

Proyecto Mecanismos y Redes de Transferencia de Tecnología Relacionada con el Cambio Climático en América Latina y el Caribe

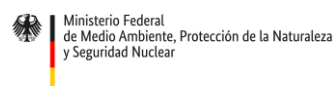
Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la Industria Chilena del Cemento

Fecha: Julio de 2020

Autores: Laurent Grimmeissen, Andrés Jensen y Stefan Wehner



Por encargo de:



de la República Federal de Alemania



INDICE DE CONTENIDO

1.	Principales hallazgos.....	8
1.1	Desempeño de la industria: Estado actual de la industria y comportamiento de emisiones 8	
1.2	Potencial de reducción de emisiones.....	9
1.3	Escenario de bajas emisiones proyectado hasta 2030.....	12
2.	Introducción	17
2.1	Trasfondo.....	17
2.2	Objetivo de la Hoja de Ruta.....	17
2.3	Principales tareas ejecutadas	18
3.	El sector del cemento en Chile	19
3.1	Producción de cemento y clínker	19
3.2	Importaciones.....	20
3.3	Tipo de cemento producido	21
3.4	Mercado del hormigón.....	21
3.5	Emisiones de gases de efecto invernadero de la industria chilena del cemento	21
4.	Apalancamiento para reducción de emisiones de carbono y recomendaciones de políticas relacionadas	24
4.1	Principales ejes para la reducción de las emisiones de CO ₂ relacionadas al cemento	24
4.2	Coprocesamiento de combustibles alternativos.....	25
4.2.1	Descripción	25
4.2.2	Mejores prácticas a nivel internacional	28
4.2.3	La situación en Chile	30
4.2.4	Potencial de Mejoramiento.....	32
4.2.5	Las barreras existentes o potenciales	36
4.2.6	Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera.....	36
4.2.7	Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras 38	
4.2.8	Nivel de esfuerzo para superar las barreras.....	44
4.2.9	Hoja de ruta para coprocesamiento.....	45
4.3	Eficiencia energética térmica	45
4.3.1	Descripción	45
4.3.2	Mejores prácticas a nivel internacional	46
4.3.3	La situación en Chile	47
4.3.4	Potencial de mejoramiento.....	47
4.3.5	Las barreras existentes o potenciales	49
4.3.6	Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera.....	49

4.3.7	Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras	50
4.3.8	Hoja de ruta para eficiencia energética térmica	50
4.4	Eficiencia energética eléctrica	50
4.4.1	Descripción	51
4.4.2	Mejores prácticas a nivel internacional	51
4.4.3	La situación en Chile	52
4.4.4	Potencial de mejoramiento	53
4.4.5	Las barreras existentes o potenciales	54
4.4.6	Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera.....	54
4.4.7	Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras	54
4.4.8	Hoja de ruta para eficiencia energética eléctrica.....	55
4.5	Reducción del factor clínker	55
4.5.1	Descripción	55
4.5.2	Mejores prácticas a nivel internacional	57
4.5.3	La situación en Chile	57
4.5.4	Potencial de mejoramiento	58
4.5.5	Las barreras existentes o potenciales	60
4.5.6	Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera.....	60
4.5.7	Medida de mitigación recomendada	61
4.5.8	Nivel de esfuerzo para superar la barrera.....	64
4.5.9	Hoja de ruta para la reducción del factor clínker	64
4.6	Reducción del contenido de cemento en el hormigón	64
4.6.1	Descripción	65
4.6.2	Mejores prácticas a nivel internacional	65
4.6.3	La situación en Chile	66
4.6.4	Potencial de mejoramiento	66
4.6.5	Las barreras existentes o potenciales	67
4.6.6	Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera.....	68
4.6.7	Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras	68
4.6.8	Hoja de ruta para la reducción del cemento en el hormigón	68
5.	Escenario de bajas emisiones proyectado hasta 2030	69
6.	Plan de acción para el desarrollo de bajas emisiones en sector cementero chileno.....	75
7.	Efecto potencial de un precio al carbono sobre la competitividad de la industria cementera	83
8.	Conclusiones.....	86

9. Anexos	87
Anexo 1	87
Huella de Carbono de la Industria Nacional	87
Fuga de Carbono e Instrumentos de Precio al Carbono	87
Coprocesamiento	87
Factor Clínker y Adiciones	88
Molienda Separada	89
10. Referencias	90

Figuras

Figura 1: Curva de costos marginales de abatimiento	12
Figura 2: Trayectoria de emisiones	13
Figura 3: Reducción acumulativa de emisiones hasta 2030	14
Figura 4: Emisiones de CO ₂ por año en kilo ton relacionadas con la producción de clínker en Chile .	22
Figura 5: Emisiones de CO ₂ por tonelada de cemento en 2014	23
Figura 6: Jerarquía gestión de residuos	26
Figura 7: Comparativo coprocesamiento (año reportado 2017)	31
Figura 8: Distribución de la demanda energética por etapa del proceso	46
Figura 9: Comparativo consumo térmico (año 2017)	47
Figura 10: Comparativo consumo eléctrico (año 2017)	52
Figura 11: Comparativo factor clínker (2017)	57
Figura 12: Curva de costos marginales de abatimiento	71
Figura 13: Trayectoria de emisiones	73
Figura 14: Reducción acumulativa de emisiones hasta 2030	74

Tablas

Tabla 1: Reducción de emisiones 2017 - 2030 (tCO ₂ /año) con todos los ejes implementados a su máximo potencial	11
Tabla 2: Plan de acción para las medidas recomendadas en la Hoja de Ruta	15
Tabla 3: Capacidad de los productores chilenos (millones de toneladas cemento al año)	20
Tabla 4: Indicadores técnicos	24
Tabla 5: Supuestos para el cálculo de MAC	69
Tabla 6: Impacto potencial de las medidas de alta prioridad, sin considerar interacción entre ellas	71
Tabla 7: Disminución de emisiones 2017-2030 (tCO ₂ /año) con todos los ejes a su máximo potencial	72
Tabla 8: Resumen de Acciones y Prioridades	75
Tabla 9: Lista de Acciones, barreras y medida de mitigación para las medidas recomendadas en la Hoja de Ruta	78
Tabla 10: Plan de acción para las medidas recomendadas en la Hoja de Ruta	81

Información general

Tipo de cambio 1.10 USD / EUR (2019)

Acrónimos

AB	Asociación de Alimentos y Bebidas
ALC	América Latina y el Caribe
APL	Acuerdo de Producción Limpia
BCA	Border Carbon Adjustment
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CDR	Combustible Derivado de Residuos
CEMA	La Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (FUNDACIÓN CEMA)
CO ₂	Dióxido de carbono
CSI	Iniciativa Cemento Sostenible por su sigla en Inglés: Cement Sustainable Initiative
ECRA	European Cement Research Academy
EPFL	L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
EST	Tecnologías ecológicamente racionales por su sigla en Inglés: ecologically sound technologies
ETS	Emission trading scheme
FICEM	Federación Interamericana del Cemento
FNDR	Fondo Nacional de Desarrollo Regional
GEI	Gases de efecto invernadero
GNR	“Getting the Numbers Right” o “GCCA in Numbers”
IEA	Agencia Internacional de la Energía por su sigla en Inglés: International Energy Agency
IFC	Corporación Financiera Internacional por su sigla en Inglés: International Finance Corporation
ICH	Instituto del Cemento y el Hormigón
kg	kilogramo
LATAM	América latina
LC3	Los cementos de arcilla calcinada caliza por su sigla en Inglés: limestone and the 3c for clínker, calcined clay
MAC	Costos de Reducción Marginales por su sigla en Inglés: Marginal abatement costs
MJ	Megajulio
Mpa	Megapascal
NCh	Norma Chilena
NDC	Contribución nacional determinada por su sigla en Inglés: Nationally Determined Contributions
ONG	organizaciones no gubernamentales
OPC	Cemento portland ordinario por su sigla en Inglés: Ordinary Portland Cement
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
PPC	Pozolanic Portland Cement
RDF	Combustible Derivado de Residuos – CDR por su sigla en Inglés: Refuse-derived fuel
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SIG	sistemas integrados de gestión
t	Tonelada
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente por su sigla en Inglés: United Nations Environment Programme
USD	Dólar estadounidense
WTO	World Trade Organisation

Sres.:

Ministerio de Energía

Chile

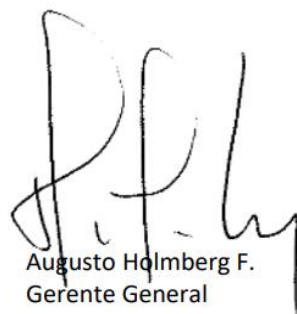
De nuestra consideración:

La industria del cemento de Chile, representada por el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), agradece la oportunidad que ha tenido de participar en el proceso de elaboración del documento **“Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la Industria Chilena del Cemento”** (en adelante el Estudio), encargado por el Ministerio de Energía y con el apoyo de GIZ y la consultora Cementis. En el marco indicado, en el Anexo 1, podrán encontrar nuestros comentarios y observaciones a la versión final de este documento, que entendemos como un punto de partida para un trabajo en un campo que es dinámico y cambiante, en función de las condiciones del mercado de la industria, el avance de las tecnologías limpias y la evolución de las políticas a nivel nacional e internacional. Así, creemos importante y necesario impulsar mesas de trabajo e instancias de coordinación público-privadas que permitan alcanzar los objetivos planteados.

Con respecto al objetivo central del Estudio, que es reducir las emisiones en la producción de cemento y hormigón en Chile, señalamos que esta meta está en línea con lo declarado en nuestra “Hoja de Ruta Chile-FICEM, hacia una Economía baja en Carbono” publicada en abril del año 2019 y ratifica la necesidad de trabajar en distintos ejes para la reducción de CO₂ en todo el ciclo de vida del cemento.

Finalmente, el ICH, así como también las empresas cementeras que han participado en este proceso (CBB, Melón y Polpaico) queremos reafirmar el compromiso con nuestra Hoja de Ruta 2019-2030 y creemos que el estudio realizado por el Ministerio de Energía está en línea con los objetivos que nuestra industria está impulsando en materia acción climática, por lo que desde ya quedamos a disposición para continuar profundizando las recomendaciones, observaciones y conclusiones que de este estudio se desprenden.

Saluda cordialmente a usted,



Augusto Holmberg F.
Gerente General



1. PRINCIPALES HALLAZGOS

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. La industria cementera es responsable de 8% de las emisiones antrópicas de CO₂. Es decir, es muy relevante para la gestión del cambio climático el buscar soluciones que permitan reducir las emisiones relacionadas al uso del cemento.

El principal objetivo de este trabajo es elaborar un análisis de necesidades tecnológicas para el desarrollo bajo en emisiones de la industria chilena del cemento y el hormigón, con objetivos cuantificables y realistas acordados entre las principales partes interesadas, por lo que por medio de su publicación se espera contribuir en acelerar la transformación tecnológica necesaria. Éste pretende complementar los esfuerzos del sector y aportar con una base de trabajo conjunta entre el sector público y privado. Por tanto, la hoja de ruta que proporciona este estudio corresponde a un ejercicio vivo y dinámico, que irá evolucionando en el tiempo en función del contexto de la industria nacional que se ve influida por múltiples factores endógenos y exógenos.

1.1 Desempeño de la industria: Estado actual de la industria y comportamiento de emisiones

Las empresas productoras de cemento en Chile se pueden clasificar en aquellas que cuentan con plantas integradas (producción de clínker y cemento y aquellas que se han enfocado en la producción de cemento a partir de clínker importado mediante estaciones de molienda. La capacidad instalada de cemento es de 10,4 millones de toneladas al año, más de 2,5 veces el consumo anual estimado de 3,9 millones de toneladas por el año 2018. A pesar de esta importante sobre-capacidad, la industria cementera chilena se enfrenta a un alto nivel de importaciones debido (I) a un alto costo de la caliza (materia prima esencial en la producción de clínker), y (II) al bajo costo de las importaciones favoreciendo un bajo precio de flete de retorno desde la Asia¹.

Según la Hoja de Ruta de FICEM-ICH, 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 según el GNR (GCCA "Getting the Numbers Right").

Por lo tanto, 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 acostumar el mercado a estos tipos de cementos con adiciones y bajo contenido de clínker.

¹ Los barcos que llevan productos chilenos hacia la Asia reducen el precio del flete de retorno para no regresar vacíos.

1.2 Potencial de reducción de emisiones

Una reducción efectiva de las emisiones de CO₂ implica actuar sobre toda la cadena de valor: cemento, hormigón, y construcción. Esta Hoja de Ruta se enfoca en la producción de cemento y hormigón.

Los principales ejes para reducir las emisiones en el cemento y en el hormigón son tradicionalmente las siguientes: Esto también aplica en el caso de Chile.

- A nivel del clínker:
 - Uso (coprocesamiento) de combustibles alternativos
 - Eficiencia energética térmica
- A nivel del cemento
 - Reducción del contenido de clínker en el cemento (factor clínker)
 - Eficiencia energética eléctrica
- A nivel del hormigón
 - Reducción del contenido de cemento en el hormigón

Esta Hoja de Ruta considera únicamente los ejes adaptados a la situación chilena, en particular en términos de factibilidad económica. Por ejemplo, no se consideraron ejes como la ampliación de capacidad de los hornos que supone inversiones mayores que no son justificadas por la sobrecapacidad que debería mantenerse hasta el 2030. Tres ejes mayores fueron identificados:

Co-procesamiento: 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, el uso de residuos como combustibles y materias primas es un ejemplo de los conceptos anteriores.

El objetivo sería de aumentar la tasa de sustitución de 12,6% (2017) a 30% (2030), lo que implicaría consumir hasta 148.000 toneladas de desechos por año. El nivel de inversión necesario sería entre 32 y 42 millones de USD y podría reducir las emisiones netas en hasta 118.000 toneladas de CO₂ al año.

Conseguir este resultado necesitará levantar las barreras actuales, la mayoría de tipo regulatoria. Se recomiendan dos medidas mayores de mitigación: (I) adaptar la legislación chilena al ejemplo europeo y (II) 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 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 / lineamientos.

Reducción del factor clínker:

A pesar de que el factor clínker de Chile es uno de los más bajos del mundo (64,8% en el 2017), se considera que no se va a poder seguir reduciendo sin disponer de más escorias de alto horno o de cenizas en cantidad y calidad suficiente. Si la puzolana natural chilena existe de manera abundante, su calidad no permite aumentar su porcentaje en el cemento más allá de lo que se hace ahora.

Por lo tanto, se considera que se podría optimizar a niveles del 55% produciendo un nuevo tipo de cemento en base a arcilla calcinada. Lo anterior bajo el entendido que no se dispone de otras materias primas como las escorias de alto horno, cenizas, o puzolana natural en cantidad y calidad suficiente.

El nivel de inversión necesario sería entre 10 y 12 millones de USD por concepto de los equipos necesarios a la calcinación de la arcilla (hornos rotativos o calcinador flash) y podría reducir las emisiones hasta 165.000 toneladas de CO₂ al año sin tomar en cuenta el efecto acumulado de los diferentes ejes.

No se identificaron barreras regulatorias a la implementación de este eje. Las barreras relacionadas son, además de la necesidad de encontrar materias de sustitución al clínker como mencionado anteriormente, más del orden del conocimiento técnico y de la aceptación del mercado, dos barreras que se pueden superar fácilmente a base de asistencia técnica y campañas de concientización.

Reducción del contenido de cemento en el hormigón. Producir hormigón en plantas centralizadas permite ahorrar 50 kg (cifra conservativa) de cemento por m³ en comparación de la producción manual en la obra con cemento en saco. Se supone que 40% de las ventas total de cemento en Chile se hacen en saco (<10% en Europa). Esta hoja de ruta tiene como objetivo de reducir este % a 30% al horizonte 2030.

El nivel de inversión necesario sería aproximadamente de 500.000 EUR (USD 550.000) para 50.000 m³ de hormigón o hasta 13 millones de EUR en total (USD 14 millones) y podría reducir las emisiones hasta 68.000 toneladas de CO₂ al año sin tomar en cuenta el efecto acumulado de los diferentes ejes².

No se identificaron barreras a la implementación de este eje. Por lo tanto, se sugiere incentivar la producción de hormigón en planta centralizada a través, por ejemplo, de descuento a los impuestos sobre la vivienda.

Se propone como último eje autorizar la molienda separada de cemento, que es una práctica estándar al nivel internacional pero que en Chile no está permitida. No se prevé inversiones debido al alto nivel de sobrecapacidad y el ahorro de emisiones sería únicamente de unas 6.240 toneladas de CO₂ al año. Este eje supone modificar la normativa que actualmente no contempla la posibilidad de molienda separada.

Considerando el efecto acumulado de estos ejes, el ahorro total de emisiones al horizonte 2030 alcanzaría hasta 327.000 toneladas netas de CO₂ al año, una reducción de 15% sobre el nivel de emisión actual.

La Tabla 1 siguiente muestra el efecto combinado de los diferentes ejes si se llevan a su máximo potencial individual, llegando a esa potencial reducción de 327.000 toneladas netas de CO₂, coexistiendo unos con otros. Es importante mencionar en este caso que el potencial máximo teórico de reducción de emisiones en base a la producción de cemento con arcilla calcinada es mayor (hasta 190.000 t anuales) si se considera el eje en forma aislada. Ese potencial disminuye tanto para emisiones brutas como netas (principalmente netas), ya que se combina con el efecto del coprocesamiento que ya implica una

² Opinión de expertos.

disminución en la emisión específica por tonelada de clínker. Con esto, el potencial de disminución para emisiones directas (netas) Alcance 1 que se considera aplicable, es el que se observa en la Tabla 1.

Para el caso de los otros ejes, el cálculo potencial se ha basado en el promedio del rango establecido por la referencia internacional (ECRA).

Tabla 1: Reducción de emisiones 2017 - 2030 (tCO₂/año) con todos los ejes implementados a su máximo potencial

Emisiones Directas (Alcance 1)					
	Potencial Disminución emisiones - Brutas ³	Potencial Disminución emisiones - Netas	Base de cálculo	Total Potencial Disminución emisiones - Brutas	Total Potencial Disminución emisiones - Netas
Coprocesamiento	kg CO ₂ /t clínker	kg CO ₂ /t clínker	Mt clínker	tCO ₂ /año	t CO ₂ /año
	10,6	59,3	2,0 ⁴	21.200	118.600
Producción de Cemento Arcilla Calcinada	kg CO ₂ /t cem Arcilla calcinada	kg CO ₂ /t cem Arcilla calcinada	Mt cemento Arcilla Calcinada	tCO ₂ /año	tCO ₂ /año
	331	294	500,000 ⁵	165.450	147.225
Total parcial potencial (tCO₂/año)				186.650	265.825

Emisiones Indirectas (Alcance 2)			
	Potencial Disminución emisiones	Base de Cálculo	Total Potencial Disminución emisiones
	kg CO ₂ /t cem	Mt cemento	tCO ₂ /año

³ Según las convenciones internacionales y lo definido en el protocolo GNR para el reporte, monitoreo y verificación de emisiones en la industria cementera, las emisiones brutas corresponden al total de emisiones directas generadas en una planta productiva, incluyendo el CO₂ desde combustibles fósiles tradicionales y combustibles fósiles alternativos (derivados de residuos), excluyendo el CO₂ proveniente de biomasa (que se informa por separado). Las emisiones netas corresponden a las emisiones brutas menos los créditos obtenidos por disminuciones indirectas de GEI, y se obtienen restando de las emisiones brutas, aquellas provenientes de la fracción fósil de los combustibles alternativos. Esta convención debe ratificarse caso a caso, considerando las circunstancias locales.

⁴ Se considera la producción actual de clínker de 2.000.000 t anuales.

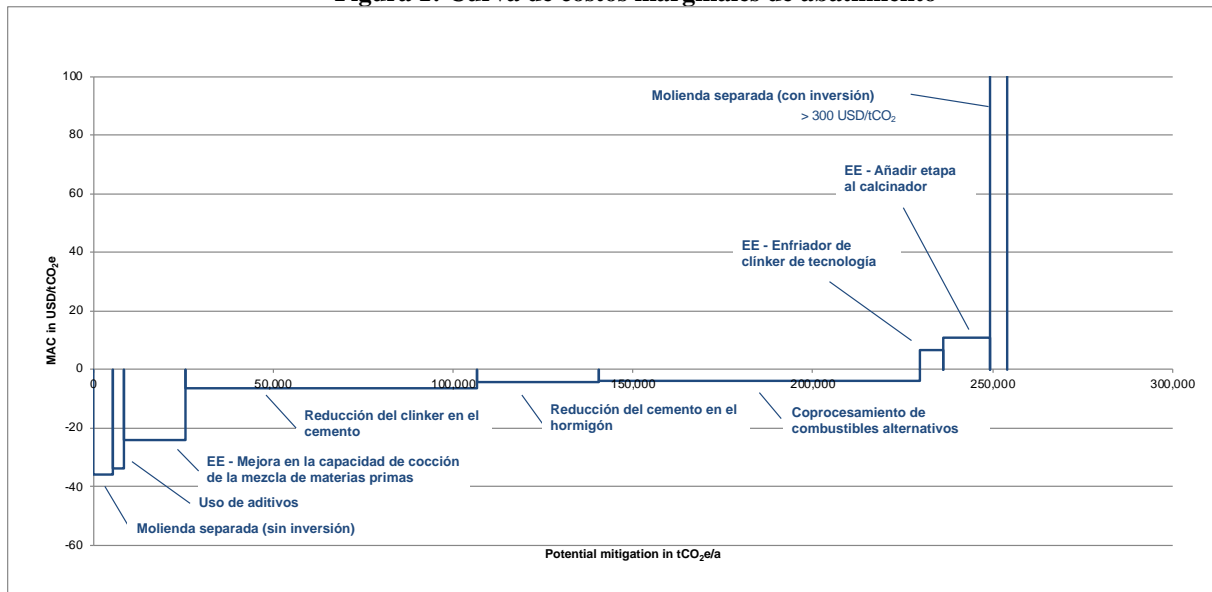
⁵ Considerando que se reemplaza 500.000 t de cemento OPC por 500.000 t de cemento a base de arcilla calcinada (12,8% de la producción total de cemento).

