamental la vinculación temprana de la industria con los Sistemas Integrados de Gestión REP (SIGs), los cuales actualmente se encuentran en conformación. En particular, la coordinación y búsqueda de sinergias con los SIGs dedicados a los productos prioritarios de tipo neumáticos fuera de uso, envases y embalajes (tanto de origen domiciliario como no domiciliario) puede generar oportunidades de provisión sostenible de combustibles derivados de residuos en el mediano y largo plazo.
Socialización del Coprocesamiento en Comunidades a Plantas Cementeras	El principal objetivo de un proyecto de este tipo es dar sentido social, desde una perspectiva de relaciones con la comunidad, al proyecto de coprocesamiento en una planta cementera específica. Se recomienda a las operaciones que actualmente realizan coprocesamiento, presentar los proyectos de aumento de tasa de sustitución energética a los municipios correspondientes. Esto significa hacer partícipe a la

● Medida	● Descripción
	comunidad local en la etapa de diseño conceptual del proyecto, para posteriormente acompañar en su implementación.
Capacitación de la Industria en materias relacionadas a Coprocesamiento	Los profesionales especializados de la Industria deben encontrarse en formación continua, principalmente a través de programas específicos de capacitación para los profesionales y técnicos que tendrán bajo su responsabilidad el desarrollo del coprocesamiento, tanto en lo que se refiere a la implementación de un modelo de negocios, como en lo relativo a las operaciones de producción de clínker que serán “intervenidas” por el coprocesamiento.

Eficiencia Energética Térmica

El proceso de fabricación del clínker es un proceso que demanda grandes cantidades de energía térmica. Como se mencionó anteriormente, aproximadamente 30% de las emisiones de CO₂ de la industria cementera provienen del combustible utilizado para proveer esa energía térmica.

Considerando lo anterior, cabe destacar que no todas las instalaciones de producción de clínker tienen la misma eficiencia térmica, la cual depende de varios factores tales como la edad de las instalaciones, el estatus de su mantenimiento, la composición de las materias prima utilizadas, la tecnología empleada, los tipos de combustibles, etc. En ese sentido, existen criterios no se pueden modificar y algunos que son inherentes a la situación geográfica de la planta (European Cement Research Academy, 2022).

Independiente de ello, las investigaciones de la ECRA realizadas a la fecha, identifican varias medidas que permitirían aumentar la eficiencia energética térmica, tales como:

- Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas.
- Instalar enfriadores de clínker de tecnología eficiente.
- Añadir etapas (ciclones) en torres precalentadoras.
- Aumentar la capacidad de los hornos.

Las medidas de tipo aumento de capacidad o aumento del número de etapas en torres precalentadoras necesitan un nivel de inversión que no se justifica solamente con la correspondiente reducción de emisiones, por lo tanto se concluye que la implementación necesitaría una importante justificación.

Por lo anterior, la barrera principal es económica si el nivel de inversión necesario no se paga a través del ahorro en costo de producción, y esta barrera no se puede superar con las condiciones de mercado actual.

El consumo energético térmico en Chile bajo de 3.700 MJ /t de clínker en el 2014 a 3.550 MJ /t de clínker en el 2017, reflejando el cierre del último horno de baja eficiencia de la industria. Con este nuevo indicador Chile alcanzó el promedio mundial y el de Latinoamérica (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2019).

Como se explicó anteriormente, no resulta económicamente viable seguir mejorando la eficiencia energética térmica sin mayores inversiones en equipos, que solamente la necesidad de una ampliación de capacidad justificaría. El aumento del uso de combustible alternativo ya va a resultar en un aumento del consumo energético térmico, por lo que las investigaciones sugieren mitigar este aumento a través de medidas como el mejoramiento de la capacidad de cocción de las materias primas y la capacitación de operadores, las cuales debiesen formar parte de las medidas a implementar en las operaciones.

Reducción del Factor Clinker

Como se mencionó anteriormente, la principal fuente de emisiones de CO₂ es el proceso productivo del clínker, principalmente el asociado a la descarbonatación de las materias primas. Por lo anterior, reducir el contenido de clínker en el cemento es, sin dudas, el eje más eficiente para reducir las emisiones de CO₂ en el cemento.

Los cementos producidos históricamente en el mundo contenían predominantemente un alto contenido de clínker (95%), y este tipo de cemento es todavía el más utilizado en varios países, ya sea por falta de conocimiento técnico de los actores o porque no se encuentran materiales de sustitución al clínker a costo abordable (Cementis, 2020).

A pesar de que Chile ya tiene uno de los contenidos de clínker en el cemento el más bajos del mundo (64,8% al cierre de 2021) (Comisión de Mercado Financiero, 2022), aun existe un potencial de reducción. La mayoría de los cementos adicionados producidos en Chile lo son a base de puzolana natural, disponible en cantidad casi ilimitada. Se supone que para llegar a un factor clínker tan bajo, la industria cementera chilena ya optimizó el uso de materiales de sustitución de clínker, respetando las exigencias de resistencias de los diferentes cementos.

Reducir el contenido de clínker en el cemento más allá de este nivel necesita:

- Producir cemento con un factor clínker inferior al 64% sin ir debajo del factor clínker mínimo de 50% permitido según la norma chilena NCh 148 Cemento – Terminología, clasificación y requisitos.
- Que el nuevo cemento de bajo factor clínker no altere las resistencias de los cementos actuales.

Como se explicó anteriormente, la calidad del cemento influye directamente sobre el volumen de cemento que se va a usar en un m³ de hormigón para una cierta resistencia. Por lo tanto, este eje de reducción indirectamente reduce el CO₂ emitido por el cemento y finalmente por el hormigón.

Para reducir el factor clinker, es necesario incorporar otro tipo de materias primas entre las cuales es posible considerar: escorias, puzolanas naturales y artificiales (residuos adaptados).

Sin embargo, y a pesar de lo auspicioso que puede llegar a ser este eje de reducción, según entrevistas con especialistas de empresas cementeras, parece difícil reducir más allá el factor clinker con las adiciones existentes. La calidad de la puzolana natural chilena no permite aumentar su contenido en el cemento sin deteriorar la calidad final del producto, y actualmente la industria cementera ya está utilizando todo lo que se puede utilizar en términos de cenizas volantes y escorias locales. En cuanto a la importación de estas adiciones no sería rentable.

Por lo anterior, reducir el factor clinker necesita cambiar la forma de producir cementos, y actualmente solo se identifican dos oportunidades:

- Utilizar materiales de origen minero, para los que no existen todavía estudios finalizados ni validados por la comunidad científica/técnica, que permitan aprovechar el potencial de estas materias tanto desde un punto de vista técnico, de disponibilidad, y de costo.
- Utilizar arcillas calcinadas.

La ECRA, en su paper N°36, menciona un potencial de reducción de hasta 180 kg CO₂ por tonelada de cemento, produciendo cemento con arcilla calcinada y caliza,

lo cual sitúa a esta solución como uno de los ejes más efectivos para la reducción de CO2 en la industria cementera. ECRA menciona un nivel de inversión entre 8 y 12 millones de EUR (USD 9,7 y 13,2 millones) para producir hasta un millón de toneladas de este cemento.

Considerando la información revisada, la implementación de este eje de reducción requiere de algunas medidas específicas, las cuales se detallan a continuación:

Tabla 13: Descripción de medidas específicas para implementación de reducción de Factor Clinker. Fuente: Elaboración Propia.

Medida	Descripción
Demostrar factibilidad técnica y económica del cemento con caliza y arcilla calcinada a través de Pilotos	A pesar de que este tipo de cemento ya tiene años de existencia en países como Brasil, en Chile se requerirá hacer pruebas técnicas, con materias primas locales. En términos económicos la producción de arcilla calcinada requerirá inversiones en equipos de calcinación, por lo que será necesario calcular la rentabilidad de esta inversión caso a caso.
Programas de Concientización y Capacitación	El objetivo es asegurarse que todos los actores involucrados en la prescripción o el uso de este nuevo cemento para Chile sean conscientes de sus ventajas en términos de calidad y de efecto sobre emisiones de GEI. La concientización podría hacerse a través de conferencias abordando, por ejemplo, los siguientes temas: <ul style="list-style-type: none"> - Cemento con caliza y arcilla calcinada. - Uso internacional de este tipo de cementos. - Compatibilidad con normas técnicas chilenas. - Principales ventajas. - Principales emisiones y consumos de energía y combustible. - Costos de producción y volumen necesario en el hormigón. - Características técnicas de este tipo de cemento.
Iniciativas por el sector Publico	Varias empresas cementeras a través del mundo iniciaron producción y construcción de unidades de producción de cemento a base de arcilla calcinada. Se considera que una vez que la notoriedad internacional de

Medida	Descripción
	este cemento sea reconocida no va a ser difícil convencer al mercado chileno. Se sugiere que una vez que las instalaciones de producción estén establecidas en Chile, el sector público prescriba el uso de cemento con arcilla calcinada en obras públicas de referencia, comenzando por un proyecto de demostración.

Eficiencia Energética Eléctrica

Según la Hoja de Ruta FICEM-ICH el factor de emisión de la red eléctrica externa promedio utilizado en Chile es de 0,398 kg de CO₂ por kWh. Asumiendo un consumo energético eléctrico medio en Chile de 102 kWh /t cemento, las emisiones máximas de CO₂ relacionada a la energía eléctrica serían 0,398 kg CO₂ x 102 kWh, lo que equivale a 40,59 kg CO₂ por tonelada de cemento, lo que representa menos de 7% de las emisiones total de CO₂ por tonelada de cemento. WBCSD-CSI estima que las reducciones de emisiones de CO₂ en el eje Consumo Eléctrico pueden ser del orden del 3% de las rebajas de emisiones totales de la industria. En consecuencia, la incidencia de este eje es marginal en comparación con el coprocesamiento y el factor clínker. De todas maneras, en el espíritu de utilizar todas las vías posibles para descarbonizar, existen dos opciones factibles y reconocidas por ECRA para reducir las emisiones asociadas a este eje, independiente de la magnitud de reducción:

- Utilizar fuentes de producción de energía eléctrica con bajo nivel de emisiones de CO₂: energía renovable,
- Reducir el consumo eléctrico específico.

Por lo anterior, se recomienda que la industria adopte estas prácticas, independiente de la proporción de reducción que represente.

2.3.3.5. Agenda de Cooperación entre Industria y Estado

Tal como se ha detallado en secciones anteriores, para lograr implementar una estrategia de descarbonización y de manera consecuente asegurar la sostenibilidad del negocio que actualmente desarrolla la Industria del Cemento en Chile, es necesario abordar el desafío desde múltiples visiones. En ese sentido, la estrategia descarbonización debe ser diseñada e implementada considerando distintos factores, y por lo mismo a través de distintos lineamientos de gestión, principalmente social – política, económica, y tecnológica, con el objetivo de definir una solución sostenible que considere aspectos ambientales, sociales y económicos en toda la cadena de valor.

Considerando lo revisado, para garantizar el éxito de la transición de la Industria, se requiere iniciar una Agenda de Cooperación por parte de la Industria con las Autoridades y Servicios Públicos involucrados, con el objetivo de asegurar que la implementación de políticas tributarias asociadas a carbono neutralidad no afectarán a políticas de vivienda, construcción y edificaciones.

3. ARTÍCULO

Estrategias de la Industria Cementera para Adaptación a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad

Diana Arndt González a, Alex Godoy Faúndez b

*^a Magister en Gestión de la Sustentabilidad de Facultad de Ingeniería,
Universidad de Desarrollo, darndt@udd.cl*

*^b Director de Postgrados y Educación Continua, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Desarrollo, alex.godoy@ingenierosudd.cl.*

RESUMEN:

Prontamente la industria cementera se encontrará dentro de los sujetos afectos a pago de impuesto verde por emisiones de CO₂ generadas en sus respectivos hornos de clinker. Por otro lado, actualmente se encuentran en desarrollo otras normativas, las cuales implicarán la entrada en vigencia de instrumentos de precio al carbono adicionales. Considerando esta realidad, el objetivo de la presente investigación es definir la estrategia que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. Para lograr lo anterior, se ha aplicado un enfoque mixto con el objetivo de medir la implicancia económica del impuesto verde en una planta tipo con operación vigente en el país, para posteriormente recabar información con distintos expertos en la materia, sobre la operatividad futura de instrumentos de precio al carbono. Finalmente, esta investigación, en base a literatura específica junto con la recomendación experta de los entrevistados, propone en líneas generales los ejes de de descarbonización que debe adoptar la industria. Los principales resultados obtenidos, es que la entrada en vigencia del impuesto verde influye de manera relevante en la rentabilidad de las empresas cementeras a nivel nacional. Existirán nuevos instrumentos de precio al carbono que entrarán en vigencia años próximos. La industria cementera requiere una estrategia de descarbonización para garantizar la sostenibilidad de sus operaciones.

PALABRAS CLAVE: Impuestos verdes, cemento, clinker, precio al carbono, descarbonización.