Molienda Separada	1,15	3,9	4.485
Total parcial potencial (tCO₂/año)			4.485
Otras Emisiones			
	Potencial Disminución emisiones	Base de Cálculo	Total Potencial Disminución emisiones
	kg CO ₂ /t cem	Mt cemento	tCO ₂ /año
Producción Industrializada de Hormigón	14,5	3,9	56.550
Total parcial potencial (tCO₂/año)			56.550
Total parcial potencial (tCO₂/año) - netas			326.860

1.3 Escenario de bajas emisiones proyectado hasta 2030

La estimación de la curva MAC para el sector cemento en Chile cubre el periodo 2020 – 2030.

Figura 1: Curva de costos marginales de abatimiento

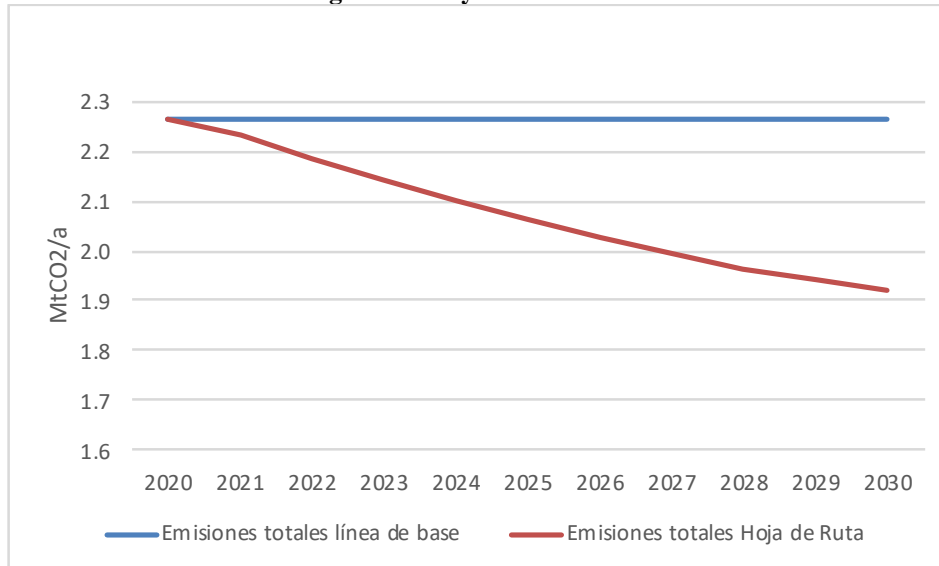


Como se puede observar, la mayor parte de las opciones de mitigación tienen un costo marginal de abatimiento negativo, lo que significa que son económicamente viables. La opción más atractiva bajo este criterio es la “molienda separada” (no requiere inversión) y el “uso de aditivos”, así como la “reducción de cemento en el hormigón”, “coprocesamiento” y la “reducción del clinker en el cemento”

La implementación integral de las acciones de mitigación no se logrará de una vez en el corto plazo. Los potenciales estimados de mitigación, relativos a las acciones priorizadas y sus respectivos volúmenes de mitigación y costos, asumen una implementación total de todos los ejes hacia 2025. Esto dependerá obviamente de diferentes aspectos tanto políticos como económicos de los que dependen las diferentes acciones propuestas.

A través del tiempo, el potencial de mitigación alcanza hasta un 15% para 2030, comparado con la situación actual (2017)⁶. Como resultado, el sector cementero podría reducir desde casi 2,3 MtCO₂/año a 1,9 MtCO₂/año.

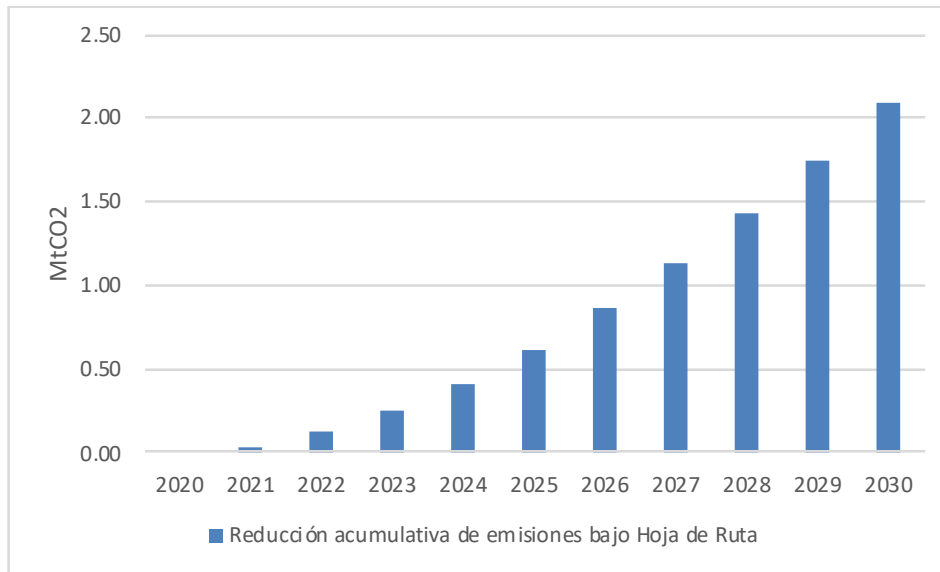
Figura 2: Trayectoria de emisiones



La reducción total de emisiones relativa a los 4 ejes principales identificados puede alcanzar un acumulado, a 2030, de hasta 2,1 MtCO₂.

⁶ La situación actual de la industria, bajo el escenario “business as usual” se asume como el desarrollo de la línea de base. Dada la actual sobrecapacidad en la producción de clínker y el estándar de competitividad comparable con las mejores tecnologías disponibles y mejores prácticas (Ej. Promedio de consumo térmico, factor clínker, etc), no se esperan mayores desviaciones respecto del escenario “business as usual”, sin intervención política o regulatoria. Las cifras e indicadores correspondientes a 2017 corresponden a la información más actualizada para el sector.

Figura 3: Reducción acumulativa de emisiones hasta 2030



La siguiente tabla resume el plan de acción para el desarrollo de bajas emisiones en sector cementero chileno:

Tabla 2: Plan de acción para las medidas recomendadas en la Hoja de Ruta

Eje	Medida	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
A nivel de clínker	Coprocesamiento de combustibles alternativos	Diseño, Negociación e implementación Acuerdo de Producción Limpia						
		Coprocesamiento como alternativa de valorización para E&E						
		Capacitación sector público en coprocesamiento				Capacitación sector público en coprocesamiento		
		Diseño Proyectos de valor compartido	Implementación Proyectos Valor Compartido					
		Capacitación y evaluación técnica y estratégica empresas cementeras			Capacitación y evaluación técnica y estratégica empresas cementeras			
		Involucramiento con SIGs REP						
		Inversión 20-25 Mio USD en pre-procesamiento						
			Inversión 4,2 Mio USD en Plantas	Inversión 2,8 Mio USD en Plantas	Inversión 2,8 Mio USD en Plantas	Inversión 2,1 Mio USD en Plantas	Inversión 2,1 Mio USD en Plantas	
			Sustitución 16%	Sustitución 20%	Sustitución 22%	Sustitución 25%	Sustitución 27%	
	Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas	Estudios de factibilidad caso a caso						
			Implementación					
A nivel del cemento	Producción de cemento a base de caliza y arcilla calcinada	Estudios de factibilidad proyecto piloto						

Eje	Medida	2020	2021	2022	2023	2024	2025
			Ejecutar proyecto piloto				
				Programas de concientización, capacitación			
					Ejecución progresiva de las inversiones para llegar al objetivo de la Hoja de Ruta		
	Molienda separada sin inversión	Discusión y gestión para modificar normativa que no permite la molienda separada					
			Implementación				
	Uso de aditivos por la molienda	Discusión con las autoridades para cancelar la restricción legal					
			Implementación				
A nivel del hormigón	Aumento del hormigón premezclado versus fabricación manual en la obra	Programas de concientización. Negociación de un descuento sobre los impuestos relacionados a la vivienda para construcción responsable, , por ejemplo descuento sobre las contribuciones de bienes raíces					
			Por los 3 próximos años seguimiento de la concientización.				

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Trasfondo

El objetivo del proyecto "Mecanismos y Redes de Transferencia de Tecnologías relacionadas con el Cambio Climático en América Latina y el Caribe", preparado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), es promover el desarrollo y la transferencia de tecnologías ecológicamente racionales (EST por su sigla en Inglés) en los países de América Latina y el Caribe (ALC), para contribuir a: (a) El objetivo final de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático en sectores específicos de la región. En este contexto, se realiza un estudio que permitirá completar un análisis de las necesidades tecnológicas en torno al cambio climático en el sector cemento, que incluya: i) Llevar a cabo la identificación y priorización de tecnologías; (ii) realizar un análisis de barreras y marcos o medidas habilitantes; y, iii) proponer un plan de acción en cuanto a tecnología, acompañado de un plan de inversión para el sector cementero nacional. El estudio considera abordar y reducir los riesgos para una transición hacia bajas emisiones de carbono para la economía chilena y para la industria del cemento en particular.

El objetivo general de la consultoría es proponer acciones prácticas para que la industria cementera chilena contribuya de la manera más eficiente y sostenible a los compromisos nacionales de reducción de CO₂, apoyándose en recomendaciones de implementación de tecnologías ambientalmente racionales. Las tecnologías ambientalmente racionales son aquellas que "protegen el medio ambiente, son menos contaminantes, utilizan los recursos de una manera más sostenible, reciclan más de sus desechos y productos, y manejan residuos de una manera más aceptable que las tecnologías para las cuales son sustitutas" (Agenda 21). La transferencia de tecnología no solo se relaciona con el equipo o "hardware", sino también con los sistemas de gestión y sus componentes, incluidos los conocimientos técnicos, bienes y servicios, equipos y Procedimientos gerenciales (Less & McMillan, 2005)⁷.

2.2 Objetivo de la Hoja de Ruta

El principal objetivo de esta tarea es elaborar una hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones para la industria chilena del cemento y el hormigón, con objetivos cuantificables y realistas acordados entre las principales partes interesadas, cuya implementación puede comenzar inmediatamente después de su publicación. Esta Hoja de Ruta complementa la Hoja de Ruta FICEM-ICH. Esto implica, a partir de los aportes obtenidos de las tareas anteriores, la elaboración de un Plan de Acción para las medidas

⁷ https://www.oecd-ilibrary.org/trade/achieving-the-successful-transfer-of-environmentally-sound-technologies_308662648512

sugeridas, incluido un Plan de Inversión a nivel sectorial, considerando el diseño de una hoja de ruta tecnológica para la incorporación de estas tecnologías a lo largo del tiempo en el sector. Para que esta hoja de ruta pueda ser implementada, se debe haber evaluada la viabilidad financiera de los objetivos y sus resultados deberán reflejarse en la misma planificación. El diseño de la hoja de ruta incluye los mecanismos para su implementación y un costo estimado de ellos.

La hoja de ruta para el desarrollo con bajas emisiones responde, entre otras, las siguientes preguntas:

- a) ¿Cómo el gobierno traducirá las recomendaciones del estudio en acciones concretas de política y regulación?
- b) ¿Cómo se involucrará al sector privado para implementar acciones concretas?
- c) ¿Cómo se creará el ambiente habilitante para movilizar y concretar las inversiones necesarias para la transformación del sector?

2.3 Principales tareas ejecutadas

Además de la producción de los informes requeridos en los Términos de Referencia, las principales tareas ejecutadas por el Consultor para alcanzar los objetivos fueron:

- a) Entrevistas individuales con los principales actores claves del sector público y del sector privado en agosto 2019;
- b) Taller de consulta a las partes interesadas de los sectores público y privado, el que se materializó el día 5 de noviembre de 2019. El objetivo principal del taller fue presentar el borrador de las medidas de política y tecnología de la hoja de ruta y los hallazgos clave del proyecto, con el objetivo de obtener un consenso sobre los objetivos propuestos para la hoja de ruta sobre el desarrollo con bajas emisiones. La lista de partes interesadas relevantes incluye las instituciones enumeradas en Informe Fase 1;
- c) El Consultor analizó, para las principales medidas / inversiones, los Costos de Reducción Marginales (MAC). Además, estos costos también se considerarán como criterio para la selección / recomendaciones de tecnología,
- a) Se desarrolló, el 4 de diciembre de 2019, un taller final de presentación de los resultados de la Hoja de Ruta incluyendo los ejes individuales, las acciones requeridas para la implementación, y las implicaciones sobre la reducción de las emisiones. Se notó una importante participación de la industria cementera que permitió discutir y validar el contenido de la Hoja de Ruta. En particular se discutió y se aprobó:
 - Apalancamiento y tecnologías de mitigación de emisiones recomendadas (basadas en Fase 2);
 - Recomendaciones sobre las medidas políticas, legislativas y reglamentarias necesarias para abordar las brechas y barreras identificadas en Fase 3;
 - Un plan de acción con un cronograma recomendado para estas acciones y las interacciones entre las acciones y recomendaciones sobre las instituciones y entidades que deben ser responsables de cada acción.

3. EL SECTOR DEL CEMENTO EN CHILE

3.1 Producción de cemento y clínker

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 décadas pasadas (90s y anteriores), la industria ha mutado hacia una composición mixta donde la producción local de clínker, que enfrenta complejas estructuras de costos, ha dado lugar a la importación de clínker e incluso cemento en proporciones relevantes. En la actualidad, la producción de clínker nacional se concentra en 4 plantas integradas (Cementos BíoBío en Antofagasta, Cementos Melón en La Calera, Cementos Polpaico en Santiago y Cementos BíoBío en Curicó – Teno), mientras que la producción de cemento se desarrolla en las mismas plantas, más una serie de estaciones de molienda distribuidas en el territorio nacional, principalmente cercanas a la costa (puertos), las cuales se abastecen de materias primas importadas a costos competitivos.

Las empresas productoras de cemento en Chile se pueden clasificar en aquellas que cuentan con plantas integradas (producción de clínker y cemento), y aquellas que se han enfocado en la producción de cemento a partir de clínker importado mediante estaciones de molienda.

Los tres principales productores a nivel nacional son las empresas que pueden calificarse como históricas en el mercado del cemento a nivel local:

- Cementos BíoBío: que cuenta con 2 plantas integradas, Inacesa en Antofagasta (II Región) y Curicó-Teno (VII Región) y con estaciones de molienda en Talcahuano (VIII Región, planta integrada que desde 2017 no produce clínker), San Antonio (V Región) y en el norte del país (Arica XV Región).
- Cemento Melón: Cuenta con una planta integrada clínker-cemento en La Calera (V Región), estación de molienda en Ventanas (V Región) y estación de molienda en Puerto Montt (X Región).
- Cemento Polpaico⁸: Cuenta con Planta Integrada en Polpaico (Región Metropolitana) y estaciones de molienda en Mejillones (II Región) y Coronel (VIII Región).

Durante las últimas 2 décadas, algunas otras empresas han ido ganando un lugar en el mercado mediante un modelo de negocios basado en la operación de estaciones de molienda, utilizando clínker importado. Las principales empresas de este tipo son:

⁸ Cemento Polpaico fue adquirida en 2017 por el grupo económico que además controla Cementos Bicentenario S.A. El proceso de fusión de ambas empresas está en curso a la fecha.

- Cementos Bicentenario (BSA): Cuenta con una estación de molienda de cemento ubicada en la Región Metropolitana, inaugurada en 2018.
- Cementos San Juan, una subsidiaria del Grupo la Unión: Cuenta con una estación de molienda ubicada en San Pedro (V Región)
- Cementos Transex: Cuenta con una estación de molienda ubicada en la Región Metropolitana.

Tabla 3: Capacidad de los productores chilenos (millones de toneladas cemento al año)

Planta	Tipo de plantas	Capacidad
Cementos Bío Bío		
Antofagasta	Integrada	0,5
San Antonio	Molienda	0,3
Curicó	Integrada	1,7
Talcahuano	Molienda	0,8
Total		3,3
Cementos Polpaico		
Mejillones	Molienda	0,7
Planta Cerro Blanco	Integrada	1,3
Planta Coronel	Molienda	0,4
Total		2,4
Cementos Melón		
Ventanas	Molienda	0,6
La Calera	Integrada	1,5
Puerto Montt	Molienda	0,6
Total		2,7
Otras		
Cementos La Unión	Molienda	0,3
Cementos Transex	Molienda	0,5
BSA	Molienda	1,2
Total		2,0
Total Industria		10,4

Fuente: (Ecoconsult Capital, 2019)

3.2 Importaciones

Según la Cámara Chilena de la Construcción, la producción nacional de cemento (plantas integradas y moliendas) fue de 3.992.818 toneladas en el 2018 (Cámara Chilena de la Construcción, 2019).

Según la Hoja de Ruta de FICEM el contenido de clínker en cemento alcanzó un 67% en 2014 (FICEM-ICH, 2019). Asumiendo que el factor clínker promedio informado para 2014 se mantuvo constante hasta 2018, la utilización de clínker sería de 2.6 millones de toneladas. Según la Hoja de Ruta FICEM-ICH el clínker importado en 2014 representó 29.1% (2.822.633-1.999.736) / 2.822.633 del clínker consumido. Por otra parte, Econsult Capital mencionó en un informe publicado en Julio 2019 que el clínker importado representó 2.4 millones de toneladas en 2018, lo que implicaría que prácticamente todo el clínker utilizado en Chile sería de origen importado. Sin perjuicio de estas inconsistencias, el volumen de clínker importado es importante en un país que tiene suficiente capacidad de producción local. Esto se explica por un costo del clínker importado equivalente al costo del clínker producido localmente, por las siguientes razones:

- I. El costo de producción de clínker en Chile es alto, debido al hecho que, o bien la caliza (materia prima esencial en la producción de clínker) es de bajo contenido en carbonato de calcio y entonces se necesita un costoso proceso para mejorar su calidad, o bien la caliza es 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 clínker desde Asia hacia Chile a bajo costo (logística reversa).

3.3 **Tipo de cemento producido**

Según las entrevistas realizadas durante la primera misión, el 80% del cemento producido en Chile es de tipo PPC (Pozolanic Portland Cement) 450 (cemento puzolánico con 450 kg/cm² de resistencia garantizada) y 20% de OPC (Ordinary Portland Cement - cemento portland ordinario).

3.4 **Mercado del hormigón**

No existen estadísticas sobre el consumo de hormigón premezclado en Chile, pero en base a las informaciones recogidas durante las entrevistas que el consultor desarrolló con los productores de cemento y hormigón, se puede estimar este consumo de manera suficientemente precisa. Según lo informado por las empresas productoras, el 60% del cemento se vende a granel y 40% en saco. En base de entrevistas se asume que el consumo anual de hormigón premezclado en Chile sería de entre 10 y 11 millones de m³. Según las mismas entrevistas, se considera que la mayor parte del hormigón premezclado es producido por las empresas hormigoneras de propiedad de productores de cemento.