1. Introducción

La industria del cemento es altamente necesaria para garantizar el desarrollo económico y social del país, y por lo mismo debe adaptar su funcionamiento con un horizonte bajo en carbono, con el objetivo de alinearse a las nuevas políticas medio ambientales en la materia.

Considerando la modificación a la legislación tributaria del 23 de agosto de 2018, la cual identifica al impuesto verde como único instrumento tributario aplicable a la industria para alcanzar el objetivo de la descarbonización de sus operaciones, es necesario que la Industria Cementera Nacional establezca una estrategia de descarbonización.

La presente investigación tiene como objetivo identificar el impacto económico que representa el pago por concepto de impuesto verde, además de identificar otros instrumentos de precio al carbono que eventualmente comenzarán a regir en el país en los próximos años. Finalmente, una vez conocidos los antecedentes anteriormente mencionados, este trabajo realiza una propuesta general de las acciones que debería contener una Estrategia de Descarbonización de la Industria, con el objetivo de no dejar de operar dentro del territorio y realizarlo con una menor huella de carbono.

Cambio Climático

El cambio climático, es la "importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más)", fenómeno que se ha atribuido al aumento en la concentración de GEI de origen antropogénico (CO₂eq, Metano, entre otros) en la atmósfera, generando así un aumento en la temperatura media global de la superficie terrestre denominado "Calentamiento Global" (IPCC, 2013). A partir de ello y de acuerdo a una serie de proyecciones trabajadas por el IPCC, los distintos países han relevado la importancia de la acción climática global, lo cual permea a distintos sectores industriales, entre ellos la Industria del Cemento.

Emisiones de CO₂ de la Industria Cementera

En el año 2014 la producción mundial de cemento emitió aproximadamente 3 GTon de CO₂, lo que corresponde al 7% del total mundial. Se proyecta que la demanda de cemento seguirá aumentando y sería un 20% más alta que la actual que la actual a nivel mundial para 2050, si es que no existen esfuerzos para optimizar su uso en edificios y construcción (Science Based Targets initiative SBTi, 2022). Las emisiones de CO₂ de la fabricación del cemento, son resultado de dos actividades principalmente: Combustión (40% del total generado de CO₂ aproximadamente) y calcinación de

Carbonato de Calcio, principal materia prima para la fabricación del cemento (60% restante aproximadamente).

Acuerdo de París y NDC Chile

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21 en París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2,0 preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales (Naciones Unidas, 2015). Chile, al igual que todas las Partes que han suscrito el Acuerdo de París, debe implementar las acciones necesarias para cumplir con los compromisos adquiridos en su NDC, y así transitar hacia un desarrollo inclusivo y sostenible.

La meta de mitigación que se establece en la NDC Chile 2020, corresponde a 95 MtCO₂eq al 2030, comprometiendo además alcanzar el máximo de emisiones (año peak) al 2025, y un presupuesto de emisiones de GEI que no superará las 1.100 MtCO₂eq para el período 2020-2030. Esta meta, corresponde a un punto intermedio en el camino a la carbono neutralidad al 2050 que el Gobierno de Chile ha establecido en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático (Contribución Nacional Determinada a Nivel Nacional NDC, 2020).

Ley Marco Cambio Climático

El Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático, tiene como objeto hacer frente a los desafíos del cambio climático; transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero, hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de los mismos; reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático y dar cumplimiento a los compromisos internacionales asumidos por el Estado de Chile en la materia (Ministerio del Medio Ambiente Chile, 2020).

El proyecto de Ley Marco Cambio Climático, en el punto 2. Instrumentos de Gestión del Cambio Climático, establece que para cumplir los objetivos de mitigación y adaptación, se deben crear una serie de instrumentos de gestión, mecanismos y lineamientos financieros para enfrentar el cambio climático.

Instrumentos de Precio al Carbono

Una Política de Precio al Carbono, establece, a través de diversos medios, un precio/costo explícito o implícito sobre las emisiones de carbono con el objetivo de generar incentivos a la reducción o mitigación de emisiones. Este cargo puede ser sobre productos, actividades, procesos o decisiones de inversión.

los Instrumentos de Precio al Carbono (IPC), tienden a ser clasificados más que definidos según la literatura, refiriéndose a éstos como iniciativas o mecanismos que ponen un precio al

carbono de manera explícita a través de permisos de emisión transables, impuestos, offsets u otros mecanismos (GIZ, 2021). Por otra parte, (Pizarro, 2021) plantea una definición más amplia, estableciendo que un IPC es un vehículo de política que se implementa a través de una infraestructura legal e institucional, que puede poner un precio sobre las emisiones de carbono en sectores y/o entidades específicas, a través de regulaciones, rutinas o prácticas. Entre los principales instrumentos de precio se encuentran: Impuestos, Permisos de Emisión transables y los Sistemas de Compensaciones.

Implementación de Impuestos Verdes en Chile

Los impuestos verdes se definen como: “Instrumento económico que grava las externalidades producidas por su emisor. Su aplicación permite que quien contamine deba internalizar el costo y retribuir a través de un pago, generando un incentivo para que la fuente contaminante incorpore los costos asociados a las externalidades que producen y los reduzcan (García Bernal, 2018)”.

Teóricamente, con la aplicación del Principio de Eficiencia Económica, el impuesto verde pretende que las empresas intenten reducir su carga tributaria a través del mejoramiento de procesos, cambio de combustibles o innovación tecnológica (Pizarro, 2021). En Chile operan desde 2014 para contaminantes NOX, MP, SO2 y

CO2. Para emisiones de fuentes fijas, entraron en vigencia en 2017.

Propuesta de Modificación Tributaria sobre Impuesto Verde y afectación a la Industria Cementera

La Ley de Modernización Tributaria (Ley 21.210), introduce una serie de cambios en materia de establecimientos afectos a Impuesto Verde, junto con una nueva incorporación de sistemas de compensación. De acuerdo a esta modificación, la industria cementera se encontraría dentro de los sujetos afectos al impuesto, por encontrarse en el rango de fuentes fijas con emisiones anuales ≥ 25 mil toneladas anuales de CO2 o ≥ 100 ton de MP.

Valor Económico de la Industria del Cemento

La industria cementera en Chile ha evolucionado en estructura, composición y modelos de negocio durante los últimos años. Desde una industria exclusivamente de producción local en los años 90 y anteriores, la industria ha mutado hacia una composición mixta donde la producción local de clinker, que enfrenta complejas estructuras de costos, ha dado lugar a la importación de clinker e incluso cemento en proporciones relevantes. En la actualidad, la producción de clinker nacional se concentra en 3 plantas integradas distribuidas a lo largo del país, las cuales se encargan de producir clinker y cemento en la misma instalación, adicionalmente en la actualidad operan una serie de estaciones de molienda de clinker

importado distribuidas en el territorio nacional, principalmente cercanas a puertos, las cuales se abastecen de materias primas importadas a costos competitivos.

La producción nacional de cemento (plantas integradas y moliendas) fue de 4.388.207 toneladas en el 2021, en donde el contenido de clinker en cemento alcanzó un 67% (Cámara Chilena de la Construcción, 2022). Asumiendo que el factor clinker promedio informado se ha mantenido constante hasta 2021, la utilización de clinker es de aproximadamente 2,9 millones de toneladas. Esto representa un volumen de clinker importado relevante, considerando que Chile es un país que tiene suficiente capacidad de producción local. Las razones de por qué el costo del clinker importado es tan atractivo para la industria nacional, pudiendo llegar a ser equivalente o incluso menor al costo del clinker producido localmente, son las siguientes:

- I. El costo de producción de clinker en Chile es alto, debido a que se necesita un costoso proceso para mejorar la calidad de la caliza, o bien se puede adquirir caliza de buena calidad, pero se encuentra en zonas lejanas a las plantas, lo que induce un alto costo de transporte.
- II. Chile exporta altos volúmenes de productos mineros a Asia (Vietnam, China, Tailandia, Corea del Sur, etc.). Los barcos que llevan estas mercancías, en vez de regresar sin carga, son

utilizados para el transporte de clinker desde Asia hacia Chile a bajo costo (logística reversa).

En Chile, el 60% del cemento se vende a granel y el 40% restante en saco. Sobre el consumo anual de hormigón premezclado en Chile, este se encuentra entre 10 y 11 millones de m³. Lo anterior, representa un EBITDA de la industria del Cemento nacional que ha ido en aumento desde los 120 a 150 millones de dólares aproximadamente, entre el año 2015 y el 2021 respectivamente, considerando las tres compañías más grandes que poseen más del 85% del mercado (Comisión de Mercado Financiero, 2022).

2. Metodología

La presente investigación posee un enfoque mixto. Inicialmente se realiza un análisis cuantitativo del impacto económico de la entrada en vigencia del impuesto verde en la Industria del Cemento Nacional, considerando 3 distintos escenarios tarifarios. Para ello, se identifica la línea de base de generación de CO₂ anual de un horno promedio de clinker, considerando datos operacionales de los 3 hornos de clinker que actualmente operan el país. Una vez identificada la generación de CO₂, se proyectan los valores de recaudación por concepto de impuesto verde, considerando 3 distintos escenarios tarifarios de Precio al Carbono hasta el año 2050. Posteriormente, se calcula la

proporción que significaría el pago de impuesto verde contra EBITDA Promedio de Industria.

En segundo lugar, se realizan entrevistas semiestructuradas a 8 expertos en materias de carbono neutralidad, instrumentos de precio al carbono, cambio climático, entre otros temas afines, con el objetivo de identificar otros instrumentos de precio al carbono que regirán en Chile en los próximos años, en base a 3 distintos escenarios basados en la Planificación Energética de Largo Plazo, junto con su respectivo régimen de implementación.

Finalmente, para identificar los ejes que debería tener una estrategia de descarbonización en la Industria del Cemento Nacional, se recoge información de las entrevistas realizadas, junto con una revisión sistemática de literatura, para identificar las distintas opciones que eventualmente tienen potencial de reducir la generación de CO₂ y de esta forma proponer una Estrategia de Descarbonización en líneas generales, considerando ejes de diseño e implementación.

Implicancia Económica del Impuesto Verde en la Industria Cementera Nacional

Para efectos de definir una línea de base de generación de CO₂, se consideran los promedios de datos operacionales de los 3 principales hornos de clinker que operan en Chile, de los años 2018, 2019 y 2020. Una vez recogidos los datos

operacionales, se aplica el Método B1 del Protocolo de CO₂ y Energía de la GCCA (Global Cement and Concrete Association), Versión 3.0, publicado en mayo de 2011, el cual consiste en la aplicación de factores de emisión para los procesos de calcinación de materias primas y combustión.

Con el cálculo de emisiones de CO₂ generadas por el Horno de Clinker Promedio, se procede a calcular el monto de pago por concepto de Impuesto Verde para las emisiones de CO₂ generadas en el proceso de combustión, calcinación de materias primas y el proceso global. Para ello, se consideran 3 escenarios de precio al carbono.

Finalmente, se calcula un EBITDA Promedio de Industria proyectado a 2050, en base a los EBITDA de las 3 principales empresas cementeras que operan en el país. Conocidos dichos valores, se procede a calcular la proporción que representaría el pago de impuesto verde en el EBITDA Promedio.

Las variables del ejercicio corresponden a las siguientes:

- Línea de base de emisión de CO₂ anual generada en Horno de Clinker Promedio [ton CO₂ eq/año]
- Recaudación económica por impuesto verde por emisión de CO₂ en Hornos de Clinker [USD/Año].
- Proporción que representa el Pago de Impuesto Verde en EBITDA Promedio de Industria [%]

Identificación y régimen de Implementación de otros Instrumentos de Precio al Carbono

Para identificar los otros Instrumentos de Precio al Carbono y su respectivo régimen de implementación, se realizó una entrevista semiestructurada a un total de 8 expertos en materias afines al tema en estudio, considerando un total de 10 preguntas de tipo abiertas y cerradas. Las preguntas realizadas se presentan a continuación:

Etapas 1: Caracterización del presente y expectativas futuras

Pregunta N° 1: En base a las siguientes alternativas, ¿Cuál es su percepción del avance de la implementación de instrumentos de precio al carbono en Chile?

- a) Estancado
- b) Lento
- c) Avanzado Moderado
- d) Rápido Progreso

Pregunta N°2: ¿Cuáles cree que son los principales drivers para la correcta implementación de los IPC en Chile?

Pregunta N°3: Según su percepción y en base a las siguientes alternativas, ¿cuál es el IPC de mayor relevancia para que Chile pueda llegar a ser carbono neutral de aquí al 2050?

- a) Impuesto Verde
- b) Permisos de Emisión Transable
- c) Sistemas de Compensación (offset)

Pregunta N° 4: De acuerdo a lo siguiente, ¿cuál cree que será el escenario de Chile (basado en los escenarios preliminares construidos en el marco de la Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía) para los próximos años?

- Escenario de Recuperación Lenta Post Covid.
- Escenario de Carbono Neutralidad 2050.
- Escenario de Transición Acelerada.

Etapas 2: Identificación de Instrumentos de Precio al Carbono

Pregunta N°5: En base a su respuesta anterior, ¿cómo cree que operarán los distintos IPC definidos por los instrumentos normativos a la fecha?

- e) Exclusivamente Impuesto verde
- f) Impuesto verde + Permisos de Emisión Transables (ETS)
- g) Impuesto verde + Permisos de Emisión Transable + Sistemas de Compensaciones de Carbono (Offset)
- h) Otras combinaciones

Pregunta N°6: De acuerdo a lo mencionado, según su percepción ¿cómo será la aplicación de estas disposiciones a la Industria del Cemento?

Pregunta N° 7: En su opinión, ¿cómo será el régimen de implementación de los IPC mencionados anteriormente?

Estrategia de Descarbonización

Para identificar los distintos ejes que debería tener una Estrategia de Descarbonización, se agregaron 3

preguntas adicionales a la entrevista semiestructurada realizada. A continuación, se presentan las preguntas realizadas:

Etapa 3: Alertas sobre las transformaciones

Pregunta N° 8: Según su percepción, ¿cuáles son los factores que obstaculizarían o facilitarían la correcta implementación de los IPC mencionados anteriormente en el país?

Pregunta N°9: ¿Qué tipo de amenazas representan estas nuevas disposiciones para industrias tales como la de los materiales de la construcción, entre ellas la del cemento?

Pregunta N°10: En su opinión, ¿cuáles serían los principales cambios que debería implementar la industria del cemento para adaptarse a estas nuevas disposiciones?

Junto con lo anterior, se realiza una revisión sistemática de literatura con la identificación de opciones tecnológicas que ha explorado la Industria para reducir sus emisiones de CO₂ y poder alcanzar la carbono neutralidad al 2050.

3. Resultados

3.1. Implicancia Económica del Impuesto Verde en la Industria Cementera Nacional

Línea de Base CO₂ en Horno de Clinker

Considerando los valores operacionales de los años 2018, 2019 y 2020 de los 3 principales hornos de clinker que operan en Chile, se obtiene un promedio de producción de cemento por horno equivalente a 686.306 ton/año.

Sobre el consumo energético, los valores son los siguientes:

Consumo total de Calor en el Horno [T]/año	1.845
Consumo de Combustibles Tradicionales [T]/Año	1.623
Consumo de Combustibles Alternativos [T]/Año	309

En base a los datos de producción y considerando:

- Factor de emisión por calcinación de 893 [kg CO₂/ton clinker consumido] y un contenido del 0,2% de carbón orgánico en la mezcla de materias primas ingresadas al horno.
- Factor de emisión de CO₂ por unidad de potencia producida de 409 [Kg CO₂/MWh].

La línea de base promedio de generación de CO₂ es la siguiente:

CO ₂ generado en Proceso de Calcinación de Materias Primas [ton/año]	455.957 (73%)
CO ₂ generado en combustión [ton/año]	166.297 (27%)
Total CO ₂ generado [Ton/año]	622.254 (100%)

Estimación de Recaudación por Concepto de Pago de Impuesto Verde

Considerando los siguientes distintos escenarios tarifarios de Precio al Carbono (Banco Mundial, 2022):

- Tarifa sin variación: 5 USD/Ton CO2
- Tarifa con Variación Moderada: Desde 5 [USD/Ton CO2] en 2020 hasta 35 [USD/ton CO2] en 2050.
- Tarifa con Variación Acelerada: Desde 5 [USD/Ton CO2] en 2020 hasta 100 [USD/ton CO2] en 2050.

El horno de clinker promedio estudiado, debería pagar por concepto de Impuesto Verde los siguientes valores:

Año	Pago por CO2 generado por Materias Primas [USD/Año]		
	Pago con Tarifa sin variación [USD]	Pago con Tarifa con variación moderada [USD]	Pago Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	2.279.784	2.279.784	2.279.784
2025	2.279.784	4.559.569	13.678.706
2030	2.279.784	15.958.490	22.797.844
2035	2.279.784	15.958.490	22.797.844
2040	2.279.784	15.958.490	34.196.765
2045	2.279.784	15.958.490	34.196.765
2050	2.279.784	15.958.490	45.595.687

Año	Pago por CO2 generado por Combustión [USD/Año]		
	Pago con Tarifa sin variación [USD]	Pago con Tarifa con variación moderada [USD]	Pago Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	831.485	831.485	831.485
2025	831.485	1.662.970	4.988.910
2030	831.485	5.820.395	8.314.850
2035	831.485	5.820.395	8.314.850
2040	831.485	5.820.395	12.472.275
2045	831.485	5.820.395	12.472.275
2050	831.485	5.820.395	16.629.700

Año	Pago por CO2 generado por Proceso Global [USD/Año]		
	Pago con Tarifa sin variación [USD]	Pago con Tarifa con variación moderada [USD]	Pago Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	3.111.269	3.111.269	3.111.269
2025	3.111.269	6.222.539	18.667.616
2030	3.111.269	21.778.885	31.112.694
2035	3.111.269	21.778.885	31.112.694
2040	3.111.269	21.778.885	46.669.040
2045	3.111.269	21.778.885	46.669.040
2050	3.111.269	21.778.885	62.225.387

Impacto en EBITDA

En base a valores de EBITDA generados por las principales compañías cementeras de Chile entre 2015 y 2021, es posible establecer una línea de tendencia representada por la siguiente ecuación:

$$y = 1.548.530,39X - 3.087.054.758,59$$

En dónde:

Y: EBITDA Promedio de Industria

X: Años

En base a lo anterior, la proyección de EBITDA promedio para el periodo de evaluación es la siguiente:

Proyección en EBITDA	
Año	USD
2020	40.976.629
2025	48.719.281
2030	56.461.933
2035	64.204.585
2040	71.947.237
2045	79.689.889
2050	87.432.541

Considerando, lo anterior es posible calcular la proporción que representaría el pago de impuesto verde en el EBITDA Promedio de la Industria. Los resultados se presentan a continuación:

Proporción de EBITDA correspondiente al pago de Impuesto Verde por emisiones de calcinación de materias primas			
Año	Con tarifa sin variación [USD]	Con tarifa con variación moderada [USD]	Con tarifa con variación acelerada [USD]
2020	5,56%	5,6%	5,6%
2025	4,68%	9,4%	28,1%
2030	4,04%	28,3%	40,4%
2035	3,55%	24,9%	35,5%
2040	3,17%	22,2%	47,5%
2045	2,86%	20,0%	42,9%
2050	2,61%	18,3%	52,1%

Proporción de EBITDA correspondiente al pago de Impuesto Verde por emisiones combustión			
Año	Con tarifa sin variación [USD]	Con tarifa con variación moderada [USD]	Con tarifa con variación acelerada [USD]
2020	2,03%	2,0%	2,0%
2025	1,71%	3,4%	10,2%
2030	1,47%	10,3%	14,7%
2035	1,30%	9,1%	13,0%
2040	1,16%	8,1%	17,3%
2045	1,04%	7,3%	15,7%
2050	0,95%	6,7%	19,0%

Proporción de EBITDA correspondiente al pago de Impuesto Verde por emisiones del Proceso Global			
Año	Con tarifa sin variación [USD]	Con tarifa con variación moderada [USD]	Con tarifa con variación acelerada [USD]
2020	7,59%	7,6%	7,6%
2025	6,39%	12,8%	38,3%
2030	5,51%	38,6%	55,1%
2035	4,85%	33,9%	48,5%
2040	4,32%	30,3%	64,9%
2045	3,90%	27,3%	58,6%
2050	3,56%	24,9%	71,2%

3.2. Identificación y régimen de Implementación de otros Instrumentos de Precio al Carbono

Entre el 9 de noviembre de 2021 y el día 30 de enero de 2022, se realizaron 8 entrevistas semiestructuradas con preguntas abiertas y cerradas, a profesionales y académicos del ámbito de cambio climático, instrumentos de precio al carbono,

industria del cemento, entre otros aspectos.

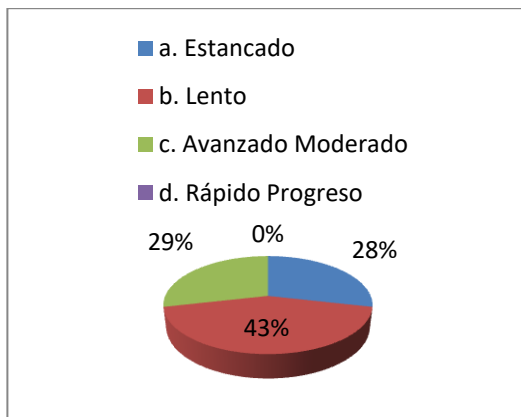
A continuación, se presentan los resultados en base a cada una de las preguntas realizadas durante las entrevistas.

Etapa N°1 Caracterizar el Presente y Comprensión de la Realidad

Pregunta N°1: En base a las siguientes alternativas, ¿Cuál es su percepción del avance de la implementación de instrumentos de precio al carbono en Chile?:

- a. Estancado
- b. Lento
- c. Avanzado Moderado
- d. Rápido Progreso

Resultado:



Pregunta N° 2: ¿Cuáles cree que son los principales drivers para la correcta implementación de los IPC en Chile?

Resultado:

Drivers Políticos

- Compromisos Internacionales

- Certezas a largo plazo
- Claridad en fuentes afectas
- Voluntad del Gobierno
- Reconocimiento de particularidades de sectores industriales
- Pre disposición del entorno para aceptar la carbononeutralidad
- Normativa asociada a más y mejores IPC

Drivers Económicos

- Precio del carbono
- Minimización de costos de transacción
- Capitalización de sectores que tienen capacidad de transición
- Capacitación en el sector público y privado
- Fondos del Gobierno
- Alineación de incentivos o castigos
- Buena disposición del sector privado

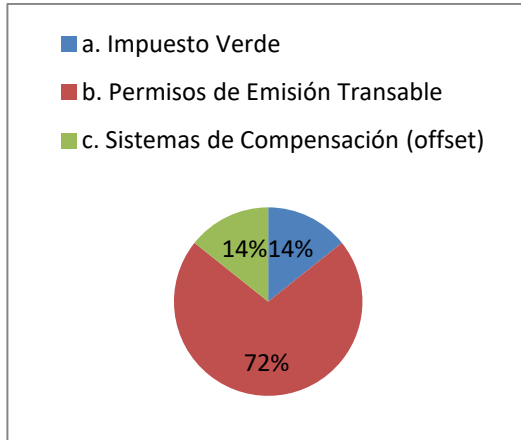
Drivers Técnicos y Tecnológicos

- Identificación de opciones de mitigación y compensación para distintos sectores industriales
- Nuevas tecnologías para la captura de CO2

Pregunta N° 3: Según su percepción y en base a las siguientes alternativas, ¿cuál es el IPC de mayor relevancia para que Chile pueda llegar a ser carbono neutral de aquí al 2050?

- a. Impuesto Verde
- b. Permisos de Emisión Transable
- c. Sistemas de Compensación (offset)

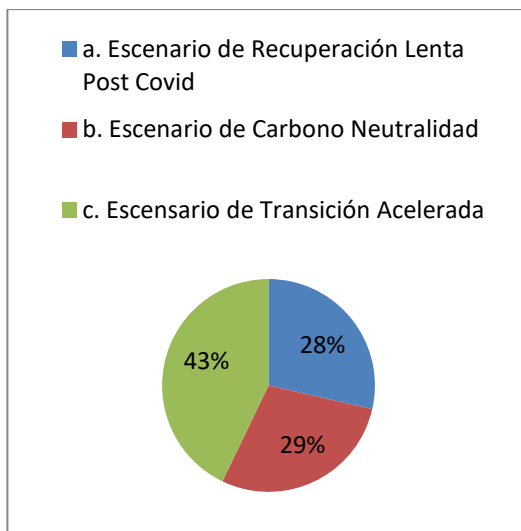
Resultado:



Pregunta N° 4: ¿cuál cree que será el escenario de Chile (basado en los escenarios preliminares construidos en el marco de la Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía) para los próximos años?

- a. Escenario de recuperación lenta Post Covid.
- b. Escenario de Carbono Neutralidad 2050.
- c. Escenario de Transición Acelerada.

Resultado:

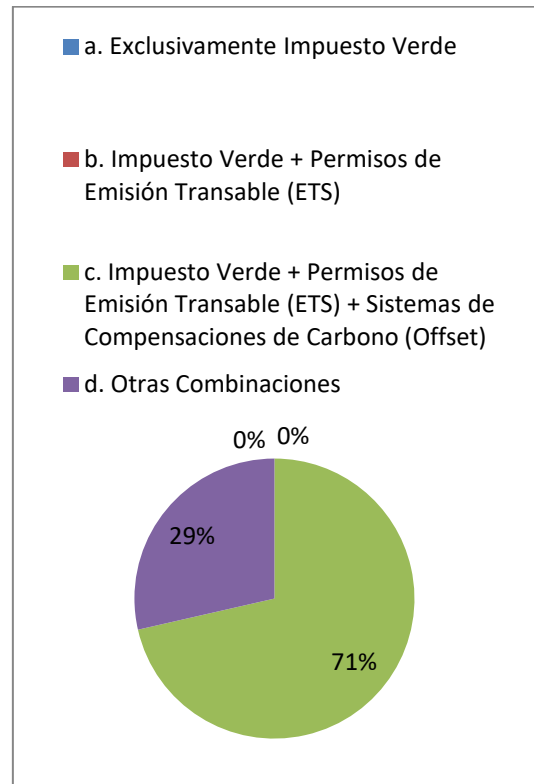


Etapa N°2 Propuestas de Alto Impacto

Pregunta N° 5: En base a su respuesta anterior, ¿cómo cree que operarán los distintos IPC definidos por los instrumentos normativos a la fecha?