3.5 **Emisiones de gases de efecto invernadero de la industria chilena del cemento**

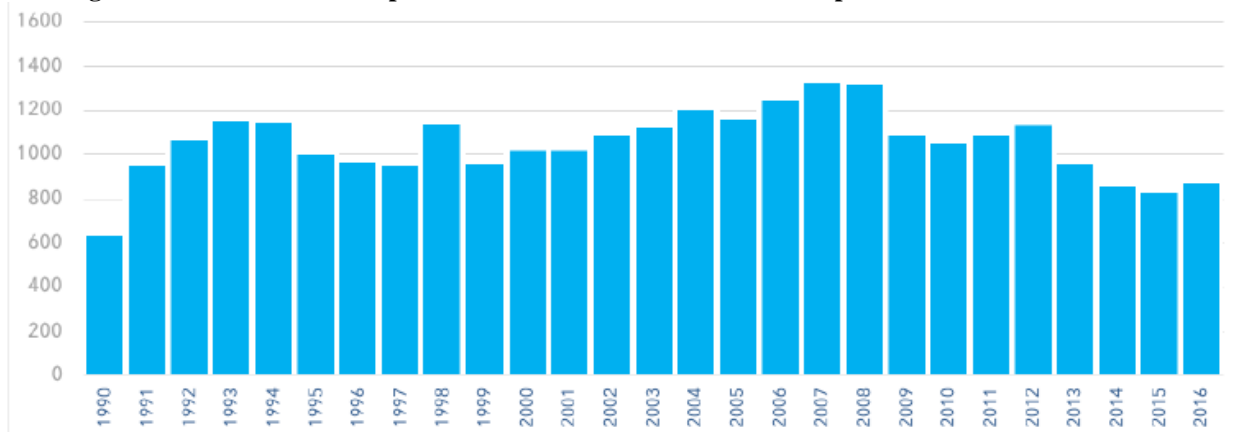
Las emisiones de CO₂ en la industria cementera se originan principalmente en la descarbonatación de la caliza calcinada para la producción del clínker (60% de las emisiones de CO₂) y de la combustión del combustible utilizado para la calcinación de la caliza (40%) (ETZ Zurich, 2018). Las emisiones que resultan de la calcinación de la caliza (emisiones de proceso) son la consecuencia de un proceso químico inherente a la producción, y es muy difícil reducirlas. En cambio, las que provienen del combustible dependen del tipo de combustible y son más factibles de gestionar.

Las emisiones de CO₂ a nivel mundial son clasificadas en tres alcances según su origen. Para la industria cementera la clasificación es la siguiente:

- **Alcance 1:** todas las emisiones de proceso y las que provienen del combustible utilizado para la fabricación del clínker, y todas las emisiones que son emitidas dentro de las instalaciones de la planta cementera.
- **Alcance 2:** Emisiones relacionadas con la energía eléctrica consumida que proviene de la producción de energía externa, y que dependen del tipo de matriz energética de la cual se obtiene dicha energía eléctrica.
- **Alcance 3:** Emisiones relacionadas con el clínker comprado (importado en este caso) (GCCA, 2018).

Según la Hoja de Ruta FICEM-ICH (FICEM-ICH, 2019) las emisiones históricas de CO₂ provenientes de la descarbonatación de materia prima (proceso) en la producción de clínker en Chile son las siguientes:

Figura 4: Emisiones de CO₂ por año en kilo ton relacionadas con la producción de clínker en Chile



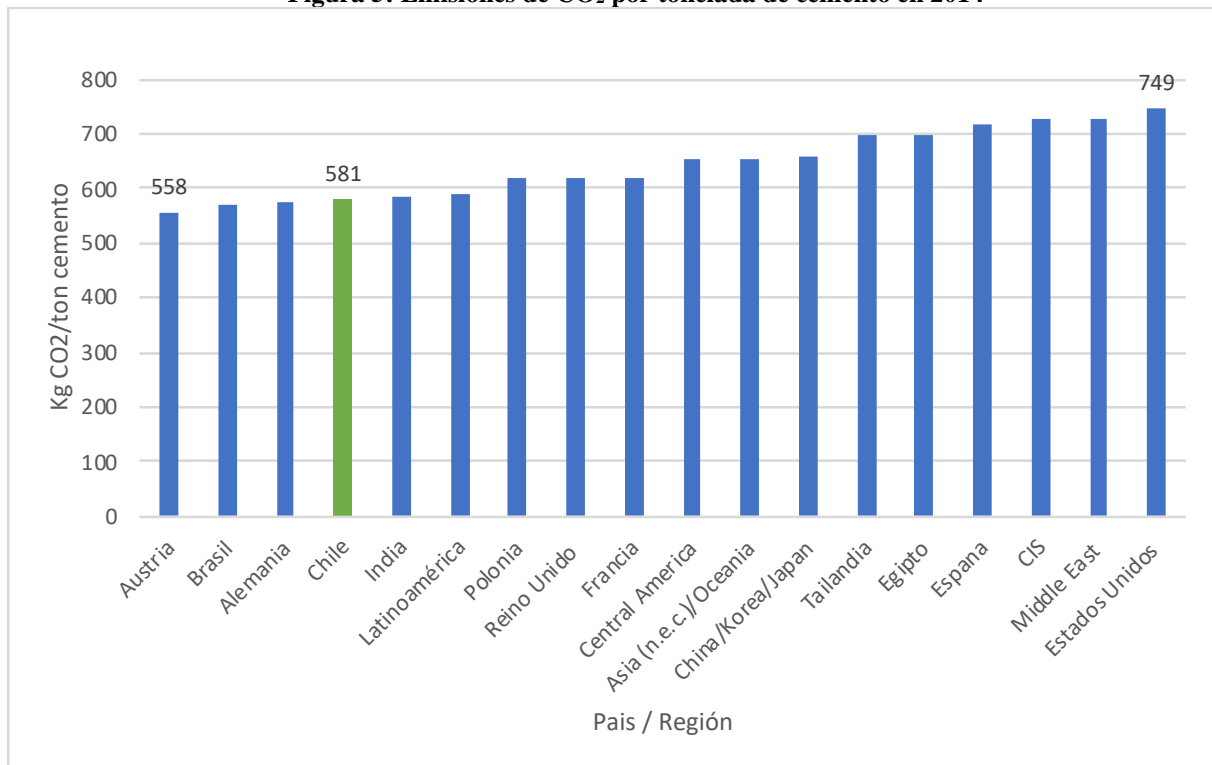
Fuente: (FICEM-ICH, 2019), página 87

Según la Hoja de Ruta de FICEM, las emisiones de CO₂ por tonelada de clínker en el año 2014 para el alcance 1 fueron de 893 kg CO₂ / ton clínker, 6% encima del promedio mundial de 842 kg CO₂/ton clínker según el GNR.

La incidencia del Alcance 2 se encuentra en el orden del 4%, lo que se explica por no incluir el consumo eléctrico de los procesos de molienda de cemento en este indicador.

En cuanto a emisiones de CO₂ por tonelada de cemento, según la Hoja de Ruta de FICEM-ICH las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento en el año 2014 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.

Figura 5: Emisiones de CO₂ por tonelada de cemento en 2014



Fuente: Hoja de Ruta FICEM-ICH, p. 105

4. APALANCAMIENTO PARA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CARBONO Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICAS RELACIONADAS

4.1 Principales ejes para la reducción de las emisiones de CO₂ relacionadas al cemento

Una reducción efectiva de las emisiones de CO₂ implica actuar sobre toda la cadena de valor: cemento, hormigón, y construcción. Este capítulo se enfoca en la producción de cemento y hormigón.

Los siguientes ejes, mencionados tanto en la Hoja de Ruta del CSI como en la de FICEM-ICH, son los más relevantes en términos de efecto sobre las emisiones de CO₂. Esto también aplica en el caso de Chile.

- A nivel del clinker:
 - Uso (coprocesamiento) de combustibles alternativos
 - Eficiencia energética térmica
- A nivel del cemento
 - Reducción del contenido de clinker en el cemento (factor clinker)
 - Eficiencia energética eléctrica
- A nivel del hormigón
 - Reducción del contenido de cemento en el hormigón

La Hoja de Ruta FICEM-ICH recopila el nivel de los datos únicamente hasta el año 2014. Los datos 2017 (únicamente para las plantas integradas⁹) fueron recopilados a base de un cuestionario. La tabla siguiente resume el nivel de avance en torno a los principales ejes, logrados por la industria cementera chilena.

Tabla 4: Indicadores técnicos

	Promedio ponderado	Mínimo	Máximo	
1. Factor clinker <i>2017 solo plantas integradas</i>	67% (2014) 64,8% (2017)	47% (2014) 54,2% (2017)	76% (2014) 67,6% (2017)	%
2. Consumo Térmico	3.700 (2014) 3.550 (2017)	3.359 (2014) 3.120 (2017)	4.478 (2014) 4.089 (2017)	MJ/ton clinker
3. Coprocesamiento	12% (2014) 12,6% (2017)	1% (2014) 0% (2017)	36% (2014) 31% (2017)	%

⁹ Los datos 2014 corresponden a todos los productores (plantas integradas). Los datos de 2017 son únicamente de las plantas integradas.

4. Consumo Eléctrico (todas las plantas)	112 (2014)	49 (2014)	151 (2014)	kWh/ton cemento
Plantas integradas	124 (2014) 101,7 (2017)	100 (2014) 83,6 (2017)	151 (2014) 147 82017)	
Moliendas	58 (2014)	49 (2014)	96 (2014)	

Fuente: Hoja de Ruta FICEM-ICH, p. 122 (año 2014)
Cuestionario empresas cementeras (año 2017)

4.2 Coprocesamiento de combustibles alternativos

La Hoja de Ruta FICEM-ICH prevé una de sustitución por coprocesamiento de 30% al año 2030 (12% en 2014 según hoja de ruta FICEM-ICH y 12,6% en 2017 según datos entregados por las tres empresas cementeras que realizan coprocesamiento). Esto implicaría coprocesar, por ejemplo, unas 148.000 toneladas anuales de combustible derivado de residuos (CDR) o bien una combinación de 111.000 toneladas anuales de CDR y 7.500 toneladas anuales de neumáticos fuera de uso. Según una primera estimación, la inversión requerida para preprocesamiento (producción de combustible alternativo a partir de materiales residuales) a nivel nacional sería de 20 a 25 millones de dólares, que, a través de su coprocesamiento en los hornos de producción de clínker, generarían una reducción del costo de producción de unos 4,2 millones de dólares por año comparado con la situación sin coprocesamiento. 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 2017. Sin embargo, estos resultados no serían posibles sin cambios significativos tanto en los marcos regulatorios como en el modelo de negocio en la cadena de valor de los residuos. La implementación de la Ley 20.920 (conocida como Ley REP¹⁰) aparece como una de las grandes oportunidades para el desarrollo del coprocesamiento en el futuro, principalmente para envases y embalajes (fracción no reciclable) y neumáticos usados.

4.2.1 Descripción

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, el uso de residuos como combustibles y materias primas es un ejemplo de los conceptos anteriores.

El coprocesamiento, de esta forma, tiene el propósito de sustituir combustibles fósiles materias primas vírgenes en la fabricación del cemento mediante la utilización de materiales residuales, ayudando de esta forma a la conservación de los recursos naturales. Según el Convenio de Basilea, esto constituye

¹⁰ Ley Responsabilidad Extendida del Productor (REP): <https://www.leyrep.cl>

una operación “que puede llevar a la recuperación de recursos¹¹, el reciclado, la regeneración, la reutilización directa u otros usos” en las categorías R1 (“utilización como combustible u otros medios de generar energía”) y R5 (“reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas”) de la parte B del anexo IV del Convenio.

El coprocesamiento es definido por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA), a través de la Convención de Basilea, como el “Uso de materiales de desecho adecuados en los procesos de fabricación con el propósito de recuperar energía y recursos y reducir en consecuencia el uso de combustibles y materias primas convencionales mediante su sustitución”¹², y se ha convertido en una de las oportunidades de mayor crecimiento en la última década para enfrentar el desafío de una gestión racional de residuos, principalmente en países en desarrollo.

La disponibilidad de infraestructura adecuada para la gestión de residuos en países latinoamericanos, por ejemplo, es uno de los principales desafíos ambientales que los gobiernos enfrentan en la actualidad. Una cultura basada en la disposición final de residuos en vertederos o rellenos escasamente controlados es todavía la principal vía de eliminación de materiales de desecho. El trabajo de construcción de mecanismos eficientes para avanzar en la jerarquía de gestión de residuos es una tarea permanente, para cuyo éxito se requiere de la existencia de una oferta de gestión de residuos que permita avanzar hacia soluciones sostenibles de valorización, aprovechamiento, reciclaje y reutilización.

Figura 6: Jerarquía gestión de residuos



Fuente: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania (GTZ-Holcim, 2006)

¹¹ De acuerdo con la sentencia del Tribunal Europeo de Justicia del 13 de febrero de 2003 dictada en el caso C-458/00.

¹² Convención de Basilea - Directrices técnicas sobre el co-procesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento – Noviembre 2011

El coprocesamiento ofrece la ventaja de una infraestructura básica ya existente en prácticamente todos los países, como son los hornos cementeros, muchas veces gestionados por compañías que ya cuentan con la experiencia y conocimiento en este tipo de desarrollo gracias a su presencia internacional. Los hornos cementeros están disponibles, y el mayor desafío corresponde entonces a lograr que la cadena de suministro de los materiales, determinada por un adecuado manejo de los residuos desde su generación, transporte, almacenamiento, tratamiento y utilización en los hornos cementeros, cumpla con las condiciones técnico-económicas que hacen de esta actividad un modelo de gestión sostenible para todos los actores involucrados.

Los combustibles fósiles y las materias primas han sido sustituidos satisfactoriamente por residuos en los hornos de cemento de Australia, Canadá, Europa, el Japón y los Estados Unidos de América desde el principio de la década de 1970. Se puede consultar la experiencia de diversos países en el uso de residuos peligrosos y no peligrosos como combustibles y materias primas en hornos de cemento en publicaciones de la Federación Europea de Productores de Cemento (Cembureau) y la Federación Interamericana de Cemento (FICEM), entre otros.

Aunque la práctica varía de unas fábricas a otras, la producción de cemento puede consumir cantidades significativas de residuos como combustibles y materias primas. Este consumo refleja las características del proceso en los hornos de clínker, que aseguran la ruptura completa de las materias primas en los óxidos que las componen y la recombinación de dichos óxidos en los minerales del clínker.

El ejemplo de los países pertenecientes a la Unión Europea es claro en cuanto a la evolución que ha tenido el coprocesamiento, llegando en 2017 (GCCA – GNR) a tasas de sustitución energética que alcanzan niveles superiores al 45% a nivel europeo, con países como Alemania o Austria entre otros, con tasas de utilización de residuos superiores al 70%.

El coprocesamiento de residuos en el proceso productivo del cemento involucra una serie de etapas que van más allá de las operaciones específicas del horno cementero y que implican la aplicación de diversos protocolos de control de calidad y trazabilidad desde la fuente de generación de los residuos:



Etapas 1: Identificación de residuos potencialmente atractivos para el coprocesamiento, los que pueden ser de origen industrial o doméstico clasificado, y se presentan en estado sólido, líquido o pastosos



Etapas 2: Proceso de análisis de factibilidad de coprocesamiento en base a ensayos de laboratorio, transporte hasta instalaciones de pre-procesamiento y control de calidad de ingreso.



Etapla 3: Almacenamiento y preprocesamiento para producir, a partir de los residuos, un “combustible derivado de residuos”, el cual es sometido nuevamente a control de calidad para comprobar su compatibilidad con el proceso.



Etapla 4: Transporte a planta cementera y alimentación al horno durante el proceso de producción del clínker, donde se produce la valorización energética y/o material de los residuos a través de su coprocesamiento.

En principio, los hornos de cemento pueden co-procesar a tasas de hasta un 100%. Sin embargo, existen ciertas limitaciones técnicas, como el valor calorífico y el contenido de elementos secundarios en el combustible como oligoelementos o cloro. El valor calorífico de la mayoría de los materiales orgánicos es comparativamente bajo (10 a 18 GJ / t). Para el proceso térmico en el horno de cemento, generalmente se requiere un valor calorífico promedio de al menos 20 a 22 GJ / t para la mezcla de combustible. En el calcinador de los hornos de cemento modernos, en los que se realiza hasta el 60% del aporte de combustible, la temperatura de proceso más baja también permite el uso de combustibles con bajo contenido calórico. Por lo tanto, los hornos calcinadores pueden co-procesar al menos el 60% de los combustibles (alternativos y / o de biomasa). Un valor calorífico más bajo, así como un alto contenido de cloro (que requiere un sistema de derivación de cloro) aumentará la demanda específica de energía de combustible por tonelada de clínker. Por lo tanto, es posible que, aunque el uso de estos combustibles genere una mayor demanda de energía, sin embargo, las emisiones de CO₂ se reducen.

4.2.2 Mejores prácticas a nivel internacional

De acuerdo con lo establecido en las publicaciones (papers) de la ECRA¹³ 2017, actualizado según los datos de GNR para el año 2017¹⁴, el uso de combustibles alternativos a nivel mundial fue del 17,5% (11,5% correspondiente a combustibles derivados de residuos fósiles y mezclados, y 6% biomasa pura) de la demanda total de energía de combustible para la fabricación de cemento. El 84% restante provenía

¹³ European Cement Research Academy; Cement Sustainability Initiative, Ed. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA-Technology Papers 2017.

Duesseldorf, Geneva, 2017 Disponible en: <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>

¹⁴ Las cifras publicadas por ECRA corresponden al año 2014

de combustibles convencionales, principalmente carbón y petcoke. Las variaciones a nivel mundial en las diferentes regiones son significativas: el 10% de los mejores de su clase (percentil 90) alcanzó una tasa de sustitución de más del 30% para combustibles alternativos sin biomasa y del 17% para la biomasa.

Desde un punto de vista técnico, las tasas de sustitución potenciales pueden ser superiores. Esto se demuestra a partir de las experiencias en algunos países europeos, donde la tasa de sustitución supera promedios del 70% y hasta el 95% como promedio anual para plantas de cemento específicas.

Como las emisiones de CO₂ relacionadas con el combustible son aproximadamente un tercio de las emisiones totales (306 de 842 kg CO₂/t clínker para una planta de referencia), el potencial de reducción de CO₂ puede llegar a ser significativo si se supone el uso de biomasa pura (por su condición de carbono neutralidad¹⁵).

Además de los efectos directos, el uso de residuos como combustible alternativo en hornos de cemento puede contribuir a reducir las emisiones globales de CO₂, reemplazando los combustibles fósiles y sus emisiones de CO₂ relevantes con materiales derivados de residuos que de otro modo tendrían que ser incinerados o dispuestos, con la correspondiente emisión de gases de efecto invernadero.

La utilización de materias primas alternativas que contienen calcio, que ya están carbonatadas, ofrece la oportunidad de reducir las emisiones de CO₂ relacionadas con el proceso derivadas de la descarbonatación de las materias primas, así como las emisiones de CO₂ del combustible requerido para dicha descarbonatación. Tales materias primas a menudo ya se utilizan cuando están disponibles localmente y cuando son adecuadas con respecto a la composición requerida de la harina cruda.

El potencial de reducción de CO₂ de los combustibles alternativos se basa principalmente en dos efectos directos: en primer lugar, muchos combustibles alternativos exhiben un cierto contenido de biomasa (hasta 100% en el caso de residuos agrícolas, por ejemplo) cuyo factor de emisión de CO₂ se considera cero por su condición de carbono neutralidad, sin perjuicio de que igualmente es reportado como “memo-item” por el protocolo CO₂. En segundo lugar, la mayoría de los combustibles alternativos fósiles tienen factores de emisión de CO₂ más bajos que el carbón o petcoke, en relación con su valor calorífico. Además, es fundamental considerar el efecto indirecto de reducción de emisiones si los residuos se usan como combustible alternativo en la producción de clínker, en lugar de ser depositados en vertederos, rellenos sanitarios o incinerados en instalaciones específicas, con las emisiones

¹⁵ Según lo establecido en el protocolo para el CO₂ y Energía en la producción de Cemento (Consejo Mundial Empresarial por el Desarrollo Sostenible – WBCSD por su sigla en inglés – 2011), el CO₂ proveniente de los combustibles de biomasa se considera neutral para el clima (biomasa carbono neutral), ya que las emisiones pueden considerarse compensadas mediante el crecimiento de la biomasa a corto plazo. El CO₂ de los combustibles de biomasa se informa como un “memo-item”, pero se excluye de los totales de emisiones nacionales. El hecho de que la biomasa es realmente neutra para el clima si se cosecha de manera sostenible, se tiene en cuenta en las secciones “Cambio de uso del suelo y silvicultura” de los inventarios nacionales, donde se informan las emisiones de CO₂ debido al agotamiento de los bosques. Si esta convención internacional es eventualmente modificada a la luz de nuevas definiciones, provenientes por ejemplo de los temas abiertos en el contexto del Acuerdo de París, el protocolo de reporte para emisiones de CO₂ en la industria cementera deberá adaptarse consecuentemente.

adicionales correspondientes. Los combustibles alternativos típicos son neumáticos usados, desechos de aceites y solventes, desechos industriales y domésticos clasificados y pretratados, desechos plásticos no reciclables, textiles y de papel no reciclable, etc. Por otra parte, los combustibles 100% biomasa utilizados como combustible en la industria del cemento hoy en día son principalmente desechos de madera, aserrín y lodos del tratamiento de aguas residuales. Los combustibles que contienen biomasa son principalmente desechos industriales y domésticos clasificados y pretratados (que contienen ciertas partes de fibras orgánicas y textiles, papel, etc.).

En principio, también es posible utilizar otros materiales orgánicos como combustibles, como madera natural o ciertos tipos de hierba (por ejemplo, miscanthus), otras especies de crecimiento rápido o algas verdes cultivadas. Estos materiales no son desechos y tienen que ser cosechados especialmente para su uso posterior como combustibles. Hoy esto no es relevante a nivel mundial para la industria del cemento por razones económicas.

4.2.3 La situación en Chile

En Chile actualmente operan 4 plantas integradas de producción de cemento que cuentan con hornos de producción de clínker (Antofagasta, La Calera, TilTil y Curicó-Teno). Una quinta planta (Talcahuano) interrumpió su producción de clínker en 2017.

En las 4 plantas productoras de clínker se utilizan actualmente combustibles alternativos de diversa naturaleza, presentando también diferentes magnitudes en las tasas de sustitución asociadas. Mientras existen plantas orientadas al coprocesamiento de residuos líquidos consistentes principalmente en aceite lubricante usado, existen otras que cuentan con autorización para el coprocesamiento de combustibles alternativos sólidos y líquidos, incluyendo neumáticos usados.

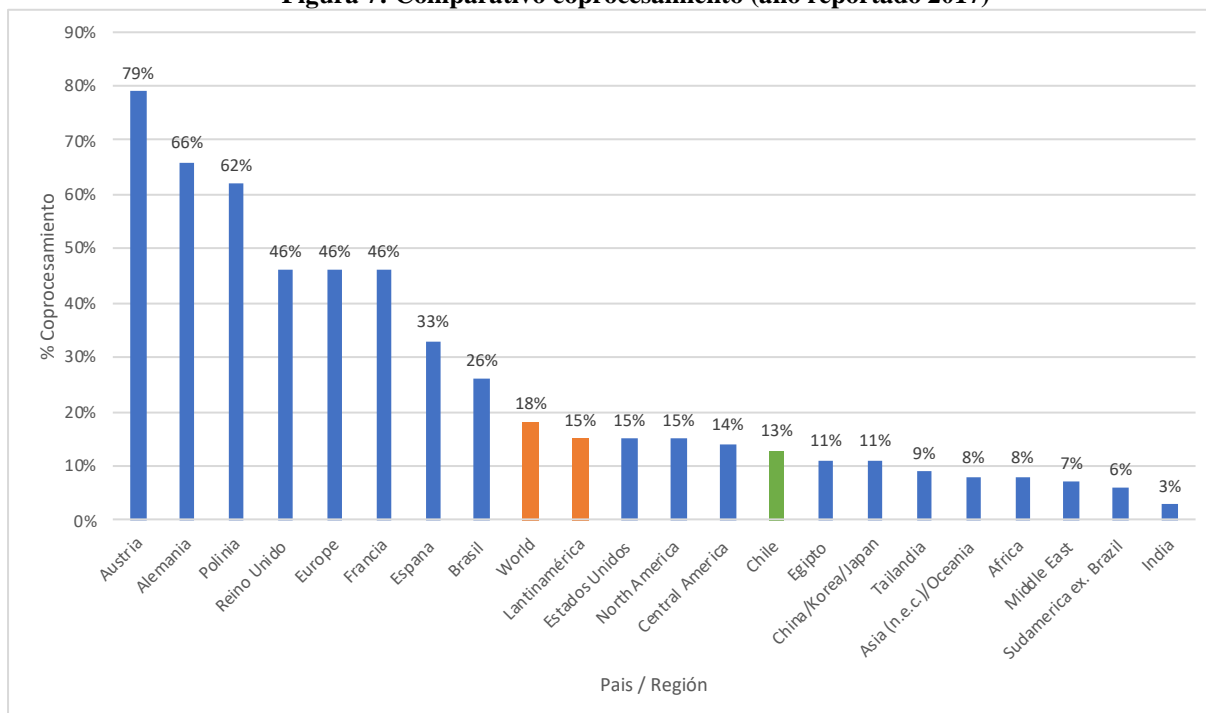
En cuanto a autorizaciones ambientales y sanitarias vigentes, existen dos plantas cementeras con permisos amplios para coprocesamiento, mientras las dos restantes cuentan con permisos limitados a combustibles alternativos líquidos. Actualmente una de estas plantas se encuentra tramitando una nueva resolución de calificación ambiental que ampliará su capacidad de recepción y coprocesamiento de combustibles alternativos, incluyendo líquidos, sólidos, biomasa y neumáticos usados.

En cuanto a capacidad de preprocesamiento (producción de combustible alternativo sólido), en Chile existe capacidad instalada para producción de hasta 70.000 ton/año (Coactiva – Cemento Polpaico)¹⁶. Se estima que en el mediano plazo (2 – 5 años), existirá capacidad adicional disponible, lo que se corrobora por diferentes procesos de evaluación ambiental y anuncios de inversión en este sentido por parte de empresas gestoras de residuos.

¹⁶ Capacidad declarada en resolución de calificación ambiental 564/2003

Según lo establecido en el documento “Hoja de Ruta Chile, Industria del Cemento, Hacia una Economía Baja en Carbono”, publicado por el Instituto del Cemento y el Hormigón (ICH) y la Federación Interamericana del Cemento (FICEM), el promedio de Chile en 2017 (12,6%) estaba por debajo de la media mundial reportada por GNR (18%), contrastando con los países de mejor desempeño que superan ampliamente el 40%, destacándose Austria y Alemania con indicadores de 79% y 66% respectivamente en el año 2017.

Figura 7: Comparativo coprocesamiento (año reportado 2017)



Fuente: GCCA GNR, 2019 (Para Chile, información entregada por empresas locales)

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 2017), mientras que los países más avanzados siguen mostrando avances según lo reportado por GNR para el año 2017, con la Unión Europea por ejemplo presentando una tasa de substitución promedio de un 46,5 %, 6,5 puntos porcentuales por sobre 2014.

Considerando que el 12,6% de coprocesamiento registrado en Chile en 2017 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 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 lo que menciona la hoja de ruta FICEM-ICH, en cuanto a que este eje (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.

4.2.4 Potencial de Mejoramiento

Si se analiza la situación de la industria cementera chilena en torno al co-procesamiento, es posible observar que el 12,0% de sustitución térmica alcanzado al año 2014 (Hoja de Ruta FICEM– ICH), que según los datos obtenidos se mantiene en el mismo orden de magnitud en la actualidad (12,6% en 2017), se basa principalmente en el coprocesamiento de combustibles alternativos elaborados sobre la base de residuos industriales, y un porcentaje menor correspondiente a biomasa y a neumáticos fuera de uso.

Si por otra parte, si se analiza la realidad de Europa actualizada al año 2017, se puede observar que el 46,5% promedio de sustitución térmica por coprocesamiento se divide en 30% correspondiente a combustibles derivados de residuos, y un 16,5% de biomasa. A su vez, ese 30% proveniente de residuos, se compone de un 2,6% aceite usado, 13,1% neumáticos fuera de uso, 47% RDF (Fracción no reciclable de envases y embalajes en general), 7,1% solventes, 2,8% aserrín impregnado, 20,8% residuos industriales y 6,6% otros residuos no clasificados (GCCA – GNR).

Considerando esta distribución como representativa, en promedio, para la industria cementera en el mundo, es posible concluir que la fracción de residuos de origen industrial ya se encuentra bastante desarrollada en Chile, identificándose el mayor potencial de crecimiento probablemente en el coprocesamiento de RDF (Conocido en Español como Combustible Derivado de Residuos – CDR) proveniente de la fracción no reciclable de envases y embalajes, y a neumáticos fuera de uso, que son precisamente residuos regulados por la Ley 20.920, que contempla la valorización energética como opción de gestión. Cabe destacar que esta posibilidad de valorización energética ya se encuentra establecida en la propuesta de metas para el caso de los neumáticos fuera de uso, mientras que para la fracción no reciclable de envases y embalajes esto no ha sucedido.

Ejemplo: El caso de los combustibles derivados de residuos provenientes de la fracción no reciclable de los envases y embalajes:

Considerando el 30% de tasa de coprocesamiento comprometida por la industria cementera a nivel nacional para 2030 en su Hoja de Ruta, es posible hacer un simple cálculo, basado en la información de producción y consumo energético publicada por la industria en dicha hoja de ruta (estimación propia):

Producción de clínker industria cementera chilena:	2.000.000 ton/año
Consumo térmico:	3.700 MJ/ton
Energía térmica demandada:	7.400.000.000 MJ
30% comprometido:	2.220.000.000 MJ
Poder calorífico CDR:	15.000 MJ/ton
Volumen CDR para 30% coprocesamiento:	148.000 ton/año

Es decir, existe un potencial máximo, declarado y comprometido por la industria cementera, de hasta 148.000 toneladas de la fracción no reciclable de envases y embalajes que podrían valorizarse energéticamente como combustible derivado de residuos en hornos cementeros.

Por otra parte, considerando las metas establecidas a 2030 en el anteproyecto de metas de la Ley 20.920, para las subcategorías de envases y embalajes correspondientes a cartón para bebidas, papeles, cartones y plásticos, se tienen los siguientes volúmenes que requerirán de una gestión de valorización (Ministerio de Medio Ambiente, Ley 20.920, AGIES Envases y Embalajes):

Domiciliarios: 538.464 ton/año

No Domiciliarios: 330.474 ton/año

Total: 868.938 ton/año

La experiencia internacional indica que durante las operaciones de clasificación para reciclaje se obtiene un rechazo, correspondiente a material no reciclable (por suciedad, deficiente segregación, composición, etc.), a tasas que fluctúan entre los 20% y 30% en países desarrollados como Alemania, por ejemplo. Asumiendo de forma conservadora una tasa de rechazo de un 25% (se estima que en Chile las tasas de rechazo serán mayores, al menos durante los primeros años), se obtiene un volumen de 217.235 toneladas anuales de material no reciclable que deberá ser gestionado al año 2030.

Considerando las definiciones y criterios establecidos en el anteproyecto publicado, esas 217.235 toneladas anuales no tendrían ningún incentivo de ser valorizadas, siendo la valorización energética por coprocesamiento una opción disponible. Por el contrario, este volumen tendría que irremediablemente destinarse a relleno sanitario, con lo que se estaría obviando la etapa de valorización energética establecida en la Jerarquía para la Gestión de Residuos que el Ministerio de Medio Ambiente presenta como estrategia en torno a la Ley 20.920.

En otras palabras, y considerando el potencial de coprocesamiento declarado por la industria cementera, existe la oportunidad de valorizar, al menos, el 68% del material de rechazo resultante de las operaciones de Clasificación en el futuro ecosistema REP chileno.

La inversión total en pre-procesamiento para lograr la producción de 148.000 toneladas anuales de combustible derivado de residuos, se estima en el rango 20 – 25 millones de USD (sobre la base de los niveles de inversión oficialmente declarados en el contexto del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) por las empresas que ya han ejecutado proyectos), mientras que la inversión en la habilitación de instalaciones de recepción, almacenamiento y alimentación a los hornos estarían en niveles de 3 a 5 millones de USD por horno. No se consideran otros tipos de inversiones en los hornos, ya que la práctica internacional para hornos similares a los disponibles en Chile indica que es factible lograr tasas de sustitución del 30% optimizando las rutinas operacionales de los hornos, y por sobre todo, logrando una calidad homogénea en los combustibles derivados de residuos que permitan optimizar su utilización en los diferentes puntos de alimentación al horno (Quemador principal, calcinador y/o entrada del horno). Sin perjuicio de lo anterior, es recomendable una evaluación técnica detallada de cada horno, para estudiar su real potencial y optimizar el tipo de combustible alternativo y puntos de inyección. En esta evaluación podrán surgir necesidades de inversión que deberán ser evaluadas en su mérito. Ejemplos de estas eventuales inversiones son el reemplazo del ventilador principal del horno (para asegurar mayor flujo de aire), ampliación de ductos por ejemplo en la entrada del horno o modificaciones menores en el calcinador, entre otros.

Como se indicó anteriormente, las inversiones necesarias para lograr la meta del 30% de sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos se ha separado en dos etapas claramente identificables. Aquella correspondiente a infraestructura de recepción, almacenamiento, transporte y alimentación de los combustibles alternativos a los hornos (inversiones coprocesamiento); y aquellas necesarias para producir ese combustible alternativo, o combustible derivado de residuos, a partir de residuos industriales o urbanos previamente clasificados (inversiones preprocesamiento).

La experiencia internacional muestra que las empresas cementeras adoptan diferentes modelos de negocio en cuanto a coprocesamiento, existiendo aquellas que se integran verticalmente e invierten (y operan) en infraestructura de preprocesamiento, como es el modelo instaurado internacionalmente por el Grupo Holcim por ejemplo, y también aquellas que optan por concentrar sus esfuerzos en la etapa de coprocesamiento, dejando al mercado de gestión de residuos que desarrolle la capacidad de producción de combustible alternativo.

En el caso de Chile, de las 3 empresas que cuentan con hornos aptos para el coprocesamiento, una ha optado por la integración vertical (Polpaico mediante su área de negocio para coprocesamiento Coactiva), contando en la actualidad con capacidad suficiente de preprocesamiento para lograr el 30% de sustitución. Otra de las empresas ha optado por el modelo de recepción de combustible preparado por terceros (Cemento Melón), forma en la cual ha operado hasta el momento. Incluso se han publicitado alianzas y acuerdos comerciales con empresas gestoras de residuos para la futura provisión de CDR. La tercera empresa (Cementos Bio Bio), actualmente en etapa de obtención de permisos, también ha declarado optar por el modelo de provisión de CDR desde terceros.

Este escenario implica que la industria de la gestión de residuos tendrá demanda por CDR en el futuro, estimándose en 20 a 25 millones de USD la inversión necesaria para completar una oferta de hasta 150.000 ton anuales de CDR. En la actualidad es posible observar proyectos de inversión en este sentido, como los declarados y anunciados por empresas como Recycling y Disal, por lo que se prevé que esa oferta de CDR avance en paralelo con la habilitación de los hornos, y no tenga que esperar a la implementación de la capacidad de coprocesamiento. Se espera que ambas capacidades se desarrollen en coordinación, en base a acuerdos comerciales previos.

Para la materialización y sostenibilidad de estas inversiones es fundamental que algunas barreras de tipo regulatorio puedan gestionarse de forma eficiente, permitiendo direccionar ciertos tipos de residuos (no reciclables) a esta alternativa de valorización. Acuerdos de cooperación público-privada (tipo APL) y el acceso a fondos concursables han demostrado ser muy útiles y eficientes para las etapas tempranas de implementación del coprocesamiento, principalmente para la implementación de proyectos piloto y demostrativos.

En cuanto al supuesto de costo cero del CDR para las empresas cementeras, éste se basa en la experiencia internacional actual, en la que se puede observar un precio de transferencia marginalmente positivo o negativo, dependiendo de la calidad del CDR. Se ha asumido un promedio en base al cual la producción de CDR se financia en base a una lógica de servicio de gestión de residuos, mientras que la empresa cementera financia su actividad de coprocesamiento en base a la sustitución de combustibles fósiles.

En términos de ahorro en costos de producción por reemplazo de combustibles fósiles, considerando los niveles actuales de costo del petcoke en Chile (80 - 90 USD/tonelada), y asumiendo un combustible

derivado de residuos accesible a costo cero en las plantas cementeras¹⁷, el ahorro total en la industria, al 30% de sustitución promedio, sería de poco más de 4,2 millones de dólares anualmente.

En el caso de los neumáticos fuera de uso, el ejercicio es similar, existiendo un importante potencial que demuestra que tanto la tecnología como los residuos para coprocesamiento están disponibles en el mercado nacional, permitiendo proyectar tasas de coprocesamiento en el orden del 30% (o superiores) hacia el año 2030, lo que resulta coherente con lo establecido en la Hoja de Ruta propuesta por la Industria.

Es probable que la evolución natural de la actividad de coprocesamiento mantenga una porción, equivalente a la actual, de combustibles alternativos elaborados sobre la base de residuos industriales, mientras que el aumento en el consumo futuro se basará en el coprocesamiento de CDR elaborado sobre la base de la fracción no reciclable de envases y embalajes principalmente, complementado con combustibles derivados de neumáticos fuera de uso. La simulación bajo estos supuestos permite proyectar, para un escenario de sustitución de un 30%, el coprocesamiento de unas 62.000 toneladas anuales de CDR y unas 10.000 toneladas anuales de neumáticos fuera de uso, adicionales al volumen actualmente coprocesado.

En términos de emisiones de CO₂, la hoja de ruta FICEM – ICH estima una reducción neta de 31 kg de CO₂ por tonelada de cemento respecto de la situación 2014, en el caso en que se cumpla la meta de utilización de combustibles alternativos al 30% de sustitución promedio a nivel nacional. La estimación realizada durante el desarrollo de este trabajo muestra un potencial de disminución bruta de 11 kg CO₂/ton clinker, y un potencial de disminución neta de 59,3 kg CO₂/ton clinker, tomando como base la situación al 2017.

Para una producción de 2 millones de toneladas de clinker por año, a una tasa de coprocesamiento del 30% (22,5% CDR y 7,5% neumáticos), la disminución total de emisiones esperada por efectos del coprocesamiento sería:

- 21.200 ton CO₂/año (Brutas)
- 118.600 ton CO₂/año (Netas)

¹⁷ Se asume que la industria de la gestión de residuos, en base a una tarifa de servicio a generadores y/o sistemas de gestión REP, es capaz de gestionar y procesar los residuos para convertirlos en CDR, y estar en condiciones de entregarlos a costo 0 a las empresas cementeras. Este supuesto se basa en la experiencia internacional en la materia.

4.2.5 Las barreras existentes o potenciales

Las principales barreras para el crecimiento del coprocesamiento en Chile se identifican a continuación:

- **Regulatorias – Coprocesamiento:** Si bien Chile fue el país impulsor de los lineamientos técnicos para el coprocesamiento adoptados por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a través de la Convención de Basilea en 2011, aún es posible observar desconocimiento sobre la tecnología por parte del sector público, lo que implica por largos y complejos procesos de obtención de permisos para el coprocesamiento.
- **Regulatorios – Gestión de Residuos:** Chile está avanzando rápido en la regulación para la gestión general de residuos, siendo la Ley 20.920 (Ley marco para la gestión de residuos, fomento al reciclaje y responsabilidad extendida del productor), conocida como Ley REP, un ejemplo hormigón que contempla entre sus principios la posibilidad de valorización energética. Sin embargo, esta posibilidad hasta la fecha solamente se ha oficializado para neumáticos fuera de uso, y no para la fracción no reciclable de envases y embalajes, que corresponde a una de las principales oportunidades de crecimiento para el coprocesamiento en el futuro.
- **Comunidades – ONGs:** Existen movimientos sociales y ambientalistas que manifiestan preocupación y aprehensiones en torno al coprocesamiento, principalmente en torno a los potenciales impactos en emisiones a la atmósfera, confundiendo el coprocesamiento con otros tratamientos térmicos como la incineración. Los desafíos de relación con estos grupos de interés son permanentes y de gestión compleja, por ser eminentemente fundamentalistas.
- **Técnicos:** En general, las compañías cementeras chilenas no cuentan en la actualidad con experiencia y conocimientos que permitan enfrentar los desafíos técnicos y estratégicos para un desarrollo sostenible del coprocesamiento hasta los niveles comprometidos (30% sustitución en promedio). Se identifica la necesidad de desarrollar un rápido aprendizaje en torno a aspectos operacionales, de calidad, salud y seguridad asociados al coprocesamiento. En el pasado (década del 2000 principalmente) el respaldo y soporte de empresas internacionales a las cuales pertenecían dos compañías chilenas, favorecieron la transferencia de conocimientos y experiencia que permitieron el desarrollo del coprocesamiento a los niveles que se observan en la actualidad, pero que luego de la pérdida de esa relación (venta de empresas a grupos económicos locales), se ha mantenido ya por algunos años sin crecimiento relevante (entre 2014 y 2017 por ejemplo, la tasa de sustitución por coprocesamiento a nivel nacional subió de 12,0 a 12,6 % solamente) Se hace necesario entonces implementar acciones concretas de capacitación, tanto desde la perspectiva del desarrollo de modelos de negocio eficientes, como de los desafíos técnicos y operacionales involucrados en el coprocesamiento.

4.2.6 Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera

Las soluciones o buenas prácticas internacionales en torno al coprocesamiento se plantean para las dimensiones regulatorias, operacionales, y de relaciones con grupos de interés.

Aspectos Regulatorios:

Sin lugar a dudas, el desarrollo regulatorio en torno a la gestión de residuos y su valorización, y al coprocesamiento propiamente tal, tiene su principal referencia en la Unión Europea.

En cuanto a gestión de residuos, destaca la “**DIRECTIVA 2018/850**”, del 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos (European Union, 2018)¹⁸. Esta nueva Directiva tiene entre sus objetivos apoyar la transición de la Unión Europea hacia una economía circular, garantizando una reducción progresiva del depósito de residuos en vertederos, en particular de los aptos para el reciclado u otro tipo de valorización.

Uno de los aspectos más destacados de la Directiva es la obligación que plantea a los Estados miembros para que se adopten las medidas necesarias que garanticen que para 2035 la cantidad de residuos municipales depositados en vertederos se reduzca al 10 %, o a un porcentaje inferior, de la cantidad total de residuos municipales generados.

En este sentido, se modifica el artículo 5 de la Directiva 1999/31/CE, destacando el papel del reciclado y la valorización frente al depósito en vertedero de los residuos municipales.