- a. Exclusivamente Impuesto verde
- b. Impuesto verde + Permisos de Emisión Transables (ETS)
- c. Impuesto verde + Permisos de Emisión Transable + Sistemas de Compensaciones de Carbono (Offset)
- d. Otras combinaciones

Resultado:



Pregunta N° 6: De acuerdo a lo mencionado, según su percepción ¿cómo será la aplicación de estas disposiciones a la Industria del Cemento?

Resultado:

Existe una respuesta unánime, en relación a la compleja aplicación a la Industria del Cemento considerando el esquema de impuesto que Chile posee actualmente. Complementariamente, los entrevistados se refieren al valor del impuesto verde, que actualmente se mantiene en 5 USD/Ton CO₂, subirá sin poseer correctos fundamentos para justificar el alza de tarifa. Asimismo, el 29% de los entrevistados plantea que en el marco de los sistemas de compensaciones, existen muchas oportunidades de utilizar el coprocesamiento como mecanismo de compensación, principalmente por la contribución en la disminución en la generación de metano en los rellenos sanitarios.

El 57% de los entrevistados, planteo en su respuesta la preocupación asociada a que en el caso hipotético de que resulte económicamente más rentable mantener un negocio cementero solo basado molienda de clinker importado desde Asia que uno con operaciones nacionales de producción de clinker, en donde el pago por la entrada en vigencia del Impuesto Verde represente un pago muy alto respecto de los ingresos de las compañías, el proceso de descarbonización no se llevará a cabo, debido a las altas emisiones de CO₂

por el concepto de transporte de la materia prima vía marítima. En ese sentido, el 86% de los entrevistados plantea que si se requiere descarbonizar, el Gobierno debe entregar apoyo a los distintos sectores, a través de subsidios, como por ejemplo mecanismos de compras públicas que movilicen materiales verdes (cemento verde, cobre verde, etc.).

El 57% de los entrevistados plantea que la implementación debe ser diferenciada, por ser la Industria del Cemento un Sector EITE (Emission Intensive Trade Exposed) (Department of Ecology State of Washington, 2022). Por lo mismo, la implementación debiese ser gradual, inicialmente con una marcha blanca, en donde se le exigirá más al sector energía, para posteriormente exigir poco a poco a los demás sectores, recogiendo la restricciones y limitantes tecnológicas del sector.

Pregunta N° 7: En su opinión, ¿cómo será el régimen de implementación de los IPC mencionados anteriormente?

Resultado:

El 100% de los entrevistados plantea que el proceso de implementación debe ser gradual, independiente de los compromisos internacionales que haya adoptado Chile. En el caso de que el Impuesto Verde entre en vigencia al 2023, eventualmente nuevas normativas asociadas podría entrar en vigencia a partir del 2025, sobre todo las asociadas a compensaciones, las cuales deberían ser el instrumento protagonista en la

transición. Esto resulta clave, ya que los entrevistados plantean que sectores vulnerables, tales como el Acero y el Cemento, son necesarios para el desarrollo del país, sin embargo sin nuevas tecnologías, es difícil que puedan alcanzar la carbono neutralidad. Por lo mismo, si la implementación de IPC no es gradual, estos sectores podrían adoptar las disposiciones, pero con muchos riesgos económicos.

En resumen, la totalidad de entrevistados plantea que el régimen de implementación debería ser gradual, considerando el siguiente flujo en la entrada en vigencia:

Dependiendo de las limitaciones del sector:

- Impuesto Verde + Compensaciones: Inmediato a partir de 2023.
- Permisos de Emisión: A partir de 2025 a 2030, en adelante.

3.3. Estrategia de Descarbonización

Etapas N°3 Alertas sobre las Transformaciones

Pregunta N° 8: Según su percepción, ¿cuáles son los factores que obstaculizarían o facilitarían la correcta implementación de los IPC mencionados anteriormente en el país?

Resultado:

Los entrevistados entregaron sus respuestas, entregando una lista de los factores que a su juicio obstaculizarían o bien facilitarían la

correcta implementación de los IPC en el país.

Factores que Obstaculizarían

- Factores políticos que retrasan discusiones clave, además de la falta de conocimiento de ciertos actores clave.
- Temas no resueltos a nivel normativo para sectores difíciles de regular.
- Falta de capacitación de los profesionales y ejecutivos de los sectores industriales, y del Gobierno y Ministerios involucrados.
- Mala estandarización de los MRV.
- Percepción negativa de algunos instrumentos de reducción (por ejemplo: compensaciones).
- Exclusión de la visión ambiental integrada del problema, y sólo visión económica.
- Falta de priorización del tema por otras urgencias ambientales en el país, por ejemplo, las Zonas de Sacrificio.
- Falta de recursos económicos por parte del Poder Ejecutivo.
- Falta de infraestructura tecnológica.
- Falta de conocimiento de las particularidades específicas de ciertos sectores industriales.
- Temas imponderables: por ejemplo, la Pandemia del Covid 19 y el proceso de recuperación económica asociado en cada uno de los países.

Factores que Facilitarían

- Dialogo permanente entre los sectores industriales y el Gobierno.
- Estrategia Climática a Largo Plazo (con una correcta actualización periódica).
- Integración con mercado internacional de emisiones, formando alianzas para el cumplimiento del Art. N° 6 del Acuerdo de París.
- Implementación de Impuestos de Frontera.
- Incentivos económicos para implementar instrumentos o herramientas de compensación.
- Apoyo internacional para la investigación. Por ejemplo Programa del PMR.
- Esquema de IPC con flexibilidad, por ejemplo, optar entre compensar o bien pagar valores asociados a Impuesto Verde.
- Presión de los inversionistas en temáticas asociados a sostenibilidad.
- Nuevas opciones de tecnologías innovadoras en materia de carbononeutralidad
- Uso de energías renovables y la entrada del H2 como combustible.

Pregunta N°9: ¿Qué tipo de amenazas representan estas nuevas disposiciones para industrias tales como la de los materiales de la construcción, entre ellas la del cemento?

Resultado

La totalidad de los entrevistados plantea que la Industria del Cemento, se reconoce como una industria vulnerable, es decir, que por sus ingresos marginales, cualquier cambio en OPEX puede generar problemas de rentabilidad en el corto plazo. En ese contexto, los entrevistados responden que la mayor amenaza que posee la industria actualmente, es que se prefiera sólo la operación de las moliendas con clinker importado.

Dado lo anterior, los hornos de clinker inevitablemente pierden competitividad, lo que generaría operaciones con clinker extranjero generado fugas de carbono.

Adicionalmente y considerando que el cemento posee un rol relevante en materia de generar infraestructura resiliente para enfrentar los riesgos del cambio climático, el hecho de adoptar nuevas exigencias, sobre todo en materia tributaria, independiente de si la fabricación es con clinker nacional o extranjero, podría traer las siguientes consecuencias:

- Aumento en los precios para que las constructoras opten a adquirir un cemento “verde”.
- Cambios relevantes a toda la cadena de suministro.
- Ajustes en políticas públicas asociadas a vivienda, construcción y edificaciones.
- Nuevas condiciones para proyectos de inversión en el país, en donde la construcción es un

indicador relevante de las condiciones económicas.

Pregunta N°10: En su opinión, ¿cuáles serían los principales cambios que debería implementar la industria del cemento para adaptarse a estas nuevas disposiciones?

Resultado:

Los entrevistados plantean una serie de ideas que se estructuran de la siguiente manera:

Organizacional y Gobernanza:

- Cambios organizacionales, incluyendo formación de áreas para cambio climático.
- Implementar Estrategia de Sostenibilidad, que incluya un Plan de Descarbonización.
- Cambiar forma de operar, no sólo dentro de los procesos productivos, sino que también en comercialización de productos.

Asuntos Corporativos y Públicos

- Ejecutar Hoja de Ruta pública con compromisos de la industria.
- Participación activa en la elaboración de políticas públicas.

Sostenibilidad e Innovación

- Ampliar y mejorar las Líneas de Base de CO2.
- Seguimiento de reducciones de emisiones GEI.
- Ampliar portafolio de proyectos de inversión, incluyendo iniciativas de compensación.

- Investigación sobre opciones de financiamiento para tecnología de captura de CO2 y compensaciones.
- Portafolio de proyectos de innovación y sostenibilidad.

Revisión de Literatura Específica

En junio de 2017, CSI y ECRA publicaron una serie de documentos técnicos, en donde se analizan las tecnologías existentes y futuras con potencial para aumentar la eficiencia energética y disminuir las emisiones de CO2 en la producción de cemento.

A continuación, se presenta el listado de las tecnologías seleccionadas para directa implementación en Chile, considerando las condiciones operacionales actuales de las plantas (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2018):

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
Eje de Reducción: Eficiencia Energética	
Enfriador de clinker de tecnología eficiente.	Reduce entre 22 y 26 Kg CO2/ton clinker
Materias primas alternativas descarbonatadas para la producción de clinker.	Reduce entre 0 y 100 Kg CO2/ton clinker
Eje de Reducción: Combustibles Alternativos	
Cambio de combustible: Carbón/pet-coke por petróleo/gas/biomasa.	Reduce entre 50 y 80 kg CO2/ton clinker
Combustibles alternativos, reemplazando combustibles fósiles convencionales.	Reducción entre 0 y 80 kg CO2/ton clinker
Pretratamiento de	Reduce entre 0 y 14

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
combustibles alternativos (molienda y secado)	kg CO2/ton clinker
Eje de Reducción: Eficiencia Eléctrica	
Optimización en el control y automatización de plantas.	Reduce entre 4 y 17 kg CO2/ton clinker
Eje de Reducción: Reducción de Factor Clinker	
Reducción adicional del contenido de clinker mediante uso de escorias granuladas de alto horno.	Reduce entre 0 y 390 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de ceniza volante.	Reduce entre 0 y 90 kg CO2/ ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de puzolanas naturales.	Reduce entre 0 y 90 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de otros materiales.	Reduce entre 0 y 88 kg CO2/ton cemento

Propuesta de Estrategia de Descarbonización

Diseño de Estrategia

La estrategia al momento de ser diseñada debe contemplar los siguientes elementos clave, considerando la complejidad que conlleva modificar la actual forma de operar de la Industria:

- Enfoque pragmático.
- Involucramiento de Stakeholders.
- Intercambio de experiencias.
- Predisposición a la acción.
- Identificación de presupuestos.

Elaboración e Implementación

La estrategia deberá conformarse por las siguientes etapas:

- Reconocimiento de situación actual y línea de base de las emisiones de CO2 en las operaciones.
 - Definición de ambiciones y horizonte de tiempo: Se requiere de la alineación de distintas áreas de la Industria sobre la ambición, focos, alcance, compromisos, horizonte, tecnologías y recursos para abordar la meta cero emisiones en su conjunto.
 - Implementación y seguimiento de resultados: Una vez se hayan definido las ambiciones y el horizonte de tiempo del cumplimiento de cada objetivo, es necesario diseñar un sistema de seguimiento y control de resultados.

Abordaje de Ejes de Reducción de CO2

Coprocesamiento de Combustibles Alternativos:

La Hoja de Ruta FICEM prevé una sustitución por coprocesamiento de 30% al año 2030. Esto implicaría coprocesar aproximadamente unas 148.000 toneladas anuales de combustible alternativo (de tipo líquido o sólido) y 7.500 toneladas anuales de neumáticos fuera de uso. Suponiendo el cumplimiento del compromiso de sustitución por coprocesamiento de

hasta un 30% del combustible fósil, para el año 2030 se estima una reducción de emisiones de 59 kg CO₂ por tonelada de clínker teniendo como base el año 2021.

De acuerdo con los papers de la ECRA, alcanzar un 40% de coprocesamiento implica reducir aproximadamente 50 kg de CO₂ por tonelada de cemento, lo que podría representar una reducción de un 8% del total de emisiones de CO₂ de la industria cementera en Chile. Es necesario destacar que el coprocesamiento no sólo aporta a la reducción de CO₂, sino que también es una alternativa segura de gestión de residuos mediante su valorización energética, aspecto relevante de gestión consagrado en los nuevos marcos regulatorios a nivel nacional.

Para aumentar el % de coprocesamiento, se recomiendan las siguientes medidas específicas:

- Apoyo en capacitación de autoridad sanitaria y ambiental en Coprocesamiento
- Mesa de Trabajo Autoridad - Industria
- Ratificación de la opción de Coprocesamiento para valorización de fracción no reciclable de envases y embalajes Ley REP
- Involucramiento Proactivo con Sistemas de Gestión en Ley REP
- Socialización del Coprocesamiento en Comunidades a Plantas Cementeras

- Capacitación de la Industria en materias relacionadas a Coprocesamiento

Eficiencia Energética Térmica:

Las investigaciones de la ECRA realizadas a la fecha, identifican varias medidas que permitirían aumentar la eficiencia energética térmica, tales como:

- Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas.
- Instalar enfriadores de clínker de tecnología eficiente.
- Añadir etapas (ciclones) en torres precalentadoras.
- Aumentar la capacidad de los hornos.

Las medidas de tipo aumento de capacidad o aumento del número de etapas en torres precalentadoras necesitan un nivel de inversión que no se justifica solamente con la correspondiente reducción de emisiones, por lo tanto se concluye que la implementación necesitaría una importante justificación. Por lo anterior, la barrera principal es económica si el nivel de inversión necesario no se paga a través del ahorro en costo de producción, y esta barrera no se puede superar con las condiciones de mercado actual.

Reducción del Factor Clinker: A pesar de que Chile ya tiene uno de los contenidos de clínker en el cemento el más bajos del mundo (64,8% al cierre de 2021) (Comisión de Mercado Financiero, 2022), aun existe un potencial de reducción. La mayoría de

los cementos adicionados producidos en Chile lo son a base de puzolana natural, disponible en cantidad casi ilimitada. Se supone que para llegar a un factor clínker tan bajo, la industria cementera chilena ya optimizó el uso de materiales de sustitución de clínker, respetando las exigencias de resistencias de los diferentes cementos. Reducir el contenido de clínker en el cemento más allá de este nivel necesita:

- Producir cemento con un factor clínker inferior al 64% sin ir debajo del factor clínker mínimo de 50% permitido según la norma chilena NCh 148 Cemento – Terminología, clasificación y requisitos.
- Que el nuevo cemento de bajo factor clínker no altere las resistencias de los cementos actuales.

Para reducir el factor clinker, se necesita cambiar la forma de producir cementos, y actualmente solo se identifican dos oportunidades:

- Utilizar materiales de origen minero.
- Utilizar arcillas calcinadas.

La ECRA, en su paper N°36, menciona un potencial de reducción de hasta 180 kg CO₂ por tonelada de cemento, produciendo cemento con arcilla calcinada y caliza, lo cual sitúa a esta solución como uno de los ejes más efectivos para la reducción de CO₂ en la industria cementera. ECRA menciona un nivel de inversión entre 8 y 12 millones de EUR (USD 9,7 y

13,2 millones) para producir hasta un millón de toneladas de este cemento.

Considerando la información revisada, la implementación de este eje de reducción requiere de algunas medidas específicas, las cuales se detallan a continuación:

- Demostrar factibilidad técnica y económica del cemento con caliza y arcilla calcinada a través de Pilotos.
- Programas de Concientización y Capacitación.
- Iniciativas por el sector Público de uso de este tipo de cementos.

Eficiencia Energética Eléctrica:

Según la Hoja de Ruta FICEM-ICH el factor de emisión de la red eléctrica externa promedio utilizado en Chile es de 0,398 kg de CO₂ por kWh. Asumiendo un consumo energético eléctrico medio en Chile de 102 kWh /t cemento, las emisiones máximas de CO₂ relacionada a la energía eléctrica serían 0,398 kg CO₂ x 102 kWh, lo que equivale a 40,59 kg CO₂ por tonelada de cemento, lo que representa menos de 7% de las emisiones total de CO₂ por tonelada de cemento. WBCSD-CSI estima que las reducciones de emisiones de CO₂ en el eje Consumo Eléctrico pueden ser del orden del 3% de las rebajas de emisiones totales de la industria. En consecuencia, la incidencia de este eje es marginal en comparación con el coprocesamiento y el factor clínker. De todas maneras, en el espíritu de utilizar todas las vías posibles para descarbonizar, existen dos opciones

factibles y reconocidas por ECRA para reducir las emisiones asociadas a este eje, independiente de la magnitud de reducción:

- Utilizar fuentes de producción de energía eléctrica con bajo nivel de emisiones de CO₂: energía renovable.
- Reducir el consumo eléctrico específico.

Por lo anterior, se recomienda que la industria adopte estas prácticas, independiente de la proporción de reducción que represente.

4. Conclusiones

En vista de los resultados de la investigación, es posible concluir que la Industria Cementera a nivel nacional necesita adaptar su funcionamiento actual, para cumplir con las disposiciones internacionales en materia de cambio climático. En virtud de la entrada en vigencia de nuevas disposiciones reglamentarias, este proceso deberá comenzar a trabajarse a partir de ahora, de cara a afrontar un nuevo escenario operacional desde 2025 en adelante, a través de la implementación de una Estrategia de Descarbonización que no sólo incluya procedimientos asociados al manejo tributario que tendrán que tener las empresas afectas, sino que incorpore una serie de elementos que hasta ahora no se encuentran explorados a cabalidad.

Los expertos entrevistados en este estudio, plantearon una preocupación unánime asociada a que en el caso

hipotético de que resulte económicamente más rentable mantener un negocio cementero sólo en base a molienda de clinker importado desde Asia, a uno con operaciones nacionales de producción de clinker, en donde el pago por la entrada en vigencia del Impuesto Verde represente un costo muy alto respecto de los ingresos de las compañías, lo cual efectivamente es una amenaza para la Industria tal como se aprecia en los resultados de la primera parte de este estudio. Si ese fuese el caso, los expertos indican que el proceso de descarbonización no se llevará a cabo, debido a las altas emisiones de CO₂ por el concepto de transporte de la materia prima vía marítima. En ese sentido, los mismos entrevistados afirman que los instrumentos económicos tienen que cargar o hacerse cargo de los avances tecnológicos, por lo que las políticas públicas en materia de precio al carbono deberían agilizar las opciones de instrumentos complemento al impuesto que entrará en vigencia a partir de 2023. El impuesto al CO₂ no puede tener lógica de recaudación, ya que distorsiona el objetivo del instrumento, lo cual puede generar el efecto de fuga de carbono.

Considerando lo anterior, las compensaciones permiten ganar tiempo para la adaptación de las operaciones, mientras se implementan las mejoras tecnológicas. Por lo tanto, estos instrumentos son clave para lograr la transición a partir del 2025 en

adelante. El sistema de normas en el país, debería evolucionar a un cap and trade, y posteriormente los sistemas de compensaciones deberían existir y complementar los IPC que ya están. Se prevé que las distintas industrias, entre ellas la del cemento, deberían participar gradualmente en un sistema de emisiones transables para entender el funcionamiento del sistema. En ese sentido, los expertos entrevistados concuerdan con que el nivel de exigencia sobre estas disposiciones irá aumentando a lo largo de los años.

La situación proyectada sobre la entrada en vigencia de los distintos instrumentos de precio al carbono, implica que la Industria Cementera debe trabajar en una estrategia de descarbonización con el objetivo de mantener una industria rentable. Las políticas públicas deberían ampliar el rango de alcance, generando integración con los mercados internacionales, formando alianzas con el objetivo de presionar al alza el valor del precio del carbono y también motivar la construcción de un mix de IPC más flexible.

En relación a la estrategia de descarbonización que debe trabajar la industria, esta debe ser transversal y aplicable a cada una de las compañías que hoy operan en el territorio nacional. Debe ser un proyecto que trabaje de manera conjunta con las autoridades involucradas, para lograr consensos sobre nuevas formas de operar. La implementación de dicha estrategia

generará una serie de nuevos proyectos asociados a innovación tecnológica y a mejoras operacionales en las plantas actuales. Por lo anterior, es necesario iniciar una Agenda de Cooperación por parte de la Industria con las Autoridades y Servicios Públicos involucrados, con el objetivo de asegurar que la implementación de políticas tributarias asociadas a carbono neutralidad no afectarán a políticas de vivienda, construcción y edificaciones.

En relación a los ejes de reducción de CO₂ que actualmente se encuentran con mayor factibilidad de implementación, se destacan el coprocesamiento, la reducción del factor clinker y en menor proporción la eficiencia térmica y eléctrica. Actualmente para mejorar la implementación de estas mejoras tecnológicas, se requiere derribar ciertas barreras asociadas al funcionamiento de la institucionalidad ambiental en el país. Por lo mismo, la necesidad de una agenda de cooperación entre el estado y la Industria del Cemento es un aspecto clave, el cual puede traer beneficios incluso a otros actores, como por ejemplo los generadores de residuos, los cuales buscan alternativas de valorización, en donde los hornos de clinker pueden ser una opción.

En el año 2014 la producción mundial de cemento emitió aproximadamente 3 GTon de CO₂, lo que corresponde al 7% del total mundial. A nivel mundial, se proyecta que la demanda de

cemento seguirá aumentando y sería un 20% más alta que la actual para 2050 en ausencia de esfuerzos para optimizar su uso en edificios y construcción, por lo tanto implementar una Estrategia de Descarbonización es un asunto urgente que posee la más alta relevancia para la sostenibilidad de esta industria, no sólo a nivel nacional sino que también a nivel mundial.

Referencias

Banco Mundial. (2022). Recomendaciones y pasos necesarios para desplegar un esquema de Instrumentos Económicos que catalice la transición energética necesaria para cumplir con la NDC de Chile y el Objetivo de Cero Emisiones de GEI.

Cámara Chilena de la Construcción. (2022). Centro de Información. Obtenido de Índice Despacho de Cemento: <https://cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento>

Cement Sustainability Initiative CSI. (5 de Abril de 2018). Technology Roadmap Low Carbon Transition in the Cement Industry. Recuperado el 18 de Abril de 2022, de Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Technology-Roadmap-Low-Carbon-Transition-in-the-Cement-Industry>

Cementis. (2020). Hoja de Ruta para el Desarrollo de Bajas Emisiones en la Industria del Cemento.

Centro de Derecho Ambiental Universidad de Chile. (2022). Observatorio Ley Cambio Climático. Obtenido de Observatorio Ley Cambio Climático: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fleycambioclimatico.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FProyectoLeyCC_13012020.pdf&clen=347152&chunk=true

Comisión de Mercado Financiero. (2022). Información de fiscalizados y otras instituciones registradas. Obtenido de Memorias Financieras Melón, Polpaico y CBB.

Contribución Nacional Determinada a Nivel Nacional NDC. (2020). NDC Chile. Obtenido de NDC Chile: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fmma.gob.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F04%2FNDC_Chile_2020_espan%25CC%2583ol-1.pdf&clen=18436845&chunk=true

Department of Ecology State of Washington. (2022). Emissions Intensive Trade Exposed industries (EITEs). Obtenido de Emissions Intensive Trade Exposed industries (EITEs): <https://ecology.wa.gov/Air-Climate/Climate-change/Reducing-greenhouse-gases/Climate->

Commitment-Act/Emissions-Intensive-Trade-Exposed-industries

European Cement Research Academy. (2022). CSI/ECRA Technology Papers. Obtenido de CSI/ECRA Technology Papers: <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>

Federación Interamericana del Cemento FICEM. (2019). Hoja de Ruta Chile Industria del Cemento. Santiago.

Federación Interamericana del Cemento FICEM. (2018). Resultados Taller Análisis de Tecnologías de Reducción de CO2 Chile.

Federación Interamericana del Cemento FICEM. (2018). Resumen Papers ECRA CSI. Bogotá.

García Bernal, N. (2018). Implementación del Impuesto Verde en Chile. Asesoría Técnica Parlamentaria.

GIZ. (2021). Instrumentos de Precio al Carbono. Obtenido de Opciones para un Mix de Instrumentos de Precio al Carbono en Chile: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2F4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F04%2F13214535%2F5.-IPC-Potencialidades-ES.pdf&clen=2307162&chunk=true>

IPCC. (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de

Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nau.