“3 bis. Los Estados miembros se esforzarán por garantizar que, a partir de 2030, todos los residuos aptos para el reciclado u otro tipo de valorización, en particular los residuos municipales, no sean admitidos en vertederos, con excepción de los residuos para los cuales el depósito en un vertedero proporcione el mejor resultado medioambiental, de conformidad con el artículo 4 de la Directiva 2008/98/CE”.

Por otra parte, la “**DIRECTIVA 2018/851**” también del 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos señala que mejorar la eficiencia del uso de los recursos y asegurarse de que los residuos se valoricen como recursos puede contribuir a reducir la dependencia de la Unión Europea de las importaciones de materias primas y facilitar la transición a un modelo de economía circular. La principal novedad de la Directiva en lo que a la valorización de residuos se refiere, es que recoge por primera vez en la legislación comunitaria una mención expresa al “coprocesamiento”, es decir al doble aprovechamiento material y energético que se produce durante su valorización en hornos cementeros.

Convenios internacionales:

La Convención de Basilea, que regula el transporte transfronterizo de residuos peligrosos y su eliminación, adoptó, en Octubre de 2011 (Conferencia de las Partes 10), los “Lineamientos Técnicos para el Coprocesamiento de residuos peligrosos en hornos cementeros”, documento técnico mediante el cual el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reconoce y recomienda el coprocesamiento como una tecnología adecuada para una gestión sostenible de residuos.

La misma Convención de Basilea se encuentra actualmente actualizando los alcances y definiciones específicas del Convenio, en particular su Anexo IV en el cual se identifican las tecnologías y alternativas de valorización. En particular, para las “Operaciones que pueden conducir a la recuperación de recursos, el reciclado, la regeneración, la reutilización y otros usos” que se listan en el apartado B del Anexo IV, se ha propuesto incluir en una categoría específica (R15) al coprocesamiento, lo que ha sido ratificado por el panel de expertos del Convenio, en reunión sostenida en Noviembre de 2019 en Bratislava (Expert Working Group on the review of Annexes Third meeting, Bratislava, 5–8 Noviembre 2019).

¹⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0850>

Desarrollo Co-procesamiento

En cuanto a desarrollo del coprocesamiento, la experiencia internacional de referencia es también la europea, donde en la actualidad es posible observar tasas de sustitución promedio que se acercan al 50%. Un caso particular, muy interesante para el desarrollo del coprocesamiento en Chile, es el español, que corresponde al país europeo más asimilable a la realidad chilena. Según datos publicados por la Fundación CEMA¹⁹ en su sitio web, la industria cementera española ha crecido, desde el año 2009 hasta el 2017 (8 años de evolución), desde un 11,2% hasta un 26,6% de sustitución térmica por coprocesamiento en sus hornos cementeros. Esta evolución demuestra que, en la medida que los marcos regulatorios favorezcan la evolución de esta tecnología, es factible aumentar las tasas de coprocesamiento como se lo ha propuesto la industria cementera chilena en su hoja de ruta FICEM-ICH publicada en abril de 2019.

Cabe mencionar en este punto que España además se ha consolidado como la principal referencia para el desarrollo de la normativa referida a la responsabilidad extendida del productor (Ley REP) en Chile, en particular para la regulación de envases y embalajes. La evolución en el cumplimiento de metas en torno a este tipo de normativas está directamente relacionada con el crecimiento en coprocesamiento, lo que se evidencia además en distintos países de la Unión Europea.

4.2.7 Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras

a. *Capacitación a la autoridad sanitaria y ambiental en conceptos clave del coprocesamiento*

La autoridad sanitaria y ambiental, que tiene la responsabilidad de liderar los procesos regulatorios y además de otorgar los permisos de operación para instalaciones de valorización de residuos, requiere de una capacitación permanente, en particular en aspectos relativos al coprocesamiento.

En este sentido, se considera de vital importancia 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, por ejemplo, en el marco de un **Acuerdo de Producción Limpia**, que tenga como objetivo principal el facilitar las condiciones para un desarrollo armónico del coprocesamiento, tanto desde la responsabilidad de las empresas como del compromiso del sector público involucrado.

¹⁹ <https://www.fundacioncema.org/quienes-somos/>

- b. *Trabajo conjunto Autoridad – Industria, para el reconocimiento del coprocesamiento a nivel nacional, como un eje para la gestión sostenible de residuos y para la disminución, por parte de la Industria Cementera, de emisiones de CO₂*

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 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 / lineamiento tales como:

- Ley 20.920: Como se desarrolla en el punto siguiente, el reconocimiento del coprocesamiento como alternativa de valorización para la fracción no reciclable de envases y embalajes, en el contexto de la Ley REP, se considera clave.
- Actualización DS 148 (Reglamento Manejo Sanitario Residuos Peligrosos): El reglamento que regula los residuos peligrosos en Chile se encuentra en etapa de actualización. Resulta muy recomendable la inclusión explícita del coprocesamiento como alternativa de gestión / valorización de los residuos peligrosos compatible, asunto que no se incluye en la versión original de este reglamento (2003).
- Actualización DS 29 “Norma de Emisión para la Incineración, Coincineración y Coprocesamiento”: La actualización de las normas de emisión corresponde a un ejercicio que se realiza cada 5 años. Si bien el DS29 ya regula explícitamente al coprocesamiento, se recomienda su revisión y actualización de forma de considerar la experiencia acumulada en Chile, y los avances normativos de países de referencia (principalmente la Unión Europea).
- Guías para evaluación ambiental de proyectos en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) : Existiendo instrumentos regulatorios como el DS29 que regula las emisiones a la atmósfera del coprocesamiento, y referencia internacional como por ejemplo las guías técnicas sobre coprocesamiento de la Convención de Basilea, resulta recomendable contar, a nivel nacional, de guías específicas para la evaluación ambiental de proyectos de coprocesamiento en el marco del SEIA, que faciliten y hagan más expedita y objetiva dicha evaluación.

De esta forma podrían alcanzarse los acuerdos público-privados en un marco de confianza y cooperación, que es precisamente lo que promueve la figura de los acuerdos de producción limpia (APL) coordinados por la Agencia de Sostenibilidad y Cambio Climático dependiente del Ministerio de Economía.

Desde una perspectiva más integral, es posible imaginar que el compromiso de la industria plasmado en su hoja de ruta sea la base de un acuerdo de producción limpia, no limitándose solamente al coprocesamiento, sino que abarcando todos los aspectos plasmados en dicha hoja de ruta.

- c. *Consideración explícita del coprocesamiento en hornos cementeros, como alternativa de valorización de la fracción no reciclable de envases y embalajes, en el contexto de las Ley 20.920, en particular en el decreto supremo que fija las metas de valorización para envases y embalajes.*

Como se ha explicado anteriormente, el coprocesamiento en Chile ofrece un potencial no despreciable para la valorización energética de la fracción no reciclable de envases y embalajes, el que puede ser alcanzable en la medida que esta alternativa de valorización sea explícitamente considerada en la definición de metas que establecerá el decreto supremo respectivo, tal como se ha hecho para el producto prioritario neumáticos fuera de uso.

La cooperación activa y proactiva por parte de la industria cementera se identifica como fundamental en el corto plazo, ya que el mencionado decreto supremo se encuentra próximo a ser publicado en su versión actualizada luego del proceso de consulta pública liderado por el Ministerio de Medio Ambiente. El contacto permanente con la Oficina de Economía Circular del Ministerio de Medio Ambiente permitirá transmitir los conceptos técnicos y la referencia internacional que avalan esta propuesta, como la ya mencionada para el caso de España y, en general, los países de la Unión Europea, donde se observa una clara correlación entre el desarrollo de normativa orientada a la valorización de residuos y el aumento sostenido en las tasas de coprocesamiento alcanzadas en dichos países.

- d. *Socialización del coprocesamiento en comunidades aledañas a las plantas cementeras, en base a proyectos de valor compartido con la misma comunidad y municipios correspondientes.*

La gestión de residuos es, en general, uno de los aspectos más sensibles de la gestión municipal en comunidades aledañas a las plantas cementeras. En este contexto, el coprocesamiento ofrece la oportunidad de diseñar e implementar proyectos bajo el concepto de “Creación de Valor Compartido”.

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. Este objetivo principal puede explicarse a través de algunos objetivos específicos como:

- Lograr “sintonía” con el municipio y comunidad para aclarar eventuales cuestionamientos en torno al coprocesamiento. Dichos cuestionamientos podrán provenir de diferentes actores públicos y privados, dentro de los cuales destacan:
 - Concejo Municipal (muchas veces influenciado por intereses políticos)
 - ONGs locales
 - Organizaciones comunitarias (urbanas y rurales)
- Lograr alianzas de mediano-largo plazo entre la empresa y el municipio/comunidad, que trasciendan al ciclo político electoral, sentando las bases para facilitar gestión de éste y otros proyectos en el futuro.
- Colaborar con la modernización de la gestión municipal de residuos sólidos urbanos, adaptándose a los nuevos marcos regulatorios existentes, y promoviendo una gestión ambiental eficiente y de vanguardia, con conceptos que están absolutamente alineados con las actuales tendencias en la materia.

En este contexto, la Oferta de Valor de un proyecto que tenga como eje principal de acción la gestión de residuos se basa en la obtención, entre otros, de los siguientes resultados que generan valor a la gestión municipal:

- Posibilidad de optar a fondos públicos para la implementación de proyectos específicos (Fondo para el Reciclaje de la Ley 20.920, Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR)²⁰ u otros)
- Educación y capacitación de la comunidad en torno a la gestión de sus residuos
- Implementación del concepto de separación en origen y recolección selectiva a nivel municipal.
- Generación de oportunidades de negocio y empleos específicos que requerirá la futura cadena de valor de los residuos.
- Valorización de residuos, mediante el fortalecimiento de capacidades locales
- Reconocimiento y formalización de recicladores de base locales
- Desarrollo de un modelo de gestión municipal con valor agregado

Todos los posibles resultados detallados en los puntos anteriores permitirán al municipio (y comunidad) estar absolutamente en línea con la Ley 20.920 sobre Fomento al Reciclaje y Responsabilidad Extendida del Productor.

Un proyecto de este tipo consistiría en una serie de acciones tendientes a la modernización y adaptación al nuevo marco regulatorio de la gestión de residuos. Lo anterior implica el diseño y desarrollo de los siguientes componentes del proyecto:

- Sistema de Separación en Origen: Consiste en el diseño e implementación de conceptos de separación en origen, es decir al interior de los hogares, de diferentes corrientes de residuos, separando aquellos con potencial de valorización de aquellos que seguirán teniendo como destino el relleno sanitario. Este diseño debe contemplar la selección de las corrientes a separar, incluyendo aspectos prácticos como contenedores, bolsas, etc
- Sistema de Recolección Selectiva: Consiste en la definición logística y de equipamiento (camiones, por ejemplo) que permita una recolección eficiente de las corrientes separadas en origen, sin incurrir en mayores costos de gestión por parte del Municipio. Es fundamental en esta etapa la definición sectores, rutas, frecuencias y de equipos móviles (camiones).
- Sistemas de Clasificación: Los materiales separados en origen y recolectados en forma selectiva requerirán de una instalación donde puedan ser finalmente clasificados según tipo de material valorizable (papeles, cartones, plásticos de diferentes tipos, latas, aluminio, etc.). Las características y principales aspectos de diseño de dicha instalación son definiciones fundamentales para una operación eficiente.

²⁰ <http://www.subdere.gov.cl/programas/división-desarrollo-regional/fondo-nacional-de-desarrollo-regional-fndr>

- Valorización de Residuos: Los materiales ya clasificados tendrán la oportunidad de ser valorizados en la medida que existan los contactos comerciales, la logística y la formalización de las diferentes actividades involucradas en dicha gestión.

La materialización de las componentes de un proyecto de estas características requerirá del desarrollo de actividades tendientes a la educación y capacitación de la población, así como de programas de formalización y certificación para las actividades a ser desarrolladas por recicladores de base:

- Promoción y Educación: Corresponde a un programa de sensibilización de la población que tendrá como objetivo entender e incentivar las actividades de separación en origen. Para esto es necesario el desarrollo de una serie de herramientas comunicacionales, de sensibilización y educación, incluyendo material educativo, redes sociales, eventos, etc. El diseño e implementación del concepto de “puntos limpios” en lugares públicos como escuelas, municipio, centros comunitarios, etc, podrá ser un elemento a desarrollar en el ámbito de la educación comunitaria.
- Recicladores de Base: Los denominados Recicladores o Recolectores de Base, que corresponden a personas que desarrollan en forma permanente actividades de recolección de materiales valorizables, son considerados actores relevantes por la Ley 20.920, la que establece que deberán formalizarse, registrarse y certificarse, para así consolidarse en la implementación de la Ley. Un programa de acompañamiento en la organización, formalización y futura certificación de los recolectores de base se convierte de esta forma en un elemento muy atractivo a ser considerado en el diseño del proyecto de Valor Compartido.

El diseño e implementación de proyectos de colaboración con la comunidad local, como el descrito anteriormente, permitirán consolidar relaciones de confianza con este importante grupo de interés, al mismo tiempo que se favorece un mejoramiento en la gestión local de residuos que permitirá además contar con otra alternativa de provisión de combustible derivado de residuos.

Se recomienda proponer un proyecto de este tipo al municipio correspondiente, donde la empresa cementera puede jugar un rol protagónico en la etapa de diseño conceptual del proyecto y en el acompañamiento al municipio durante el proceso de postulación a fondos concursables para la implementación (Fondo para el Reciclaje en el contexto de la Ley 20.920, o fondos FDNR), para posteriormente acompañar en su implementación.

Es importante precisar que proyectos de estas características (pilotos para separación en Origen, recolección selectiva y clasificación, no se plantean específicamente para el coprocesamiento, sino que corresponden a la implementación integral de un Sistema de gestión de residuos basado en la Ley REP. Por lo tanto, las inversiones necesarias no son asignables al coprocesamiento. La propuesta es colaborar con los municipios en el diseño y articulación de estos sistemas. El coprocesamiento corresponde a una de las alternativas en el último eslabón de la cadena, que es la valorización. Aquellos materiales que resulten no reciclables luego de la separación en origen, recolección selectiva y clasificación, deberán tratarse para convertirlos en combustibles derivados de residuos (CDR). Es en esta última etapa, la de producción del CDR donde se concentra la inversión adicional asignable a la iniciativa de coprocesamiento, y corresponde a la etapa de “preprocesamiento” que no necesariamente será asumida por la industria cementera, ya que puede ser desarrollada por la industria de gestión de residuos.

e. *Capacitación Industria cementera nacional en aspectos clave del coprocesamiento (técnicos, de mercado, control de calidad, relaciones con grupos de interés)*

Como se ha mencionado anteriormente, la industria cementera chilena carece en la actualidad de un respaldo internacional para la implementación del coprocesamiento, que sí existió en el pasado para algunas empresas que pertenecieron a grupos internacionales con experiencia y capacidad técnica específica.

Considerando lo anterior, se hace absolutamente necesario que la industria cementera nacional se prepare para los desafíos que el desarrollo del coprocesamiento implica, tanto desde el punto de vista técnico/operacional como de desarrollo de negocios. La experiencia internacional muestra que, para tasas de sustitución crecientes, el coprocesamiento impone desafíos operacionales relevantes, que es necesario saber entender y gestionar de forma eficiente. Aspectos de calidad del clínker y pérdidas de producción son factibles de neutralizar con una operación eficiente y un buen entendimiento de los aspectos relativos al control de calidad de los combustibles derivados de residuos y del proceso de producción.

En cuanto al desarrollo del negocio del coprocesamiento propiamente tal, también es importante conocer y dominar aspectos del mercado de la gestión de residuos, para así seleccionar el modelo de negocios adecuado en cada caso.

Las consideraciones anteriores hacen recomendable la implementación 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.

Un programa de capacitación integral deberá abordar los siguientes temas:

- Gestión de Residuos (generalidades)
- Producción de Clínker y Cemento – Desafíos para la sostenibilidad.
- El Coprocesamiento como oportunidad de gestión para la sostenibilidad en la Industria Cementera.
- Marcos regulatorios para el Coprocesamiento
- Condiciones (técnicas) de borde para el coprocesamiento. Limitantes técnicas, químicas ambientales y operacionales a considerar
- Aspectos del mercado de los residuos, identificación y calificación de materiales aptos para el coprocesamiento
- Procesos de recepción y aceptación de residuos
- De residuos a combustibles derivados de residuos. Elementos para un preprocesamiento eficiente
- Coprocesamiento. Infraestructura y procedimientos operacionales
- Control de calidad a través de la cadena de valor. Técnicas, métodos analíticos y trazabilidad
- Modelos de negocio para el coprocesamiento

f. Involucramiento proactivo con Sistemas Integrados de Gestión 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 ya se comienzan a delinear.

En particular, la coordinación y búsqueda de sinergias con los SIGs dedicados a los productos prioritarios 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.

Se observa que la industria ya ha establecido contactos y conversaciones incipientes con futuros sistemas de gestión REP en el campo de los neumáticos fuera de uso, mientras que las gestiones en torno a envases y embalajes aún no comienzan. Este grado de avance en las gestiones es concordante con el grado de madurez de dichos sistemas de gestión, los que recién se encuentran en etapa de formación. Se considera recomendable establecer contactos tempranos con los sistemas de gestión REP que ya comienzan a delinearse para el caso de envases y embalajes, en particular a aquellos impulsados por la Asociación de Alimentos y Bebidas (AB) para el caso de domiciliarios y el Hub Sofofa en colaboración con las empresas Rigk (Alemania) y Valipac (Bélgica) para el caso de los no domiciliarios

4.2.8 Nivel de esfuerzo para superar las barreras

El nivel de esfuerzo necesario para abordar las barreras identificadas para el eje “coprocesamiento”, radica principalmente en la capacidad de la industria cementera para el diseño y articulación de iniciativas de cooperación público-privada en torno al desarrollo del coprocesamiento. En este ámbito se identifica como una potencial herramienta la figura de un Acuerdo de Producción Limpia (APL), a ser propuesto a la Agencia de Sostenibilidad y Cambio Climático del Ministerio de Economía. Un APL orientado al coprocesamiento podrá facilitar los desarrollos regulatorios y aspectos relativos a la capacitación del sector público en torno al coprocesamiento, al mismo tiempo que permitirá a la industria asumir los compromisos que sean necesarios para un crecimiento sostenible.

Los esfuerzos de corto plazo en torno al reconocimiento del coprocesamiento como alternativa de valorización para la fracción no reciclable de envases y embalajes en el contexto de la Ley 20.920, requieren de una articulación sectorial / gremial, que perfectamente puede ser liderada por instituciones cuyo objetivo es precisamente representar los intereses de la industria, como el Instituto del Cemento y el Hormigón (ICH).

Por otra parte, las iniciativas relativas a fortalecer las relaciones comunitarias implicarán esfuerzos individuales de gestión por parte de las empresas, y el apoyo financiero para etapas de diseño de proyectos de valor compartido. Este apoyo financiero se considera abordable por parte de la industria. Por último, los esfuerzos orientados a la capacitación de la misma industria para garantizar un crecimiento sostenible del coprocesamiento, requerirán asumir costos por concepto de contratación de expertos, asistencia a seminarios y cursos, participación en misiones tecnológicas (un ejemplo de estas misiones son las organizadas anualmente por FICEM, en las que generalmente participan representantes de la industria cementera nacional), etc.

4.2.9 Hoja de ruta para coprocesamiento

- Fortalecimiento de las condiciones habilitantes para un desarrollo sostenible del coprocesamiento:
 - Diseño e implementación Acuerdo de Producción Limpia (APL) (2020–2022)
 - Consolidación del coprocesamiento como alternativa de valorización energética de la fracción no reciclable de envases y embalajes en el contexto REP (2020–2021)
 - Capacitación al sector público en coprocesamiento (ciclos 2020–2021 y 2024–2025)
 - Diseño y articulación de proyectos de valor compartido en torno a la gestión sostenible de residuos en comunidades aledañas a las plantas (Diseño y articulación 2020, implementación a partir de 2021)
- Capacitación y evaluación técnica / estratégica a empresas cementeras, para un aumento sostenible en las tasas de coprocesamiento (2 ciclos 2020-2021 y 2023-2024)
- Involucramiento estratégico con Sistemas de Gestión REP (SIGs) (2020-2021)
- Inversión en pre-procesamiento por parte de la industria de la gestión de residuos, a partir de 2020.
- Inversión en capacidad de coprocesamiento (recepción, almacenamiento, alimentación de combustibles alternativos, monitoreo, etc.), a partir de 2021, a completarse en 5 años
- Tasas de sustitución crecientes (25% aumento anual entre 2021 y 2022, y luego crecimiento a tasas cercanas al 10% anual, hasta llegar al 30% de sustitución térmica en 2028)

4.3 Eficiencia energética térmica

Varias medidas permitirían aumentar la eficiencia energética térmica:

- Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas
- Enfriadores de clínker de tecnología eficiente
- Adición de etapas (ciclones) en torres precalentadoras
- Aumento de 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. Estas dos medidas conjuntas permitirían una reducción del orden del 9 kg de CO₂ por tonelada de cemento.