IPCC. (2018). Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir . Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.ipcc.ch%2Fsite%2Fassets%2Fuploads%2Fsites%2F2%2F2019%2F09%2FIPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf&clen=2865092&chunk=true

Ministerio del Medio Ambiente Chile. (2020). Proyecto de Ley Marco Cambio Climático. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fleycambioclimatico.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FProyectoLeyCC_13012020.pdf&clen=347152&chunk=true

Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Funfccc.int%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fspanish_paris_agreement.pdf&clen=5359383

Pizarro, R. (2021). "Sistemas de instrumentos de fijación de precios del carbono en América Latina y jurisdicciones de las Américas relevantes", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/41), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglcl efindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frepositorio.cepal.org%2Fbitstream%2Fhandle%2F11362%2F46765%2F4%2FS2100035_es.pdf&clen=2744578&chunk=true](https://efaidnbmnnnibpcajpcglcl efindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frepositorio.cepal.org%2Fbitstream%2Fhandle%2F11362%2F46765%2F4%2FS2100035_es.pdf&clen=2744578&chunk=true)

Science Based Targets initiative SBTi. (Marzo de 2022). Cement Science Based Target Setting Guidance. Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglcl efindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fsciencebasedtargets.org%2Fresources%2Ffiles%2FCement-guidance-public-](https://efaidnbmnnnibpcajpcglcl efindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fsciencebasedtargets.org%2Fresources%2Ffiles%2FCement-guidance-public-)

[consultation.pdf&clen=955478&chunk=true](https://www.sii.cl/valores_y_fechas/dolar/dolar2022.htm)

Servicio de Impuestos Internos de Chile. (s.f.). Dólar Observado. Recuperado el 14 de Abril de 2022, de Valores:

https://www.sii.cl/valores_y_fechas/dolar/dolar2022.htm

SNI Chile. (2018). Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero. Obtenido de Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático:

[chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglcl efindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fmma.gob.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2F2018_NIR_CL.pdf&clen=24214413&chunk=true](https://efaidnbmnnnibpcajpcglcl efindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fmma.gob.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2F2018_NIR_CL.pdf&clen=24214413&chunk=true)

del libro (cursiva). Lugar de Publicación: Editorial. Recuperado de <http://URL>

4. CONCLUSIONES GENERALES

En vista de los resultados de la investigación, es posible concluir que la Industria Cementera a nivel nacional necesita adaptar su funcionamiento actual, para cumplir con las disposiciones internacionales en materia de cambio climático. En virtud de la entrada en vigencia de nuevas disposiciones reglamentarias, este proceso deberá comenzar a trabajarse a partir de ahora, de cara a afrontar un nuevo escenario operacional desde 2025 en adelante, a través de la implementación de una Estrategia de Descarbonización que no sólo incluya procedimientos asociados al manejo tributario que tendrán que tener las empresas afectas, sino que incorpore una serie de elementos que hasta ahora no se encuentran explorados a cabalidad.

Los expertos entrevistados en este estudio, plantearon una preocupación unánime asociada a que en el caso hipotético de que resulte económicamente más rentable mantener un negocio cementero sólo en base a molienda de clinker importado desde Asia, a uno con operaciones nacionales de producción de clinker, en donde el pago por la entrada en vigencia del Impuesto Verde represente un costo muy alto respecto de los ingresos de las compañías, lo cual efectivamente es una amenaza para la Industria tal como se aprecia en los resultados de la primera parte de este estudio. Si ese fuese el caso, los expertos indican que el proceso de descarbonización no se llevará a cabo, debido a las altas emisiones de CO₂ por el concepto de transporte de la materia prima vía marítima. En ese sentido, los mismos entrevistados afirman que los instrumentos económicos tienen que cargar o hacerse cargo de los avances tecnológicos, por lo que las políticas públicas en materia de precio al carbono deberían agilizar las opciones de instrumentos complemento al impuesto que entrará en vigencia a partir de 2023. El impuesto al CO₂ no puede tener lógica de recaudación, ya que distorsiona el objetivo del instrumento, lo cual puede generar el efecto de fuga de carbono.

Considerando lo anterior, las compensaciones permiten ganar tiempo para la adaptación de las operaciones, mientras se implementan las mejoras tecnológicas. Por lo tanto, estos instrumentos son clave para lograr la transición a partir del 2025 en adelante. El sistema de normas en el país, debería evolucionar a un cap and trade, y posteriormente los sistemas de compensaciones deberían existir y complementar los IPC que ya están. Se prevé que las distintas industrias, entre ellas la del cemento, deberían participar gradualmente en un sistema de emisiones transables para entender el funcionamiento del sistema. En ese sentido, los expertos entrevistados concuerdan con que el nivel de exigencia sobre estas disposiciones irá aumentando a lo largo de los años.

La situación proyectada sobre la entrada en vigencia de los distintos instrumentos de precio al carbono, implica que la Industria Cementera debe trabajar en una estrategia de descarbonización con el objetivo de mantener una industria rentable. Las políticas públicas deberían ampliar el rango de alcance, generando integración con los mercados internacionales, formando alianzas con el objetivo de presionar al alza el valor del precio del carbono y también motivar la construcción de un mix de IPC más flexible.

En relación a la estrategia de descarbonización que debe trabajar la industria, esta debe ser transversal y aplicable a cada una de las compañías que hoy operan en el territorio nacional. Debe ser un proyecto que trabaje de manera conjunta con las autoridades involucradas, para lograr consensos sobre nuevas formas de operar. La implementación de dicha estrategia generará una serie de nuevos proyectos asociados a innovación tecnológica y a mejoras operacionales en las plantas actuales. Por lo anterior, es necesario iniciar una Agenda de Cooperación por parte de la Industria con las Autoridades y Servicios Públicos involucrados, con el objetivo de asegurar que la implementación de políticas tributarias asociadas a carbono neutralidad no afectarán a políticas de vivienda, construcción y edificaciones.

En relación a los ejes de reducción de CO₂ que actualmente se encuentran con mayor factibilidad de implementación, se destacan el coprocesamiento, la reducción del factor clinker y en menor proporción la eficiencia térmica y eléctrica. Actualmente para mejorar la implementación de estas mejoras tecnológicas, se requiere derribar ciertas barreras asociadas al funcionamiento de la institucionalidad ambiental en el país. Por lo mismo, la necesidad de una agenda de cooperación entre el estado y la Industria del Cemento es un aspecto clave, el cual puede traer beneficios incluso a otros actores, como por ejemplo los generadores de residuos, los cuales buscan alternativas de valorización, en donde los hornos de clinker pueden ser una opción.

En el año 2014 la producción mundial de cemento emitió aproximadamente 3 GTon de CO₂, lo que corresponde al 7% del total mundial. A nivel mundial, se proyecta que la demanda de cemento seguirá aumentando y sería un 20% más alta que la actual para 2050 en ausencia de esfuerzos para optimizar su uso en edificios y construcción, por lo tanto implementar una Estrategia de Descarbonización es un asunto urgente que posee la más alta relevancia para la sostenibilidad de esta industria, no sólo a nivel nacional sino que también a nivel mundial.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banco Mundial. (2022). Recomendaciones y pasos necesarios para desplegar un esquema de Instrumentos Económicos que catalice la transición energética necesaria para cumplir con la NDC de Chile y el Objetivo de Cero Emisiones de GEI.

Cámara Chilena de la Construcción. (2022). Centro de Información. Obtenido de Índice Despacho de Cemento: <https://cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento>

Cement Sustainability Initiative CSI. (5 de Abril de 2018). Technology Roadmap Low Carbon Transition in the Cement Industry. Recuperado el 18 de Abril de 2022, de Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Technology-Roadmap-Low-Carbon-Transition-in-the-Cement-Industry>

Cementis. (2020). Hoja de Ruta para el Desarrollo de Bajas Emisiones en la Industria del Cemento.

Centro de Derecho Ambiental Universidad de Chile. (2022). Observatorio Ley Cambio Climático. Obtenido de Observatorio Ley Cambio Climático: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fleycambioclimatico.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FProyectoLeyCC_13012020.pdf&clen=347152&chunk=true

Comisión de Mercado Financiero. (2022). Información de fiscalizados y otras instituciones registradas. Obtenido de Memorias Financieras Melón, Polpaico y CBB.

Contribución Nacional Determinada a Nivel Nacional NDC. (2020). NDC Chile. Obtenido de NDC Chile: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fleycambioclimatico.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FProyectoLeyCC_13012020.pdf&clen=347152&chunk=true

F%2Fmma.gob.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F04%2FNDC_Chile_2020_espan%25CC%2583ol-1.pdf&clen=18436845&chunk=true

Department of Ecology State of Washington. (2022). Emissions Intensive Trade Exposed industries (EITEs). Obtenido de Emissions Intensive Trade Exposed industries (EITEs): <https://ecology.wa.gov/Air-Climate/Climate-change/Reducing-greenhouse-gases/Climate-Commitment-Act/Emissions-Intensive-Trade-Exposed-industries>

European Cement Research Academy. (2022). CSI/ECRA Technology Papers. Obtenido de CSI/ECRA Technology Papers: <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>

Federación Interamericana del Cemento FICEM. (2019). Hoja de Ruta Chile Industria del Cemento. Santiago.

Federación Interamericana del Cemento FICEM. (2018). Resultados Taller Analisis de Tecnologías de Reducción de CO2 Chile.

Federación Interamericana del Cemento FICEM. (2018). Resumen Papers ECRA CSI. Bogotá.

García Bernal, N. (2018). Implementación del Impuesto Verde en Chile. Asesoría Técnica Parlamentaria.

GIZ. (2021). Instrumentos de Precio al Carbono. Obtenido de Opciones para un Mix de Instrumentos de Precio al Carbono en Chile: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2F4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F04%2F13214535%2F5.-IPC-Potencialidades-ES.pdf&clen=2307162&chunk=true>

IPCC . (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nau.

IPCC . (2018). Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir . Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.ipcc.ch%2Fsite%2Fassets%2Fuploads%2Fsites%2F2%2F2019%2F09%2FIPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf&clen=2865092&chunk=true

Ministerio del Medio Ambiente Chile. (2020). Proyecto de Ley Marco Cambio Climático. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fleycambioclimatico.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FProyectoLeyCC_13012020.pdf&clen=347152&chunk=true

Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Funfccc.int%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fspanish_paris_agreement.pdf&clen=5359383

Pizarro, R. (2021). “Sistemas de instrumentos de fijación de precios del carbono en América Latina y jurisdicciones de las Américas relevantes”, Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/4 1), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frepositorio.cepal.org%2Fbitstream%2Fhandle%2F11362%2F46765%2F4%2FS2100035_es.pdf&clen=2744578&chunk=true

Science Based Targets initiative SBTi. (Marzo de 2022). Cement Science Based Target Setting Guidance. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fsciencebasedtargets.org%2Fresources%2Ffiles%2FCement-guidance-public-consultation.pdf&clen=955478&chunk=true

Servicio de Impuestos Internos de Chile. (s.f.). Dólar Observado. Recuperado el 14 de Abril de 2022, de Valores: https://www.sii.cl/valores_y_fechas/dolar/dolar2022.htm

SNI Chile. (2018). Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero. Obtenido de Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático : [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fmma.gob.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2F2018_NIR_CL.pdf&cflen=24214413&chunk=true](https://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fmma.gob.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2F2018_NIR_CL.pdf&cflen=24214413&chunk=true)

6. ANEXOS

Anexo 1 Pauta de Entrevista Semiestructurada

Encuadre:

La presente investigación busca identificar las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental.

Etapa 1: Caracterizar el presente y comprensión de la realidad

1. En base a las siguientes alternativas, ¿Cuál es su percepción del avance de la implementación de instrumentos de precio al carbono en Chile?
 - a) Estancado
 - b) Lento
 - c) Avanzado Moderado
 - d) Rápido Progreso

2. ¿Cuáles cree que son los principales drivers para la correcta implementación de los IPC en Chile?

3. Según su percepción y en base a las siguientes alternativas, ¿cuál es el IPC de mayor relevancia para que Chile pueda llegar a ser carbono neutral de aquí al 2050?
 - a) Impuesto Verde
 - b) Permisos de Emisión Transable
 - c) Sistemas de Compensación (offset)

4. De acuerdo a lo siguiente, ¿cuál cree que será el escenario de Chile (basado en los escenarios preliminares construidos en el marco de la Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía) para los próximos años?

Escenario de Recuperación Lenta Post Covid: La irrupción de la Pandemia del COVID 19 ha generado un impacto económico y social invaluable tanto a nivel mundial como local. Esto sin duda alguna cambia la predisposición de los gobiernos para avanzar hacia la Carbono neutralidad. En el caso particular de Chile, ante una menor disponibilidad de recursos, el foco de los próximos años será la recuperación económica, lo cuál apunta a priorizar acciones que apunten a mejorar la calidad de los servicios. En particular, los esfuerzos de la Autoridad Ambiental durante 2020 y 2021, han sido los compromisos internacionales dispuestos en la NDC a 2030, implementando proyectos tales como la Electromovilidad, y la Ley de Eficiencia Energética.

Escenario de Carbono Neutralidad 2050: En el caso de una mejor y más rápida recuperación económica, es posible visualizar un contexto de apoyo para la carbono neutralidad, lo cual traerá consigo una caída de los costos de las tecnologías limpias, que le permitan al país avanzar tanto en materia de reducción de emisiones locales. Asimismo, la adopción de nuevas tecnologías permitirá alcanzar mayores niveles de penetración de la electromovilidad y de medidas de eficiencia en sectores productivos, tales como la incorporación de la industria del hidrógeno verde, entre otras acciones.

Escenario de Transición Acelerada: En el caso que exista una rápida recuperación económica y social, así como un amplio espectro en el desarrollo de tecnologías limpias, permitirán una acelerada transición hacia la carbono neutralidad. Esto puede significar un tránsito progresivo a alternativas de energías renovables en el sistema eléctrico, soluciones de almacenamiento y captura de CO₂, la integración

de la electromovilidad, junto con un amplio y rápida implementación de proyectos de producción de hidrógeno verde y de combustibles sintéticos, tanto para uso local como para la exportación. Esto claramente, implica un escenario de carbono neutralidad antes del 2050.