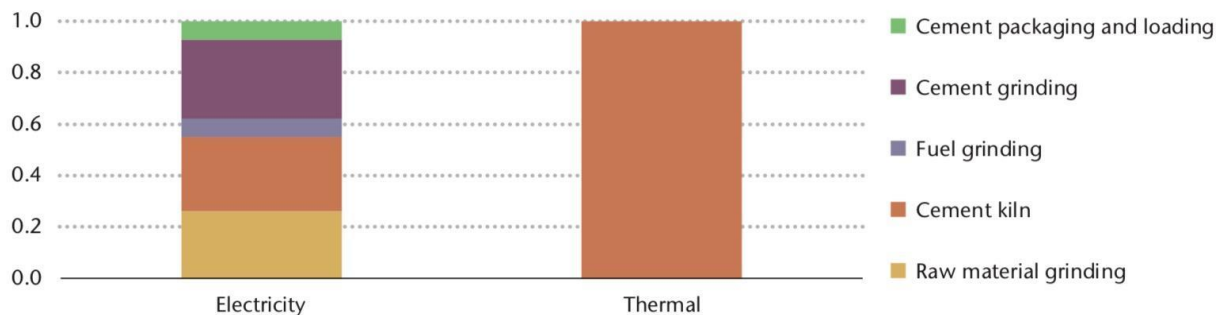
4.3.1 Descripción

El proceso de fabricación del clínker es un proceso que demanda grandes cantidades de energía térmica. Como se mencionó anteriormente, aproximadamente 40% de las emisiones de CO₂ de la industria cementera provienen del combustible utilizado para proveer esa energía térmica.

Todas las instalaciones no tienen la misma eficiencia. Esta eficiencia depende de varios factores como la edad de las instalaciones, el estatus de su mantenimiento, la composición de la materia prima, la

tecnología empleada, los tipos de combustibles, etc. Ciertos criterios no se pueden modificar y son inherentes a la situación geográfica de la planta.

Figura 8: Distribución de la demanda energética por etapa del proceso



Fuente: (IEA-WBSCD, 2018), página 14

Además, debe enfatizarse que simplemente no es posible sumar los potenciales de reducción identificados por las medidas individuales para calcular el potencial total. En primer lugar, algunas medidas o tecnologías tienen impactos interactivos. En segundo lugar, no es posible ir más allá de la demanda mínima de energía, lo que significa que "un kJ sólo puede reducirse una vez" (ECRA, 2017).

4.3.2 Mejores prácticas a nivel internacional

El proceso de vía seca con precalentador es la mejor tecnología disponible y no se prevé mayores cambios en el corto y mediano plazo. A largo plazo se está investigando el uso potencial de la energía solar concentrada, pero todavía no hay ningún resultado que pueda sugerir que esta tecnología podría ser viable algún día.

Según los datos de GNR, el promedio ponderado de la demanda específica de energía térmica para este tipo de horno en Chile en 2017 fue de 3.550 MJ/t de clínker (3.605 MJ/t de clínker en 1990), equivalente a una reducción de 1,5% durante 24 años. Este progreso muy marginal demuestra que se está llegando a un límite del proceso y que no va a ser posible aumentar de manera significativa la eficiencia energética en plantas modernas como lo son las plantas chilenas.

Uno de los criterios que afectan la eficiencia energética térmica es el número de ciclones. Según los "ECRA Papers" (ECRA, 2017), la eficiencia específica térmica debió haber sido la siguiente en el 2014:

- ciclones de 3 etapas: 3.400 – 3.800 MJ/t clínker
- ciclones de 4 etapas: 3.200 – 3.600 MJ/t clínker
- ciclones de 5 etapas: 3.100 – 3.500 MJ/t clínker
- ciclones de 6 etapas: 3.000 – 3.400 MJ/t clínker

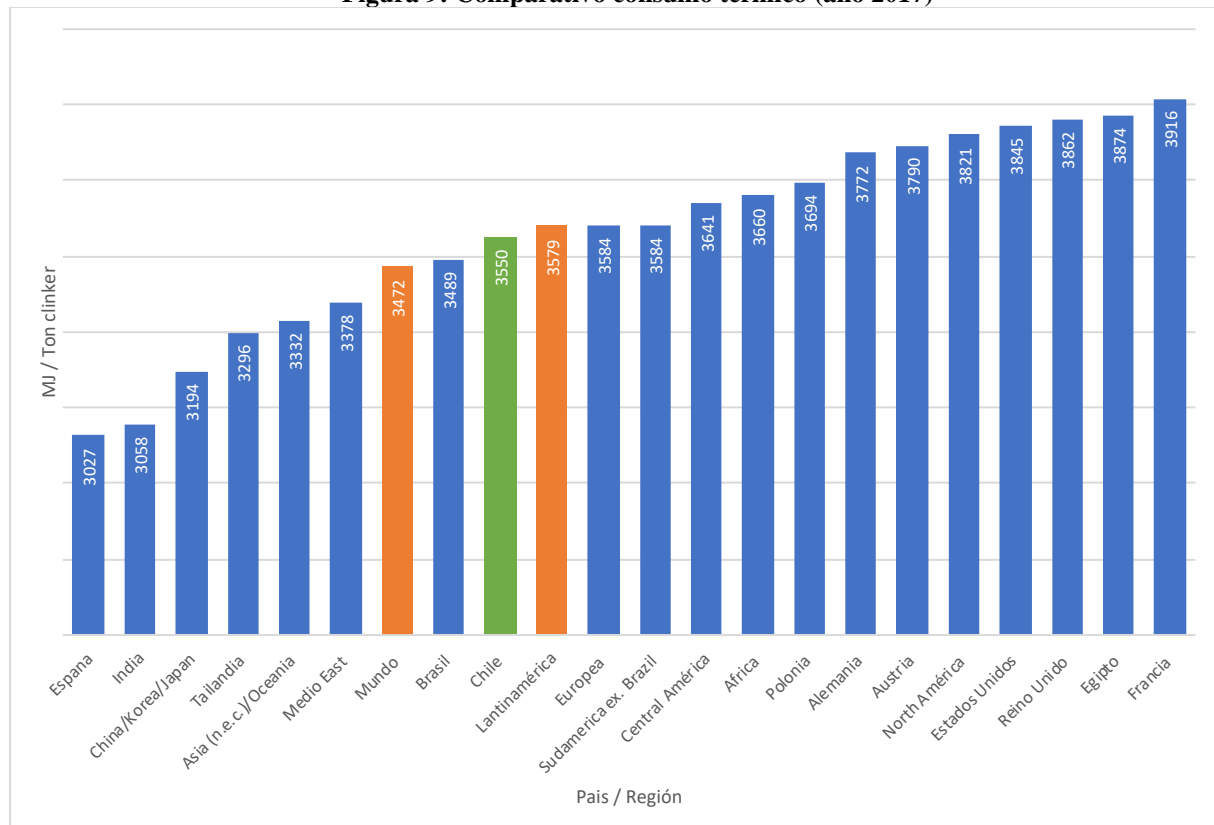
Otro criterio que afecta la eficiencia energética térmica es el tamaño de los hornos. A mayor capacidad, más eficiente será el consumo energético térmico. A base de estas consideraciones, ECRA prevé un consumo térmico promedio mundial de 3.300 – 3.400 en 2030 y 3.150 - 3.250 en 2050, lo que representa menos de 5% entre 2015 y 2050.

Como conclusión de este tema, ECRA establece: "No se vislumbran tecnologías innovadoras que puedan conducir a una eficiencia térmica significativamente mayor".

4.3.3 La situación en Chile

Todos los hornos chilenos son de tecnología vía seca con precalentador. En términos de etapas existe 1 horno con 6 etapas, 1 horno con 5 etapas y 2 hornos con 4 etapas. No existen más hornos de 3 etapas.

Figura 9: Comparativo consumo térmico (año 2017)



Fuente: (GCCA, 2019)(Para Chile, información entregada por empresas locales)

Según la Hoja de Ruta FICEM-ICH el consumo térmico medio era de 3.700 MJ/t clínker en el 2014, lo que está sobre el nivel promedio de las plantas participantes al GNR a nivel mundial (3.519 MJ/t clínker) y sobre el nivel promedio de las plantas GNR de Sudamérica (3.648 MJ /t clínker).

En el año 2017 el promedio chileno era de 3.550 MJ/t clínker, muy comparable al promedio mundial de 3.470 MJ/t clínker y de 3.580 para América latina (LATAM). El mínimo registrado en Chile es de 3.120 MJ/t clínker y el máximo de 4.089 MJ/t clínker, según consta en la hoja de ruta FICEM-ICH. El mejoramiento en Chile entre 2014 y 2017 se debe al cierre de un horno antiguo con alto consumo energético térmico.

4.3.4 Potencial de mejoramiento

La hoja de ruta FICEM-ICH propone las siguientes mejoras según la lista de mejores prácticas internacionales de ECRA.

Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas (ECRA technology paper n°1)

Se comprobó que añadir en la mezcla ciertos componentes químicos puede aumentar la quemabilidad de la materia prima. ECRA asume que las emisiones directas pueden reducirse de 4 a 16 kg CO₂ /t clínker y aumentar hasta 0.5 kg CO₂ /clínker. A base de la tecnología usada en los hornos chilenos, FICEM-ICH asume el efecto de esta medida en una reducción de 5 kg de CO₂ por tonelada de cemento entre 2014 y 2030.

En términos económicos no se requiere inversión y el ahorro total sobre el costo de producción entre EUR 0,006 y EUR 0,45 (USD 0,007 y USD 0,5) por tonelada de cemento según la ECRA.

Se recomienda que cada compañía evalúe el potencial de esta medida en su planta.

Enfriador de clínker de tecnología eficiente (ECRA technology paper n°8)

Se requiere enfriar el clínker que sale del horno, donde la temperatura supera los 1.300 grados celcius. Tecnologías modernas permiten recuperar parte de este calor y reinyectarlo en el proceso de producción del clínker.

ECRA asume que las emisiones directas pueden reducirse de 22 a 26 kg CO₂ /t clínker. La hoja de ruta FICEM-ICH asume que a base de la tecnología existente en las plantas chilenas se podría llegar solamente a una reducción de las emisiones de 4 kg de CO₂ por tonelada de cemento entre 2014 y 2030 a través de la modernización de los enfriadores existente.

El costo de inversión de un enfriador nuevo seria entre 15 y 20 millones de USD, un nivel de inversión que no justifica los ahorros tanto económicos que en términos de emisiones de CO₂. El costo de la modernización de un enfriador existente seria según ECRA entre EUR 1 y 3 millones (USD 1,1 – 3,3 millones). La reducción del costo de producción puede llegar hasta EUR 0,5 (USD 5,5) por tonelada de cemento en el caso de un equipo nuevo.

A base de estos números solo se recomendaría la modernización si es necesario. Pero la misma ECRA menciona que los enfriadores planetarios o rotativos pueden reemplazarse por enfriadores de rejilla. Por lo general, esto es solo económicamente viable si la modificación está vinculada a un cambio en la tecnología de precalcinación y un cambio significativo aumento de capacidad. Lo que no es el caso en Chile. Además, y según las entrevistas, 3 hornos sobre 4 ya están equipados de enfriadores de rejilla.

No se va a incorporar esta medida en la Hoja de Ruta.

Aumento de la capacidad de los hornos (ECRA technology paper n° 5)

No es posible aumentar de manera significativa la capacidad de un horno existente, salvo acciones de “debottlenecking” que permiten después de algunos años recuperar la capacidad inicial del horno. En el paper 5 la ECRA se refiere a la inversión en hornos nuevos de mayor capacidad. Por ejemplo, según la ECRA un horno de 6.000 toneladas de capacidad diaria permite reducir el consumo térmico de 400 MJ /t clínker en comparación con dos hornos de 3.000 toneladas. Por lo tanto, el bajo nivel de reducción de las emisiones de CO₂ (13 a 18 kg de

CO₂ /t clínker según la ECRA) y del costo de producción (de 1,4 a 1,7 EUR /t cemento (USD 1,5 a 1,9) no justifica el alto nivel de inversión que puede llegar a 260 millones de EUR (USD 286 millones). Esta inversión se podrá justificar únicamente cuando la demanda superará la capacidad de producción, un esquema que no se prevé en Chile antes de 5 – 10 años a lo más optimista. Además, es probable que la vulnerabilidad de Chile a las importaciones no justificase más una inversión de este tamaño.

No se va a incorporar esta medida en la Hoja de Ruta.

Añadir una etapa en el precalentador (ECRA technology paper n° 4)

Como se comentó anteriormente, la eficiencia energética térmica aumenta con el número de ciclones. Pasar de 4 a 5 ciclones o de 5 a 6 permitiría solamente reducir las emisiones de 7 a 9 kg de CO₂ por tonelada de clínker. Pero el costo de inversión (entre EUR 5 y 8 millones (USD 5.5 y 8.8 millones) para una reducción del costo de producción de menos de EUR 0,20-0,25 (USD 0,22-0,28) por tonelada de cemento no justifica la medida. Añadir una etapa al precalentador es una inversión bastante corriente en la industria cementera a nivel mundial que se realiza cuando lo justifica la rentabilidad económica.

Considerando el análisis antes expuesto, *no se va a incorporar esta medida en la Hoja de Ruta*. Cabe mencionar que la Hoja de Ruta FICEM-ICH no prevé el aumento de la capacidad de los hornos o la adición de una etapa al precalentador en sus recomendaciones.

Las otras medidas mencionadas por ECRA son de efecto menor sobre las emisiones de CO₂ y no parecen justificar el nivel de inversión.

4.3.5 Las barreras existentes o potenciales

No se identificaron barreras regulatorias. Las principales barreras identificadas son técnicas y económicas. En términos de barreras técnicas, y como se explicó en el informe 2, Chile prevé aumentar considerablemente el uso de combustibles alternativos hacia el horizonte 2030. Esto implicará un aumento del consumo energético específico térmico. Pero el efecto positivo del coprocesamiento sobre las emisiones compensa ampliamente el aumento del consumo térmico así que no se va a considerar en este informe como barrera.

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. Esta barrera afecta únicamente la adición de etapas (ciclones) en torres precalentadoras y el aumento de la capacidad de los hornos

En cambio, la mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas no requiere inversiones.

4.3.6 Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera

No existen mejores soluciones a nivel internacional para superar una barrera de tipo rentabilidad de una inversión salvo tratar de reducir el nivel de inversión hasta que sea rentable. Y la industria cementera chilena se modernizó suficientemente para que no se necesitan estas inversiones mayores.

4.3.7 Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras

La única opción es de reducir el costo de la inversión a través de negociación con los proveedores. Pero como antes mencionado, no se aplica en este caso.

4.3.8 Hoja de ruta para eficiencia energética térmica

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 LATAM. Como se explicó en los capítulos anteriores, 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 alternativos ya va a resultar en un aumento del consumo energético térmico. Se sugiere como objetivo mitigar este aumento a través de medidas como el mejoramiento de la capacidad de cocción de las materias primas y la capacitación de operadores.

4.4 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 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 = 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.

Hay dos categorías de ejes que permiten reducir las emisiones:

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

La medida más eficiente para reducir las emisiones de CO₂ sería el uso generalizado de molinos modernos de tipo verticales con separadores. Actualmente la industria cementera chilena cuenta con molinos de este tipo de tecnología, aunque aún existen también molinos de bolas de tecnología menos eficiente. La alta sobrecapacidad de producción de cemento en el país probablemente no permitiría justificar el reemplazo de los molinos menos eficientes que todavía existen. Los otros ejes relacionados a la eficiencia energética no permiten reducir de manera significativa las emisiones de CO₂. Única medida que se podría considerar sería la de autorizar, vía normativa técnica, la molienda separada de las materias primas, tecnología que no es reconocida en Chile mientras sí está autorizada en casi todos los países del mundo. Esta medida, que necesitaría un cambio regulatorio, permitiría ahorrar únicamente 1

kg de CO₂ por tonelada de cemento, pero hasta 1,6 EUR (USD 1,8) por tonelada de cemento. La inversión es de 0 si hay suficiente capacidad, hasta 38 millones de EUR (USD 42 millones) por molino si hay que comprar nuevos.

4.4.1 Descripción

➤ Energía renovable

Se considera únicamente el caso de una planta cementera que invierte en la producción de energía renovable que sea de tipo solar o eólico. El inconveniente mayor de este eje es que no permite suministrar energía de manera continua (solar no funciona de noche y eólico si no hay viento). La tendencia internacional es de recurrir a esta inversión cuando no hay acceso a la red nacional o cuando el precio del kWh es muy elevado.

➤ Consumo energético eléctrico

En el caso del procesamiento en seco, el consumo total de energía eléctrica se puede distribuir como sigue: aproximadamente 2% para extracción de materia prima, 25% para preparación de materia prima, 25% para producción de clínker más un 3% adicional para molienda de combustible, 43% para molienda de cemento y 3% para embalaje y carga. Como los procesos de molienda consumen la mayor parte de la energía, la tecnología de molienda tiene un gran impacto sobre la demanda total de energía eléctrica: plantas de cemento que utilizan tecnologías modernas de molienda - p.ej. rodillos de molienda de alta presión y molinos de rodillos verticales - para la molienda de materias primas y cemento en lugar de molinos de bolas, generalmente tienen una menor demanda de energía. Sin embargo, esto tiene que ser visto en el contexto de la fiabilidad de la operación y también la calidad del cemento que puede verse afectada según el tipo de molino.

La demanda de energía eléctrica no solo está impulsada por el equipo, sino que también depende en gran medida de propiedades del producto. El rendimiento del cemento tiene un impacto importante en el consumo de energía. Cuanto mayor es el desarrollo de la resistencia del cemento, más fino suele ser el rectificado, lo que requiere significativamente más energía en los molinos. Especialmente en mercados maduros, el desarrollo se puede observar en la cartera de productos hacia una mayor resistencia. Esta tendencia puede conducir a un aumento de la demanda de energía eléctrica, aunque la eficiencia del equipo mejora.

Como en el caso de la energía térmica, se debe enfatizar que simplemente no es posible sumar los potenciales de reducción identificados por las medidas individuales para calcular el potencial total. En primer lugar, algunas medidas o tecnologías tienen impactos interactivos. En segundo lugar, no es posible ir más allá de la demanda mínima de energía, lo que significa que "un kW solo puede reducirse una vez" (ECRA, 2017).

4.4.2 Mejores prácticas a nivel internacional

Según las cifras GNR el consumo eléctrico específico promedio a nivel mundial era de 101 kWh/ton cemento en 2014 y 102 kWh/t cemento en 2017. Estos números son un poco diferentes de los de la ECRA que menciona 104 kWh/t cemento en el 2014. El percentil 10 siendo de 85 kWh/ton según la

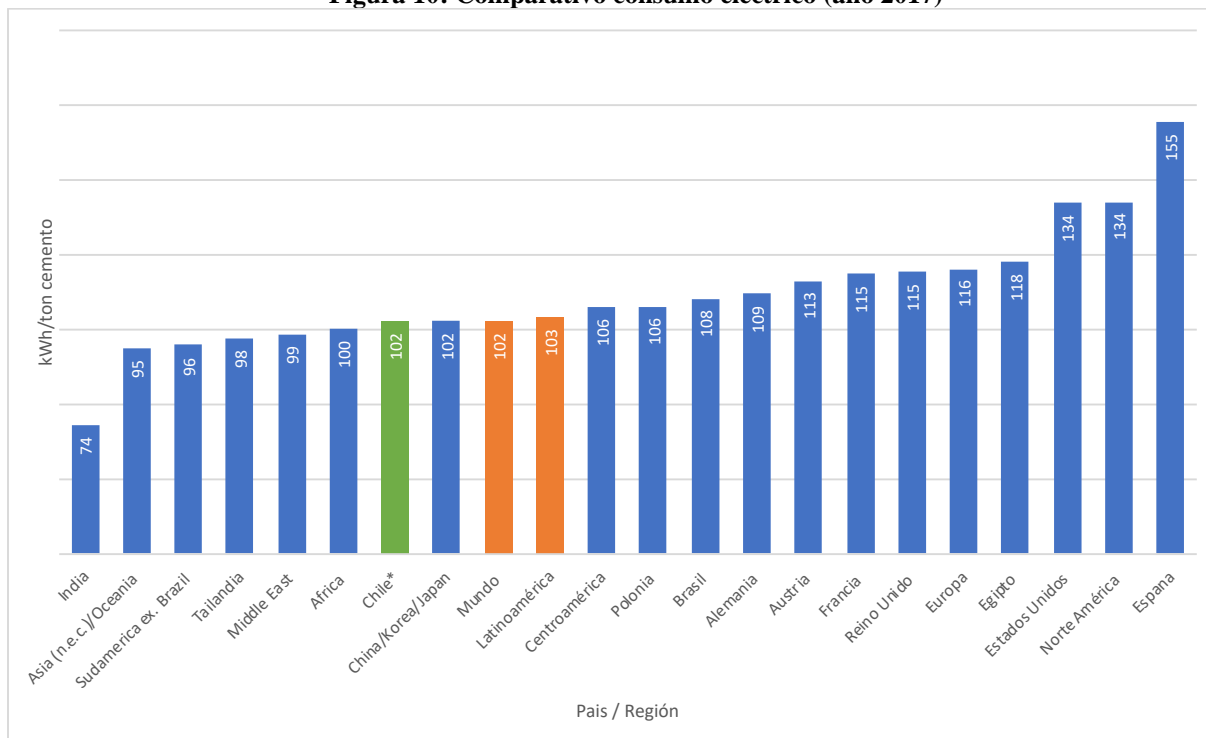
ECRA que considera que se podría reducir a 100 kWh en 2030 y 90-95 kWh en 2050 a consecuencia de la modernización de las instalaciones de molienda, Hoy día las tecnologías más eficientes son molinos verticales o con alta presión.