Etapa 2: Propuestas de alto impacto

5. En base a su respuesta anterior, ¿cómo cree que operarán los distintos IPC definidos por los instrumentos normativos a la fecha?
 - a) Exclusivamente Impuesto verde
 - b) Impuesto verde + Permisos de Emisión Transables (ETS)
 - c) Impuesto verde + Permisos de Emisión Transable + Sistemas de Compensaciones de Carbono (Offset)
 - d) Otras combinaciones
6. De acuerdo a lo mencionado, según su percepción ¿cómo será la aplicación de estas disposiciones a la Industria del Cemento?
7. En su opinión, ¿cómo será el régimen de implementación de los IPC mencionados anteriormente?

Etapa 3: Alertas sobre las transformaciones

8. Según su percepción, ¿cuáles son los factores que obstaculizarían o facilitarían la correcta implementación de los IPC mencionados anteriormente en el país?
9. ¿Qué tipo de amenazas representan estas nuevas disposiciones para industrias tales como la de los materiales de la construcción, entre ellas la del cemento?

10. En su opinión, ¿cuáles serían los principales cambios que debería implementar la industria del cemento para adaptarse a estas nuevas disposiciones?

Anexo 2 Datos asociados a Producción de Clinker y Cemento de Hornos de Clinker Operativos en Chile

Tabla 14: Consumo de clinker años 2018, 2019 y 2020 Cementeras con Horno de Clinker Operativo. Fuente: Elaboración Propia.

Consumo de Clinker	Unidad	Cementera 1		
		2018	2019	2020
Clinker producido	ton/año	463.270	454.005	495.699
Clinker comprado a fuentes externas	ton/año	15.430	15.121	16.510
Total clinker consumido	ton/año	478.700	469.126	512.209

Consumo de Clinker	Unidad	Cementera 2		
		2018	2019	2020
Clinker producido	ton/año	486.434	476.705	520.484
Clinker comprado a fuentes externas	ton/año	16.202	15.877	17.336
Total clinker consumido	ton/año	502.635	492.582	537.819

Consumo de Clinker	Unidad	Cementera 3		
		2018	2019	2020
Clinker producido	ton/año	440.107	431.304	470.914
Clinker comprado a fuentes externas	ton/año	14.659	14.365	15.685
Total clinker consumido	ton/año	454.765	445.670	486.599

Tabla 15: Consumo de Adiciones Minerales años 2018, 2019 y 2020 Cementeras con Horno de Clinker Operativo. Fuente: Elaboración Propia.

Adiciones Minerales	Unidad	Cementera 1		
		2018	2019	2020
Yeso	ton/año	43.541	40.559	46.269
Caliza	ton/año	-	-	-
Escoria	ton/año	-	-	-
Genizas Volantes	ton/año	2.362	1.003	-
Puzolana	ton/año	163.883	133.210	170.366
Otras	ton/año	-	-	-
Total Adiciones Minerales	ton/año	209.786	174.772	216.635

Adiciones Minerales	Unidad	Cementera 2		
		2018	2019	2020
Yeso	ton/año	45.718	42.587	48.582
Caliza	ton/año	-	-	-
Escoria	ton/año	-	-	-
Genizas Volantes	ton/año	2.480	1.053	-
Puzolana	ton/año	172.077	139.871	178.884
Otras	ton/año	-	-	-
Total Adiciones Minerales	ton/año	220.275	183.511	227.467

Adiciones Minerales	Unidad	Cementera 3		
		2018	2019	2020
Yeso	ton/año	41.364	38.531	43.956
Caliza	ton/año	-	-	-
Escoria	ton/año	-	-	-
Genizas Volantes	ton/año	2.244	953	-
Puzolana	ton/año	155.689	126.550	161.848
Otras	ton/año	-	-	-
Total Adiciones Minerales	ton/año	199.297	166.033	205.803

Tabla 16: Producción de cemento años 2018, 2019 y 2020 Cementeras con Horno de Clinker Operativo. Fuente: Elaboración Propia.

Producción de Cemento	Unidad	Cementera 1		
		2018	2019	2020
Cemento Portland	ton/año	647.957	623.325	787.637

Producción de Cemento	Unidad	Cementera 2		
		2018	2019	2020
Cemento Portland	ton/año	696.554	670.074	846.710

Producción de Cemento	Unidad	Cementera 3		
		2018	2019	2020
Cemento Portland	ton/año	626.574	602.755	761.645

Tabla 17: Consumo energético años 2018, 2019 y 2020 Cementeras con Horno de Clinker Operativo. Fuente: Elaboración Propia.

Consumo de energético Horno de Clinker	Unidad	Cementera 1		
		2018	2019	2020
Consumo total de calor del horno	TJ/Año	1.730	1.787	2.164
Consumo total de calor del horno excluyendo proceso de secado	TJ/Año	1.611	1.667	2.017
Combustibles tradicionales	TJ/Año	1.494	1.601	1.902
Combustibles alternativos	TJ/Año	228	186	261

Consumo de energético Horno de Clinker	Unidad	Cementera 2		
		2018	2019	2020
Consumo total de calor del horno	TJ/Año	1.846	1.907	2.309
Consumo total de calor del horno excluyendo proceso de secado	TJ/Año	1.719	1.779	2.152
Combustibles tradicionales	TJ/Año	1.594	1.708	2.029
Combustibles alternativos	TJ/Año	540	456	534

Consumo de energético Horno de Clinker	Unidad	Cementera 3		
		2018	2019	2020
Consumo total de calor del horno	TJ/Año	1.481	1.530	1.852
Consumo total de calor del horno excluyendo proceso de secado	TJ/Año	1.379	1.427	1.727
Combustibles tradicionales	TJ/Año	1.279	1.370	1.628
Combustibles alternativos	TJ/Año	195	159	223

Anexo 3 Estimación de Pago de Impuesto Verde

Tabla 18: Generación de CO2 en Horno de Clinker Promedio.

Generación de CO2	Unidad	Valores	%
Promedio de CO2 generado por materias primas	Ton CO2/año	455.957	73%
Promedio CO2 proveniente de Proceso de Combustión	Ton CO2/año	166.297	27%
Total	Ton CO2/año	622.254	100%

Tabla 19: Escenarios tarifarios Precio del Carbono para pago de Impuesto Verde. Fuente: (Banco Mundial, 2022)

Año	Tarifa sin variación [USD/Ton CO2]	Tarifa con variación moderada [USD/Ton CO2]	Tarifa con variación acelerada [USD/Ton CO2]
2020	5	5	5
2025	5	10	30
2030	5	35	50
2035	5	35	50
2040	5	35	75
2045	5	35	75
2050	5	35	100

Tabla 20: Proyección de Pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Calcinación de Materias Primas. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Pago por CO2 generado por Materias Primas [USD/Año]		
	Pago considerando Tarifa sin variación [USD]	Pago considerando Tarifa con variación moderada [USD]	Pago considerando Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	2.279.784	2.279.784	2.279.784
2025	2.279.784	4.559.569	13.678.706
2030	2.279.784	15.958.490	22.797.844
2035	2.279.784	15.958.490	22.797.844
2040	2.279.784	15.958.490	34.196.765
2045	2.279.784	15.958.490	34.196.765
2050	2.279.784	15.958.490	45.595.687

Tabla 21: Proyección de Pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Combustión. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Pago por CO2 generado por Proceso de Combustión [USD/Año]		
	Pago considerando Tarifa sin variación [USD]	Pago considerando Tarifa con variación moderada [USD]	Pago considerando Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	831.485	831.485	831.485
2025	831.485	1.662.970	4.988.910
2030	831.485	5.820.395	8.314.850
2035	831.485	5.820.395	8.314.850
2040	831.485	5.820.395	12.472.275
2045	831.485	5.820.395	12.472.275
2050	831.485	5.820.395	16.629.700

Tabla 22: Proyección de Pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Proceso Global.
Fuente: Elaboración Propia.

Año	Pago por CO2 por Proceso Completo [USD/Año]		
	Pago considerando Tarifa sin variación [USD]	Pago considerando Tarifa con variación moderada [USD]	Pago considerando Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	3.111.269	3.111.269	3.111.269
2025	3.111.269	6.222.539	18.667.616
2030	3.111.269	21.778.885	31.112.694
2035	3.111.269	21.778.885	31.112.694
2040	3.111.269	21.778.885	46.669.040
2045	3.111.269	21.778.885	46.669.040
2050	3.111.269	21.778.885	62.225.387

Anexo 4 Cálculos Impacto en EBITDA

Valor del Dólar (14/04/2022): 815,53 CLP (Servicio de Impuestos Internos de Chile).

Tabla 23: EBITDA Empresas Cementeras Chilenas. Fuente: Memorias Anuales Melón, Polpaico y Cementos Biobío, Comisión de Mercado Financiero.

Año	Cementera 1	Cementera 2	Cementera 3
2015	27.498.814.000	12.071.000.000	50.393.000.000
2016	33.469.209.000	13.705.000.000	50.163.000.000
2017	29.326.475.000	8.277.000.000	43.951.000.000
2018	28.572.175.000	12.530.000.000	37.960.000.000
2019	31.221.871.000	17.852.000.000	36.324.000.000
2020	28.114.704.000	10.332.000.000	41.000.000.000
2021	39.269.129.000	38.000.000.000	58.700.000.000

Tabla 24: EBITDA Promedio Industria Cementera Años 2015 a 2021. Fuente: Elaboración Propia.

Año	CLP	USD
2015	29.987.604.667	36.770.695
2016	32.445.736.333	39.784.847
2017	27.184.825.000	33.333.936
2018	26.354.058.333	32.315.253
2019	28.465.957.000	34.904.856
2020	26.482.234.667	32.472.422
2021	45.323.043.000	55.574.955

Tabla 25: Proyección de EBITDA Promedio en base a Tendencia Años 2015 a 2021. Fuente: Elaboración Propia.

Proyección en EBITDA	
Año	USD
2020	40.976.629
2025	48.719.281
2030	56.461.933
2035	64.204.585
2040	71.947.237
2045	79.689.889
2050	87.432.541

Tabla 26: Proporción de EBITDA que representa el pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Calcinación. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Considerando Tarifa sin variación [USD]	Considerando Tarifa con variación moderada [USD]	Considerando Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	5,56%	5,6%	5,6%
2025	4,68%	9,4%	28,1%
2030	4,04%	28,3%	40,4%
2035	3,55%	24,9%	35,5%
2040	3,17%	22,2%	47,5%
2045	2,86%	20,0%	42,9%
2050	2,61%	18,3%	52,1%

Tabla 27: Proporción de EBITDA que representa el pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Combustión. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Considerando Tarifa sin variación [USD]	Considerando Tarifa con variación moderada [USD]	Considerando Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	2,03%	2,0%	2,0%
2025	1,71%	3,4%	10,2%
2030	1,47%	10,3%	14,7%
2035	1,30%	9,1%	13,0%
2040	1,16%	8,1%	17,3%
2045	1,04%	7,3%	15,7%
2050	0,95%	6,7%	19,0%

Tabla 28: Proporción de EBITDA que representa el pago de Impuesto Verde por CO2 generado en Proceso Global del Horno de Clinker. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Considerando Tarifa sin variación [USD]	Considerando Tarifa con variación moderada [USD]	Considerando Tarifa con variación acelerada [USD]
2020	7,59%	7,6%	7,6%
2025	6,39%	12,8%	38,3%
2030	5,51%	38,6%	55,1%
2035	4,85%	33,9%	48,5%
2040	4,32%	30,3%	64,9%
2045	3,90%	27,3%	58,6%
2050	3,56%	24,9%	71,2%

Anexo 5 Listado de Entrevistados

Tabla 29: Listado de Entrevistados. Fuente: Elaboración Propia.

Entrevistado	Profesión	Cargo
Carlos Benavides	Ingeniero Civil Electricista, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile.	Subdirector del Centro de Energía de la Universidad de Chile.
Carlos Barría Quezada	Ingeniero Civil Industrial, Diploma en Electricidad y Magíster en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.	Jefe de División de Estudios y Políticas, Ministerio de Energía Chile.
Augusto Holmberg Fuenzalida	Ingeniero Civil, Universidad de Chile.	Gerente General del Instituto del Cemento y el Hormigón Chile (ICH).
Rodrigo García Palma	Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile. Máster of Science (MS) Technology and Policy, Massachusetts Institute of Technology (MIT).	Director en Implementasur.
Cristian Mosella	Ingeniero Civil Industrial, Diploma en Ingeniería Mecánica, Magíster en Ciencias de la Ingeniería	Director Ejecutivo de EnergyLab.

Entrevistado	Profesión	Cargo
	(MSc) Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Chile.	
Marina Hermosilla Diez	Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile.	Directora Ejecutiva CLG Chile Líderes Empresariales por la Acción Climática
Constanza Montes	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, Universidad de Chile.	Asesora Técnica en Proyecto Global Carbon Market (GCM) Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
Juan Escalona	Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción. Magister en Gestión de la Sustentabilidad, Universidad del Desarrollo.	Gerente de Medio Ambiente, Empresas Melón.