También ECRA menciona que algunas medidas relacionadas con la reducción de las emisiones generan un consumo eléctrico superior. El ejemplo más significativo es la captura de carbono que generaría hasta 20% de consumo eléctrico adicional.

4.4.3 La situación en Chile

No es fácil establecer una comparación correcta del consumo energético eléctrico específico. La principal razón es que el GNR publica promedios incluyendo molindas y plantas integradas, cuando el consumo eléctrico específico es muy diferente entre estos tipos de instalaciones. Según la Hoja de Ruta FICEM-ICH el consumo eléctrico medio en el 2014 era de 100 kWh/t cemento (molindas y plantas integradas), 124 kWh/t cemento para las plantas integradas, y 58 kWh/t cemento para las molindas. El promedio chileno de 100 kWh/t se podría teóricamente comparar al promedio mundial de 104 kWh/t según el GNR, si la proporción de molindas vs. integradas en la base GNR corresponde a la proporción en Chile, lo que no se puede garantizar. Por lo tanto, podemos decir que en el 2014 el consumo eléctrico específico de la industria chilena todas plantas incluidas es del orden de magnitud del promedio mundial. En el 2017 el consumo para las plantas integradas es de 101,7 kWh /t.

Figura 10: Comparativo consumo eléctrico (año 2017)



Fuente: GCCA GNR, 2019, * plantas integradas (Para Chile, información entregada por empresas locales)

4.4.4 Potencial de mejoramiento

Teóricamente, si una planta cementera suscribe contratos con generadores de energía, mediante los cuales compra explícitamente energía proveniente de fuentes renovables, podría estar en condiciones de adjudicarse las disminuciones indirectas de emisión que esas energías renovables implican. Sin embargo, por la naturaleza del sistema interconectado que opera en Chile y la naturaleza de los diferentes tipos de contratos y clientes de dicho sistema, ese efecto y consiguiente contabilidad de emisiones está aún en estudio en Chile, no siendo posible en la actualidad adjudicar las disminuciones de emisión a un comprador específico, por lo que tal efecto no será considerado.

Según la ECRA el potencial de reducción de las emisiones indirectas (no hay efecto sobre las emisiones directas) relacionadas al uso de energía eléctrica renovable (solar o eólica, por ejemplo) en una planta cementera sería de 2 a 18 kg de CO₂ por tonelada de cemento, dependiendo del nivel de emisión de la red eléctrica externa. En Chile y como se calculó al principio del § 4.4, el nivel de emisiones de la red eléctrica externa corresponde 40,59 kg CO₂ /t cemento. El nivel de reducción de las emisiones sería solamente alrededor de 12 kg CO₂ /t cemento si la energía renovable reemplaza 30% del consumo total de la planta. Por lo tanto, el costo actual de una planta con paneles solar es de 1.210 USD/kW²¹ o 30,2 millones USD por una capacidad de 25 MW, el estándar por una planta de 1 millón de toneladas de cemento. El bajo precio actual de la red eléctrica chilena de 0,045 EUR/kWh (0,05 USD/kWh) no permite rentabilizar la inversión y no se va a incorporar esta medida en la hoja de ruta.

Además, se necesitan normas regulatorias particulares como “green tariff” que regulan el precio al cual el generador de energía renovable puede vender sus excedentes a la red nacional.

Molienda separada (ECRA technology paper 28)

La molienda separada, no permitida hoy día en Chile (norma técnica), permitiría ahorrar entre EUR 0,04 – 0,36 /t cemento (USD 0,04 - 0,40) y 0,7 a 1,6 kg CO₂/t cemento (ECRA, 2017). Estos números no justificarían el alto costo de inversión (hasta 38 millones de EUR (USD 42 millones) según la ECRA) si se tiene que comprar molinos adicionales. Pero en el caso de Chile, que tiene sobre capacidad de molienda, se podría considerar moler las materias de manera sucesiva. Se supone que habrá un ahorro sobre la cantidad de clínker en el cemento, y entonces sobre las emisiones de CO₂.

Se va a sugerir esta medida en la Hoja de Ruta, ya que no requiere inversión.

²¹ https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf

Uso de los aditivos para la molienda (ECRA technology paper 30)

El uso de aditivos permite mejorar la molienda sin que se requieran inversiones. Según la ECRA, el ahorro sería de 0,04 a 0,20 EUR/t (USD 0,04 a 0,22) de cemento lo que reduciría las emisiones de 0,3 a 1,1 kg CO₂/t cemento.

Se va a sugerir esta medida en la Hoja de Ruta.

Molinos verticales con separador (ECRA technology paper 23)

Según las entrevistas se asume que la industria cementera está equipada en aproximadamente un 70% con molinos horizontales y 30% con molinos verticales. Según la ECRA instalar molinos modernos (verticales) solo permitirían una reducción indirecta de las emisiones de 2,6 a 6,8 kg CO₂ /t cemento. La inversión sería de EUR 20 a 30 millones (USD 22 a 33 millones) de ahora para una reducción del costo de producción de 0,5 a 1,3 EUR /t cemento (USD 0,55 a 1,4). Estos números no justifican el remplazo de molinos existentes.

No se va a incorporar esta medida en la Hoja de Ruta.

4.4.5 Las barreras existentes o potenciales

La única barrera que se identificó afecta a la molienda separada no está permitida actualmente en Chile. Como ya se mencionó, la molienda separada de las materias primas no solamente afecta de manera positiva el consumo energético, sino que también aumenta la calidad final del cemento. La molienda separada es el estándar internacional, lo que implica que esta prohibición se debe cancelar por las Autoridades.

4.4.6 Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera

El consultor no identificó otro ejemplo a través del mundo donde no se permite la molienda separada, por lo que la solución evidente es la de permitir este tipo de molienda, que es la práctica internacional.

4.4.7 Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras

Se recomienda gestionar la modificación a la norma técnica, demostrando los efectos positivos de la molienda separada.

4.4.8 Hoja de ruta para eficiencia energética eléctrica

La única medida de eficiencia energética eléctrica que se va incorporar en la Hoja de Ruta es la molienda separada. Como se explicó en los capítulos anteriores las otras medidas no van a ser económicamente viable sin que correspondan en inversiones en equipos nuevos que solo la necesidad de una ampliación de capacidad justificaría.

Resumen de los ejes para mejorar la eficiencia energética eléctrica:

- Eje: molienda separada
- Nivel de inversión: 0
- Ahorro sobre el costo de producción: 0,0 – 0,2 EUR /t cemento (USD 0,0 – 0,2)
- Reducción de las emisiones: entre 0,7 y 1,6 kg CO₂ /t cemento (entre 2.730 y 6.240 t CO₂ al año)
- Barrera: prohibición legal
- Acción requerida: convencer las Autoridades de la necesidad de remover esta barrera
- Tiempo necesario para poder implementar la medida: 12 meses

4.5 Reducción del factor clínker

A pesar de que Chile ya tiene uno de los contenidos de clínker en el cemento el más bajos del mundo (64,8% con las plantas integradas en el 2017), se considera que todavía existe un potencial de reducción. La mayoría de los cementos adicionales 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

- (1) 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,
- (2) 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. El objetivo de esta hoja de ruta es reducir el CO₂ emitido por el cemento y finalmente por el hormigón, lo que va a necesitar optimizar la calidad del cemento y el volumen de cemento por m³ de hormigón.

4.5.1 Descripción

Como se mencionó anteriormente, la principal fuente de emisiones de CO₂ es el proceso productivo del clínker. Entonces, 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 fueron predominantemente con 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.

Escorias

Las escorias provenientes de altos hornos de la industria siderúrgica poseen propiedades que las hacen muy atractivas para la fabricación de cementos adicionados, ya que poseen propiedades hidráulicas naturalmente. La escoria molida con alto grado de finura es capaz de reaccionar al ser mezclada con agua y de endurecer sin que sea necesario para ello el uso de cal, hidróxido de calcio o cemento. Sin embargo, para poder ser utilizada como material de adición, la escoria debe ser enfriada bruscamente hasta adquirir una consistencia vítrea y posteriormente pulverizada.

Puzolanas

Las puzolanas son materiales inorgánicos que pueden ser de origen natural o artificial, derivados de ciertos procesos industriales:

- Puzolanas naturales

Las puzolanas naturales incluyen material de origen volcánico o de origen orgánico como las tierras de diatomeas y la arcilla. Es importante considerar que no todo material de origen volcánico es puzolana.

- Puzolanas artificiales.

Se consideran como puzolanas artificiales a ciertos subproductos de actividades industriales, siendo las cenizas volantes y la microsílíce los que mayor demanda tienen por el impacto positivo que tiene su uso sobre las propiedades del cemento:

- Las cenizas volantes (fly ash), que se generan a partir de la combustión de carbón en plantas termoeléctricas, son ampliamente utilizadas en la industria cementera y no requieren de molienda posterior
- La microsílíce o microsílíce (sílica fume), altamente reactiva y muy fina, que se produce en la industria del ferrosilicio, es utilizada en la fabricación de hormigón de alta resistencia.

Los fillers (e.g. caliza)

Son materiales que se adicionan al clínker para aumentar la producción de cemento. Estos materiales tienen un efecto dispersante en el cemento que favorece la hidratación. El uso de la piedra caliza como un componente menor o principal en el cemento es un eficiente método para reducir la relación clínker / cemento del cemento. Sin embargo, la piedra caliza no contribuye a la formación de resistencia de la pasta de cemento endurecida. Si los cementos que contienen piedra caliza tienen que llegar a la misma resistencia que OPC, deben ser molidos a un nivel superior de finura. La cantidad de piedra caliza en el cemento es determinante para la resistencia de la pasta endurecida a ácidos y sulfatos y su resistencia a la congelación-descongelación. Típicamente, piedra caliza conduce a una mejor trabajabilidad del hormigón.

Polvo proveniente de los hornos de clínker

El proceso de producción de clínker conlleva a la generación de polvo (filtros, bypass). Este polvo está compuesto por una mezcla de caliza parcialmente calcinada y materia prima no reaccionada, clínker en polvo, ceniza, sulfatos alcalinos, haluros y otros compuestos de naturaleza volátil. Este material puede usarse para la fabricación de cemento, aunque en cantidades limitadas y en combinación con ceniza volante o escoria en una proporción no mayor de 15% (GIZ - Cementis, 2017).

4.5.2 Mejores prácticas a nivel internacional

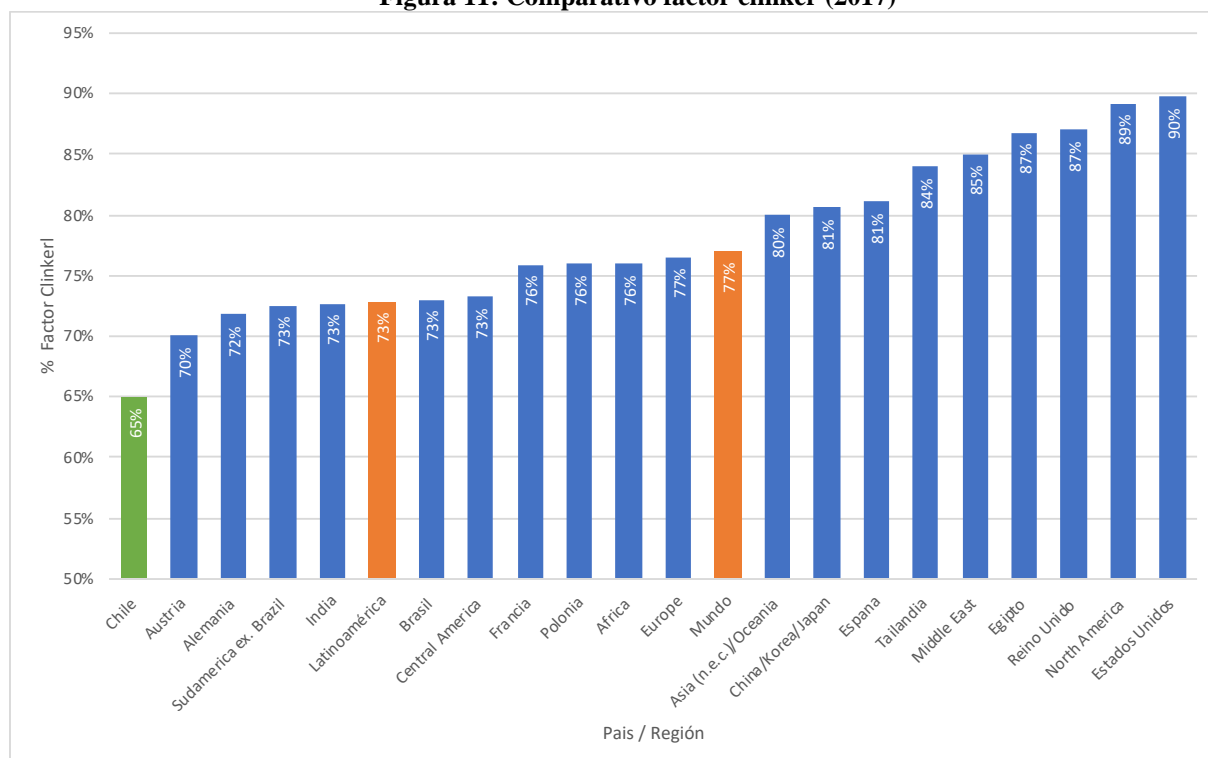
Según las cifras GNR, el factor clínker promedio a nivel mundial era de 77.1% en 2017. China reporta un factor clínker de 58%. ECRA state-of-the-art paper 4 considera que va a ser posible reducir el factor clínker promedio a 65% - 70% en el 2030 y a 60 - 65% en el 2050. Pero para seguir reduciendo bajo este nivel ECRA menciona que se va a necesitar usar nuevos cementos a base de arcilla calcinada (*“For further reduction of the clínker-to-cement-ratio calcined clays must be taken into account.”*) Las interrelaciones entre distintos tipos de efectos muestran que la sustitución de clínker con adiciones contribuye de manera significativa a la reducción de emisiones de CO₂.

El rol de los nuevos tipos de cemento aún está abierto si se analiza el futuro. Sin embargo, desde una perspectiva a medio plazo no existe otro producto en la construcción con el potencial de reemplazar el cemento a mayor escala.

4.5.3 La situación en Chile

Con un factor clínker de 67% en 2014 (Hoja de Ruta FICEM – ICH) y 64,8% en el 2017 (plantas integradas) se puede considerar que Chile está ya al nivel de las mejores prácticas internacionales. Solo China con 58% le supera. Esto se debe al hecho de que la industria cementera chilena se beneficia de puzolanas naturales en cantidades casi ilimitadas y a que los productores de cemento históricamente han privilegiado este tipo de cemento en el mercado. Convencer a las autoridades a cargo de las normativas y el mercado que cementos adicionados pueden tener, bajo ciertas condiciones, resistencias similares al cemento con alto contenido de clínker, es generalmente la barrera más potente al desarrollo de cementos con bajo factor clínker.

Figura 11: Comparativo factor clínker (2017)



Fuente: GCCA GNR, 2019 (Para Chile, información entregada por empresas locales)

Además de la puzolana, la industria cementera chilena utiliza:

- cenizas volantes generadas en las plantas termoeléctricas, pero solamente 90.000 toneladas (año 2017) sobre los más de 1 millón de toneladas de disponible al año. Esto se explica por la baja calidad de la mayoría de las cenizas que no permite a las cementeras de cumplir con las normas ambientales vigentes;
- escorias de alto horno (109.250 toneladas consumidas en el 2017), que representa el máximo que se puede lograr en términos de calidad y a condiciones económicas atractivas según entrevistas con los cementeros.

4.5.4 Potencial de mejoramiento

Nuevo cemento con bajo factor clínker a base de arcilla calcinada y caliza

Se recomienda en primer lugar que la industria cementera intente reducir el factor clínker optimizando las materias de sustitución que pueden utilizar sin necesitar inversiones o con molienda más fina (pero más finesa genera mayores costos de energía eléctrica y de mantenimiento de los molinos). Sin embargo, y según entrevistas con empresas cementeras, parece difícil reducir más allá el factor clínker con las adiciones existentes. Pero la calidad de la puzolana natural chilena no permite aumentar su contenido en el cemento sin deteriorar la calidad final del producto, y 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. Reducir el factor clínker necesita producir nuevos cementos y solo se identificó dos oportunidades:

- Materiales de origen minero, para los que no existen todavía estudios finalizados ni validados por la comunidad científica / técnica, que permitirían aprovechar el potencial de estas materias tanto desde un punto de vista técnico, de disponibilidad, y de costo;
- Arcilla calcinada

El uso de cemento con arcilla calcinada ya tiene varios años de producción industrial en Brasil. La empresa Votorantim inauguró su primera planta de producción de arcilla calcinada en el 2015 declarando que permite reducir las emisiones de CO₂ hasta 50%²². Al mismo tiempo, la Universidad EPFL de Lausane (L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne²³) desarrolló un cemento a base de arcilla calcinada y caliza (LC3²⁴) que permite reducir el factor clínker hasta 50% y mantener las mismas resistencias que un cemento portland ordinario con 95% clínker.

El cemento con arcilla calcinada y caliza ofrece una alternativa sostenible, de alto rendimiento y rentable para futuros cementos, mientras se conserva el comportamiento mecánico del OPC. Algunas propiedades relevantes como la resistencia al ingreso de cloruro y ASR se mejoran

²² <http://www.votorantimcimentos.com/pt-BR/media-center/news/Paginas/votorantim-cimentos-vence-premio-de-inovacao-nacional-com-projeto-de-cimento-sustentavel.aspx>

²³ <https://www.epfl.ch/en/>

²⁴ <https://www.lc3.ch>

significativamente en comparación con el cemento tradicional. Además, la piedra caliza y las arcillas calcinadas son algunas de las pocas materias primas disponibles en las cantidades requeridas para constituir una tecnología adecuada para hacer frente a la demanda proyectada de cemento en todo el mundo. Por otro lado, se presentan algunas cifras preliminares que muestran que el cemento con arcilla calcinada y caliza no es solo una alternativa técnicamente adecuada, sino también económicamente viable en una variedad de escenarios de implementación (Scrivener, 2018).

El reconocimiento internacional de este nuevo tipo de cemento se manifestó a través de diversos documentos de referencia mundial como la Hoja de Ruta IEA-WBCSD (IEA-WBCSD, 2018)²⁵, UNEP (Scrivener, John, & Gartner, 2016) los papeles de ECRA, o la IFC durante una presentación hecha en Miami el 11 de febrero 2019. Adicionalmente, cabe mencionar que durante el próximo (2020) World Economic Forum de Davos, se confirmará que este cemento es, sin ningún lugar a dudas, el nuevo cemento de bajo carbono de la industria. Es importante mencionar que la producción y la venta tanto de este tipo de cemento como de los equipos para producirlo, están libres de todo tipo de patente o copyright en Chile.

ECRA (technology paper 36) menciona en sus documentos técnicos un potencial de reducción de hasta 180 kg CO₂ por tonelada de cemento, haciendo del cemento con arcilla calcinada y caliza 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 por reducción del costo de producción en comparación con OPC de EUR 7,0 /t cemento (USD 7,7) según www.LC3.ch y EUR 9,9 por tonelada de cemento (USD 10,9) según la ECRA, lo que resultaría en un rápido retorno de la inversión.

En términos de materia prima se requiere arcilla calcinada con un contenido kaolinitico de 40% como mínimo²⁶. Las primeras investigaciones demostraron la existencia en Chile de este tipo de arcilla. Obviamente la primera etapa consistirá en investigar la ubicación exacta de este tipo de arcilla, principalmente alrededor de las plantas cementeras.

Se considera que el factor clínker promedio podría reducirse aún más de los niveles actuales, reemplazando por ejemplo 500.000 toneladas de OPC (95% clínker) por 500.000 toneladas de cemento a base de clínker (50%), arcilla calcinada (30%) caliza (15%), y yeso (5%). Según las proyecciones, este nuevo portafolio permitiría reducir la producción de clínker en unas 225.000 toneladas al año sin modificar la producción total de cemento.