Anexo 6 Listado de Papers ECRA CSI por Eje de Reducción de CO2 y Potencial de Reducción

Tabla 30: Listado de Papers ECRA. Fuente: (Federación Interamericana del Cemento FICEM, 2018)

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
Eje de Reducción: Eficiencia Energética	
Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas.	Directa: Reduce entre 4 y 16 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 0 y 0,5 kg CO2/ton clinker
Cambio de hornos largos a hornos con precalentador/precalcinador.	Directa: Reduce entre 80 y 250 kg CO2/ton clinker Indirecta: Reduce entre 0 a 2,5 Kg de CO2/ton clinker
Modificación del precalentador (Por ej. Ciclones con menor pérdida de presión).	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 0 y 1 Kg CO2/ton clinker
Etapas de ciclones con precalentadores adicionales.	Directa: Reduce entre 7 y 9 Kg CO2/ton clinker. Indirecta: Posible aumento de CO2 no cuantificado.
Aumento de la capacidad del horno.	Directa: Reduce entre 13 y 18 kg CO2/ton clinker Indirecta: Reduce entre 1 y 2 Kg CO2/ton clinker
Reemplazo del quemador mono canal a quemador moderno multicanal.	Directa: Reduce entre 2,2 y 6,5 Kg CO2/ton clinker Indirecta: No aplica (NA)
Tecnología de enriquecimiento de oxígeno.	Directa: Reduce entre 9 y 15 Kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 5 y 18 Kg CO2/ton clinker
Enfriador de clinker de tecnología eficiente.	Directa: Reduce entre 22 y 26 Kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 2 y 4 Kg CO2/ ton

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
	clinker
Recuperación de calor residual: Vapor.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 4 y 11 Kg CO2/ton clinker
Recuperación de calor residual: Ciclo orgánico de Rankine.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 5 y 10 Kg CO2/Ton clinker
Recuperación de calor residual: Ciclo Kalina.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 5 y 10 Kg CO2/ton clinker
Materias primas alternativas descarbonatadas para la producción de clinker.	Directa: Reduce entre 0 y 100 Kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 0 y 2 Kg CO2/ton clinker
Eje de Reducción: Combustibles Alternativos	
Cambio de combustible: Carbón/pet-coke por petróleo/gas/biomasa.	Directa: Reduce entre 50 y 80 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 0 y 2 kg CO2/ton clinker
Combustibles alternativos, reemplazando combustibles fósiles convencionales.	Directa: Reducción entre 0 y 80 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 0 y 2 kg CO2/ton clinker
Pretratamiento de combustibles alternativos (molienda y secado)	Directa: Reduce entre 0 y 14 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 1,6 a 2,9 kg CO2/ton clinker
Gasificación o pre-combustión de combustibles alternativos.	Directa: Reduce entre 40 y 45 Kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 0 y 1 kg CO2/ton clinker
Carbonización hidrotérmica (HTC) y torrefacción.	Directa: Reduce entre 0 y 65 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 6,1 y 9,8 kg CO2/ton

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
	clinker
Eje de Reducción: Eficiencia Eléctrica	
Optimización en el control y automatización de plantas.	Directa: Reduce entre 4 y 17 kg CO2/ton clinker Indirecta: Reduce entre 0 y 1,25 kg CO2/ton cemento
Variadores de velocidad.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 1,5 y 4,5 kg CO2/ton cemento
Eficiencia del sistema auxiliar de aire.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 1 y 3 kg CO2/ton cemento
Gestión de la energía.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)
Operación de planta de cemento optimizada con energía renovable.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 2 a 18 kg CO2/ton cemento
Molienda de cemento con molinos de rodillos verticales y prensa de rodillos.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 2,6 y 6,8 kg CO2/ ton cemento
Separadores de alta eficiencia.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 1,1 y 2,3 kg CO2/ton cemento
Optimización de los parámetros de funcionamiento de los molinos de bolas.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 0,3 y 1,8 kg CO2/ton cemento
Molienda separada de los componentes de materia prima.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 0,4 y 0,9 kg CO2/ton clinker
Tecnología avanzada de molienda.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)
Molienda y mezcla separados por finura.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 0,7 y 1,6 kg CO2/ton cemento

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
Aumento del rendimiento del cemento por optimización de la distribución del tamaño de partícula.	Directa: Reduce entre 0 y 1,5 kg CO2/ton cemento Indirecta: Reduce entre 0 y 0,72 kg CO2/ton cemento
Uso optimizado de los aditivos para molienda.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: Reduce entre 0,3 y 1,1 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del contenido de clinker mediante uso de escorias granuladas de alto horno.	Directa: Reducción entre 0 y 390 kg CO2/ton cemento Indirecta: Aumenta entre 0 y 5 kg CO2/ton cemento
Cementos y concretos de alto desempeño que reducen el CO2.	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)
Impacto del factor de saturación de cal muy alto/muy bajo.	Directa: Reduce entre 0 y 19 kg CO2/ton cemento Indirecta: Aumenta entre 5 y 12 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de ceniza volante.	Directa: Reduce entre 0 y 90 kg CO2/ ton cemento Indirecta: Reduce entre 1 y 8 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de puzolanas naturales.	Directa: Reduce entre 0 y 90 kg CO2/ton cemento Indirecta: Reduce entre 0 y 1,7 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de puzolanas naturales calcinadas (arcillas).	Directa: Reduce entre 0 y 73 kg CO2/ton cemento Indirecta: Reduce entre 0 y 2,5 kg CO2/ton cemento
Reducción adicional del clinker mediante uso de otros materiales.	Directa: Reduce entre 0 y 88 kg CO2/ton cemento Indirecta: Reduce entre 0 y 2,6 kg CO2/ton cemento
Eje de Reducción: Nuevas Materias Primas	

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
Cementos activados alcalinamente.	Directa: Depende en gran medida de las emisiones de CO2 de la producción del activador.
Cementos basados en la carbonatación de silicatos cálcicos.	Directa: No disponible (ND) Indirecta: Reduce entre 200 y 300 kg CO2/ton cemento
Otros clinker de bajo carbonato: Silicatos de calcio prehidratados.	Directa: No disponible (ND) Indirecta: No disponible (ND)
Otros cementos con bajo contenido de carbonato: Cementos Belita.	Directa: Reduce entre 13 y 17 kg CO2/ton cemento Indirecta: Aumenta entre 10 y 20 kg CO2/ton cemento
Eje de Reducción: Captura de carbono, almacenaje y uso	
Tecnología de oxi combustible	Directa: Reduce entre 530 y 835 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 60 y 90 kg CO2/ton cemento
Captura post-combustión usando tecnologías de absorción	Directa: Reduce entre 0 y 740 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 25 y 60 kg CO2/ton clinker
Captura post-combustión usando procesos de membrana	Directa: Reduce entre 700 y 760 kg CO2/ton clinker Indirecta: Aumenta entre 0 y 195 kg CO2/ton clinker
Captura post-combustión usando Solid Sorbents	Directa: Reduce entre 760 y 800 kg CO2/ton clinker Indirecta: No disponible (ND)
Uso de CO2: Productos químicos básicos	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)
Uso de CO2: Energía a gas (Metano CH4)	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)
Uso de CO2: Energía a líquidos (Metanol CH3OH)	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)

Título de la Investigación	Potencial de Reducción de CO2
Uso de CO2: Recuperación mejorada de petróleo	Directa: No aplica (NA) Indirecta: No aplica (NA)
Uso de CO2: Captura en algas y producción de biocombustibles	Directa: Reduce entre 0 y 750 kg CO2/ton clinker Indirecta: No disponible (ND)

Anexo 7 Consentimientos Informados de Participación

En orden de presentación:

- Augusto Holmberg.
- Carlos Barría.
- Carlos Benavides.
- Constanza Montes.
- Cristian Mosella.
- Juan Escalona.
- Marina Hermosilla.
- Rodrigo García.

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

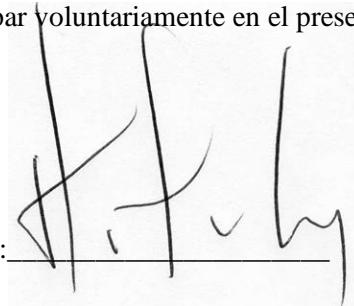
Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Augusto H. Holmberg Fuenzalida, acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: Santiago, Noviembre 17 de 2021

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. H. Holmberg Fuenzalida', written over a horizontal line.

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO2 que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que registrarán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

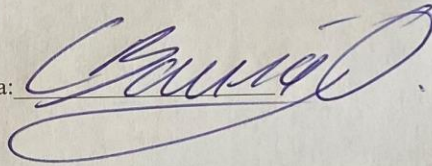
Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Carlos Eduardo Barria Quezada, acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: 12 enero 2022

Firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlos Eduardo Barria Quezada', written over a horizontal line.

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

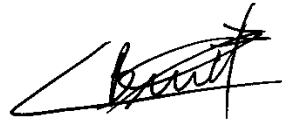
Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Carlos Benavides, acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: 14 de enero 2022

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Benavides', written over a horizontal line.

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica sobre las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos de precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Constanza Sofía Montes Barros, acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: 10 de noviembre de 2021

Firma:  _____

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Cristián Mosella Vial, acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: 12/11/2021

Firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'C. Mosella Vial', written over a horizontal line.

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo damdtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

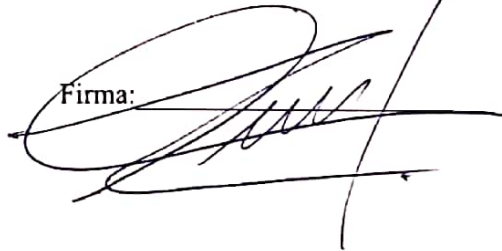
Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Juan Escobedo, (escribir nombre) acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: 01-03-2022

Firma:



Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

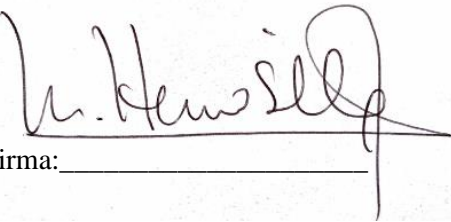
justificación de la causa, en el momento que lo considere pertinente. Entiendo, además, que este estudio no tendrá consecuencias negativas para mí, ni significará gasto alguno, como tampoco tendré ganancias directas.

Comprendo que toda la información generada será analizada en forma confidencial y no será conocida por personas ajenas a la investigación. Los datos finales no serán individualizados, y que en caso de que este estudio sea difundido, no será posible identificar a quienes fueron entrevistados.

Se me ha dicho que podré hacer preguntas al investigador en caso de tener dudas sobre el proceso y/o contenido de esta investigación. Asimismo, posteriormente, si lo solicito, tendré acceso a los resultados generales de este estudio.

Yo, Marina Hermosilla, (escribir nombre) acepto participar voluntariamente en el presente estudio.

Fecha: 13 de enero de 2022


Firma: _____

Consentimiento Informado

He sido invitado/a a participar en el estudio denominado “Estrategias de Adaptación de la Industria Cementera a Exigencias Tributarias de Carbono Neutralidad”. Esta investigación se realiza en el marco del Proyecto de grado conducente a la obtención del grado académico de Magister en Gestión de la Sustentabilidad de la señorita Diana Arndt González (correo darndtg@udd.cl, teléfono celular +569 53648019) alumna de la Universidad del Desarrollo, y que se encuentra supervisado por los profesores Alex Godoy Faúndez (alexgodoy@ingenieros.udd.cl) y Ricardo Javier Bustos Salvagno (rj.bustos@udd.cl). Este es un proyecto de investigación científica las estrategias que debería implementar la Industria del Cemento en Chile dadas las eventuales nuevas cargas tributarias en materia de emisiones de CO₂ que le serían aplicables bajo una estrategia de carbono neutralidad, principalmente mediante instrumentos del precio al carbono (IPC). Lo anterior, para permitir que las operaciones de producción de cemento puedan seguir funcionando durante los próximos años, en un marco de gestión sostenible en el ámbito económico, social y medio ambiental. El objetivo de este estudio es definir las estrategias que debe adoptar la Industria Cementera a Nivel Nacional para adaptarse a nuevas exigencias tributarias en materia de carbono neutralidad. A partir de ello, los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono que regirán en Chile los próximos años.
- Medir la implicancia económica de la exigencia tributaria de cada escenario en la Industria del Cemento a nivel nacional.
- Definir la estrategia a aplicar para cada uno de los escenarios de Instrumentos de Precio al Carbono.

Entiendo que toda la información obtenida en la investigación es privada y que no será conocida por otras personas, fuera del equipo de investigación y los directivos de la institución. Se me ha explicado que la participación consiste en una entrevista semi-estructurada, la cuál será realizada en formato de videollamada, resguardando debidamente la confidencialidad de mi nombre y cuyas respuestas serán anónimas y reservadas; su aplicación durará alrededor de 30 minutos. El registro de la entrevista será mediante grabación en sonido, la cual será posteriormente transcrita. Todos los antecedentes del estudio serán resguardados con rigurosidad. Asimismo, que puedo retirarme del estudio, sin tener que dar una