²⁵ <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>

²⁶ Mas referencias sobre el sitio web del LC3: www.LC3.ch

El efecto sobre las emisiones puede explicarse de la siguiente forma:

- Emisiones brutas de 893 kg CO₂/ t clinker y emisiones netas de 860 kg CO₂/ t clinker en 2014 (Hoja de Ruta FICEM-ICH)
- Emisiones arcilla calcinada: 220 kg CO₂/ t arcilla (con 2,3 MJ/ t arcilla en horno rotativo, 0,096 t CO₂/ GJ emitido por el combustible)
- En la nueva composición se reemplaza 225.000 t clinker por 150.000 t arcilla calcinada (más caliza y yeso que no emite CO₂)
- Impacto sobre las emisiones sin considerar efecto del coprocesamiento:
 - Impacto sobre las emisiones brutas: $(225.000 \text{ t} \times 0,893 \text{ tCO}_2/\text{t}) - (150.000 \text{ t} \times 0,220 \text{ tCO}_2/\text{t}) =$
167.925 tCO₂/año.
 - Impacto sobre las emisiones netas: $(225.000 \text{ t} \times 0,860 \text{ tCO}_2/\text{t}) - (150.000 \text{ t} \times 0,220 \text{ tCO}_2/\text{t}) =$
160.500 tCO₂/año
- Impacto sobre las emisiones considerando efecto del coprocesamiento al 30% de sustitución:
 - Impacto sobre las emisiones brutas: $(225.000 \text{ t} \times 0,882 \text{ tCO}_2/\text{t}) - (150.000 \text{ t} \times 0,220 \text{ tCO}_2/\text{t}) =$
165.450 tCO₂/año.
 - Impacto sobre las emisiones netas: $(225.000 \text{ t} \times 0,801 \text{ tCO}_2/\text{t}) - (150.000 \text{ t} \times 0,220 \text{ tCO}_2/\text{t}) =$
147.225 tCO₂/año

En la tabla resumen al final del documento se observa la interrelación entre los ejes para efectos de cálculo del potencial de disminución de emisiones tanto a nivel bruto como neto.

Por su claro potencial, esta medida se va a recomendar en la Hoja de Ruta.

4.5.5 Las barreras existentes o potenciales

El uso de cementos adicionados es una práctica corriente en Chile y no se identificaron barreras regulatorias más que las limitaciones en el nivel del factor clinker (50% para un cemento puzolánico) prescrito en la norma chilena NCh 148 y que es comparable a los estándares internacionales. En el futuro se puede imaginar que esta limitación podría ser reducida al nivel del cemento siderúrgico (25% clinker) una vez demostradas en Chile las resistencias del cemento con arcilla calcinada.

En términos de disponibilidad de la materia prima (arcilla), las primeras investigaciones en Chile son muy positivas así que la disponibilidad de arcilla no se considera como barrera.

Las barreras que se podrían anticipar serían la falta de conocimiento de esta tecnología por parte de los productores y una resistencia del mercado a utilizar un nuevo tipo de cemento en Chile.

4.5.6 Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera

La introducción de un nuevo cemento en un mercado requiere esfuerzos particulares de marketing que cada empresa cementera implementa con estrategia propia. A nivel internacional la experiencia demuestra que la transparencia y la comunicación son indispensables para llegar a introducir un nuevo

tipo de cemento. Estas medidas se concretizan a través de una combinación de programas de asistencia técnica, de concientización, y de capacitación.

4.5.7 Medida de mitigación recomendada

a. *Demonstrar la factibilidad técnica y económica del cemento con caliza y arcilla calcinada a través de un piloto*

A pesar de que este tipo de cemento ya tiene años de existencia en países como Brasil, la experiencia enseña que se requerirá hacer pruebas técnicas en Chile, con materias primas locales, y con toda transparencia con los principales involucrados (ej. Empresas de ingeniería, constructoras, organismos de control de las obras, Ministerio de Obras Públicas, Cámara Chilena de la Construcción, entre otros). Las principales etapas de un estudio piloto son:

- ✓ Investigar la disponibilidad de arcilla (a una distancia económicamente factible de la planta cementera) cumpliendo con los requisitos técnicos, principalmente el contenido kaolínico
- ✓ Ejecutar los ensayos físicos y químicos sobre el mortero y el hormigón
- ✓ Comprobar la factibilidad económica de la cadena de valor del cemento y hormigón

Casi todos los ensayos se pueden hacer en Chile, salvo eventualmente la calcinación de la arcilla que va a necesitar un calcinador. Hasta que una empresa cementera chilena se dota de un calcinador, las pruebas de arcilla tendrán que ser desarrolladas en otros países de la región (Brasil, Cuba, Ecuador, Guatemala) que ya cuentan con calcinadores.

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.

b. *Asistencia técnica*

Se sugiere que las compañías cementeras aprovechen la experiencia de ingenieros especializados en realizar pruebas técnicas para este tipo de cemento través del mundo. Existe en particular en Cuba un equipo de expertos de la Universidad Central “Marta Abreu” Santa Clara que opera una pequeña unidad de producción de arcilla calcinada que se podría utilizar para calcinar las muestras de arcilla proveniente de Chile, y que asesora a todos los nuevos proyectos a través de América Latina.

c. *Programas de concientización*

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 temas siguientes:

- Qué es el cemento con caliza y arcilla calcinada
- Cuál es la práctica internacional en términos de uso de este tipo de cemento
- Compatibilidad con las normas chilenas
- Cuáles son sus principales ventajas

- Desde un punto de vista ambiental
 - GEI
 - Ahorro en energía / combustible
- Desde un punto de vista económico
 - Costo de producción
 - Volumen en el hormigón
- Cuáles son las características técnicas de este cemento en comparación con los cementos producidos en Chile:
 - resistencia a la compresión
 - resistencia al sulfato y cloruros
 - durabilidad

La audiencia de estas conferencias podría estar compuesta por:

- Sector de formación
 - Universidades
 - Colegio de ingenieros.
- Autoridades a cargo de:
 - Definir / regular las normas de construcción.
 - Definición de diseño de mezcla de hormigón para proyectos del sector público.
 - Control de los sitios de construcción.
- Sector privado a cargo de:
 - Definición de diseño de mezcla de hormigón para distintos proyectos (arquitectos, empresas de ingeniería)
 - Control de los sitios de construcción.
- Usuarios de cemento:
 - Empresas constructoras
 - Empresas productoras de hormigón
- Medios:
 - Revistas técnicas
 - Revistas profesionales.

d. *Programas de capacitación*

El objetivo es asegurarse que la producción y el uso del cemento con caliza y arcilla calcinada se entienda claramente principalmente en términos de formulación, proceso y aplicación.

Ejemplo de curso desarrollado por un equipo de expertos sudamericanos:

Módulo 1

- Arcillas. Clasificación. Caolines. Origen de las arcillas. Principales características. Evaluación de depósitos de arcillas. Composición química y mineralógica
- Actividad puzolánica. Métodos tradicionales. El protocolo R3. Impacto del contenido de caolín. Ventana de activación de las arcillas. Impacto de minerales acompañantes.
- La calcinación. Temperatura y tiempo de residencia óptimo. Parámetros de las arcillas calcinadas. Tecnologías disponibles. Comparación.

Actividad práctica

- Calcinación de arcillas en condiciones de laboratorio. Determinación del contenido de caolín.
- Preparación de muestras, ensayos de reactividad

Módulo 2

- Principales mecanismos de hidratación de los silicatos y aluminatos. Influencia de las adiciones puzolánicas. Cementos Portland-puzolana.
- La sinergia entre las arcillas calcinadas y la caliza. Sistemas ternarios clínker-arcilla calcinada-caliza. Principales productos de reacción.
- Influencia de la molienda. Impacto de intensificadores de molienda. Sulfatación y corrección de álcalis. Diversas formulaciones del cemento LC3. Experiencias en pruebas industriales.

Actividad práctica

- Reactividad de arcillas. Montaje de protocolo R3
 - calorimetría
 - ensayo de agua combinada

Módulo 3

- Fabricación de hormigón con cemento con caliza – arcilla calcinada. Demanda de agua e interacción con superplastificantes. Propiedades de hormigón. Experiencias prácticas. Contenido mínimo de cemento en hormigón. hormigón de altas prestaciones.
- Transporte de iones. Impacto de las arcillas calcinadas en el transporte de cloruros y sulfatos.
- Ingreso y migración de cloruros. Carbonatación. Corrosión. Principales técnicas experimentales.
- Criterios sobre vida útil de servicio. Impacto ambiental. Relación con la economía del carbono. Análisis preliminar de rentabilidad de la inversión. Alternativas de productos en el mercado

La audiencia de estos programas de capacitación podría ser.

- Compañías cementeras
- Compañías hormigoneras
- Compañías constructoras
- Empresas de laboratorios de control del cemento y del hormigón
- Entidades en cargo del diseño de mezcla de hormigón para proyectos del sector público y privado
- Entidades en cargo del control de los sitios de construcción (incluidos los laboratorios públicos)
- Arquitectos
- Empresas de ingeniería
- Universidades técnicas
- Escuelas de ingenieros

e. *Iniciativas por el sector público*

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 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.

4.5.8 Nivel de esfuerzo para superar la barrera

Afortunadamente en Chile las normas regulatorias ya autorizan el uso de cemento con bajo factor clínker hasta 50%. En el futuro se podría considerar reducir este nivel en paralelo con las prácticas internacionales. La única barrera identificada es la aceptación del mercado, se considera que el nivel de esfuerzo para convencer los usuarios y los productores es moderado y se puede muy probablemente mitigar con las medidas propuestas en el capítulo anterior. Por lo tanto, estas medidas van a necesitar un trabajo importante y movilizar a varios actores tanto locales como internacionales. Es probable que se requiera financiamiento en forma de colaboración técnica internacional, sin perjuicio que se considera que las empresas interesadas también podrían financiar estas actividades

4.5.9 Hoja de ruta para la reducción del factor clínker

- Eje: producción de cemento con clínker, arcilla calcinada, y caliza
- Objetivo del eje: reducir el factor clínker a 55%
- Nivel de inversión: entre 8 y 12 millones de EUR (EUR 8,8 y 13,2 millones)
- Ahorro sobre el costo de producción: entre 7,0 y 9,9 EUR /t cemento (USD 7,7 y 10,9)
- Reducción de las emisiones: 190.200 tCO₂ /año (48,7 kg CO₂ /t cemento producido en Chile) sin considerar efecto combinado con coprocesamiento
- Barrera: conocimiento técnico, aceptación del mercado
- Acción requerida: Proyecto piloto, programas de concientización, capacitación, y asistencia técnica
- Tiempo necesario para poder implementar la medida: hasta 5 años

4.6 Reducción del contenido de cemento en el hormigón

Reducir el contenido de cemento en el hormigón es una forma indirecta de reducir las emisiones de CO₂ relacionadas al cemento. Varias medidas, como usar un cemento de calidad más alta, mezclar el hormigón en plantas centralizadas y no directamente en el camión, uso de aditivos específicos, y reducción de la producción artesanal de hormigón en la obra, permitirían reducir el contenido de cemento en el hormigón. En Chile se asume que el 40% del cemento se vende en saco para producir hormigón de manera manual, lo que afecta la optimización del volumen de cemento para llegar a una cierta resistencia del hormigón. Un estudio muy detallado publicado en el 2015 por la Universidad

Politécnica de Hong Kong (Hong Dong, Jaillon, Chu, & Poon, 2015)²⁷ demuestra que producir hormigón en la obra emite más de un 10% adicional de CO₂ que la producción de hormigón de forma centralizada en plantas automatizadas.

4.6.1 Descripción

Según un estudio publicado por la ETH Zurich y la EPFL Lausanne en 2018, el hormigón tiene un bajo coeficiente de carbono incorporado en comparación con otros materiales de construcciones comunes, con un contenido promedio de 200 kg CO₂ /tonelada de hormigón. En comparación, el acero reciclado tiene un contenido promedio de 1.100 kg de CO₂ por tonelada de acero. Sin embargo, para el mismo propósito, se necesitará más hormigón que acero. La cuestión de mejorar el desempeño ambiental es más un desafío en torno al uso eficiente del cemento en el hormigón. Es importante observar el ciclo de vida completo para comprender cómo se usa el cemento en el hormigón.

En Europa, la mitad del cemento se usa en estructuras no reforzadas donde existe un mayor potencial de sustitución sin riesgo de problemas serios de durabilidad. Por el contrario, mejorar el diseño de la mezcla de hormigón armado debe considerarse con más cuidado debido a problemas de seguridad y durabilidad.

4.6.2 Mejores prácticas a nivel internacional

Las mejores prácticas internacionales para la producción de hormigón son:

- Producción industrializada en plantas hormigoneras con proceso electrónico para el peso de los componentes del hormigón
- Uso de áridos y arena lavados para evitar polvo que afecta la adhesión del cemento
- Uso de varias fracciones de áridos (3 o 4)
- Uso de aditivos
- Control de la adición de agua en la obra

Estas prácticas permiten optimizar el contenido del cemento por metro cúbico de hormigón.

Para el productor de hormigón, el kg de cemento / m³ es un parámetro obvio, pero depende del rendimiento del hormigón para ser utilizado como tal. Sin embargo, el trabajo compilado en el informe de Medio Ambiente de las Naciones Unidas sobre cementos ecoeficientes (UNEP Karen L. Scrivener, Vanderley M. John, Ellis M. Gartner, 2016) muestra que se puede usar kg de cemento / m³ / MPa para una resistencia dada del hormigón como un buen indicador de la eficiencia ambiental del hormigón.

Por ejemplo, el informe menciona que para producir un hormigón con 30 MPa de resistencia a 28 días, la mayoría de los productores usan más de 8 kg de cemento por MPa, lo que induce un consumo de 240 kg de cemento, cuando una optimización de la producción permitiría usar únicamente 5 kg por MPa, equivalente a 150 kg de cemento. Estos cálculos no consideran el impacto económico de medidas como el uso de aditivos de alta calidad que podrían encarecer el hormigón.

²⁷ <http://weather.cityu.edu.hk/SEE/WS-Sustain/Jaillon.pdf> y <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.145>

4.6.3 La situación en Chile

La producción de hormigón en Chile es dividida en dos grandes categorías: la producción de hormigón industrializado a través de plantas hormigoneras abastecidas con cemento a granel, y la fabricación manual en el sitio de la obra con cemento en saco. Las entrevistas con productores de hormigón industrializado han permitido detectar prácticas conformes, en su gran mayoría, con los estándares internacionales. Pero el alto nivel de ventas en saco (40%) en comparación de las mejores prácticas internacionales (<10%) demuestran que un gran volumen de hormigón se produce todavía de manera manual sin control correcto de la cantidad de los componentes. Esta práctica induce naturalmente a que el obrero utiliza más material que el necesario para alcanzar a la misma calidad final del hormigón.

4.6.4 Potencial de mejoramiento

De las principales medidas identificadas para reducir el contenido de cemento en el hormigón solamente dos aplican a Chile: (I)) optimizar la fabricación en las plantas hormigoneras centralizadas, y (II) aumentar el uso de hormigón premezclado.

(I) Optimización de la fabricación en planta centralizada

Fabricación de hormigón en plantas centralizadas versus plantas dosificadoras

En una planta dosificadora los componentes del hormigón (cemento, áridos, arena y agua) son cargados en un camión hormigonero que hace la mezcla durante su recorrido hasta la obra. En una planta centralizada la mezcla se hace en una mezcladora centralizada. Según un estudio realizado en el “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées” en Francia (Laboratoire National des Ponts et Chaussées, 2010) fabricar el hormigón en una planta centralizada permite ahorrar 20 kg de cemento por m³ de hormigón. Esta diferencia se explica en el hecho que la mezcla centralizada es más precisa que en un camión, y entonces se puede reducir la cantidad de cemento por una misma resistencia final del hormigón.

El ahorro de cemento de 20 kg / m³ no justifica la inversión para remplazar una instalación existente. Se puede considerar únicamente en el caso de una ampliación de capacidad. *Por lo tanto, esta medida no se va a mencionar en la Hoja de Ruta.*

Optimización de los áridos

La calidad y la limpieza de los áridos y de la arena tiene un impacto directo sobre la calidad de la mezcla. Se asume que áridos lavados y con formulación correcta permite ahorrar hasta 10% del volumen de cemento (ETZ Zurich, 2018).

Según las entrevistas realizadas los productores de hormigón ya están optimizando los áridos así que no se justifica mencionar en la Hoja de Ruta.

Usos de aditivos

Otra forma de reducir el cemento es mediante el uso de aditivos. Estos aditivos reducirán la demanda de agua y, por lo tanto, permitirán que se reduzca la cantidad de cemento mientras se logra una trabajabilidad y resistencia similares. Actualmente en Europa, el 80% del hormigón premezclado y prefabricado se modifica con aditivos. Cembureau estima que el uso de aditivos podría reducir los efectos del hormigón en el calentamiento global en un 10 a 20%.

Según las entrevistas realizadas los productores de hormigón ya están utilizando aditivos así que no se justifica mencionar en la Hoja de Ruta.

(II) Fabricación de hormigón industrializado versus fabricación manual en la obra

La combinación de las medidas precedentes se puede resumir en comparar la producción eficiente de hormigón a través de plantas hormigoneras modernas versus fabricación de hormigón en el sitio de la obra. Según un informe de la UNEP (UNEP Karen L. Scrivener, Vanderley M. John, Ellis M. Gartner, 2016), se asume que se producir hormigón de manera centralizada podría ahorrar entre 20 y 30% de materia prima, incluso cemento. Las ventas totales de cemento en Chile representan 40% de las ventas totales cuando son de menos de 10% por ejemplo en Europa. Esto implica un nivel mucho más importante de producción de hormigón de manera centralizada. Sin llegar hasta los 10% de Europa se podría prever que Chile reduzca sus ventas en sacos del 40% al 30% hasta el 2030. Esta medida implica reducir las ventas en saco de 390.000 toneladas al año (10% de 3.900.000 toneladas de producción anual de cemento) y de remplazarle por ventas de cemento a granel para producir hormigón industrializado. Según el informe de la UNEP, el impacto sobre las emisiones de CO₂ sería entre $20\% \times 390.000 \text{ t} \times 0,581 \text{ tCO}_2/\text{t} = 45.318$ toneladas de CO₂ anuales y $30\% \times 390.000 \text{ t} \times 0,581 \text{ tCO}_2/\text{t} = 67.977$ toneladas de CO₂ anuales tomando en cuenta 581 kg de CO₂ por tonelada de cemento en Chile según la Hoja de Ruta FICEM-ICH.

En términos económicos, un cálculo rápido demuestra que si el costo de inversión en una planta centralizada produciendo 50.000 m³ de hormigón al año es de aproximadamente 500.000 EUR (USD 550.000) dependiendo del precio del terreno y que se puede ahorrar hasta 50 kg mínimo de cemento por m³ de hormigón, el ahorro en cemento será de 2.500 toneladas de cemento al año, equivalente a 375.000 EUR ((USD 412.000) por una tonelada de cemento en saco a 150 EUR (USD 165)) y esto sin tomar en cuenta la diferencia de precio entre cemento en saco y cemento a granel. El ahorro por m³ de hormigón sería de 50 kg sobre una tonelada de cemento a 150 EUR = 7,5 EUR /m³ (USD 8,25) de hormigón.

Esto implicaría la necesidad de regular la producción manual de hormigón, comenzando por las zonas urbanas.

Esta importante medida se va a incorporar en la Hoja de Ruta.

4.6.5 Las barreras existentes o potenciales

No se identificaron barreras regulatorias para la reducción del contenido de cemento en el hormigón. Las normas prevén una cantidad mínima por razones de calidad que son compatibles con los estándares internacionales. Técnicas modernas de producción de hormigón consistiendo en usar aditivos, limpiar los áridos, utilizar diferentes grados de áridos, utilizar plantas hormigoneras premezcladoras y centralizadas, son del orden de la optimización del costo de producción y su implementación no se enfrenta a ninguna barrera de gestión. Por lo tanto, reducir la producción de hormigón en la obra necesitaría la intervención de las Autoridades, por ejemplo, prohibiendo salvo ciertas condiciones la producción de hormigón manual en zona de alta densidad urbana.

4.6.6 Las mejores soluciones internacionales disponibles para superar la barrera

En los países desarrollados casi la totalidad del hormigón se produce en plantas automatizadas y no de manera manual. Esto no solamente por razones económicas (las plantas automatizadas consumen menos materias primas), sino que también ambiental (producir hormigón en la obra genera emisiones de polvo y residuos de hormigón en el suelo). Y no solamente en los países desarrollados; por ejemplo, China incluyó la industrialización del uso de cemento en el Programa Nacional de Cambio Climático de China al tratar de "desalentar la producción de cemento en bolsas y alentar el desarrollo de cemento a granel". En octubre de 2003, el gobierno central chino emitió el Decreto 341, prohibiendo las operaciones de mezcla de hormigón en sitios de trabajo en 124 ciudades de todo el país. En junio de 2007, las operaciones de mezcla de mortero en sitios de trabajo fueron prohibidas en diez grandes ciudades, una iniciativa que se extendió a 33 ciudades en 2008 y 84 ciudades a partir de julio de 2009 (UNEP Karen L. Scrivener, Vanderley M. John, Ellis M. Gartner, 2016).

4.6.7 Medida de mitigación recomendada y nivel de esfuerzo requerido para superar las barreras

Parece difícil en el contexto actual que las Autoridades tomen medidas regulatorias para limitar la producción de concreto manual. Se sugiere que se haga a través de medias basadas en incentivos, como por ejemplo:

- (i) un descuento sobre los impuestos relacionados a la vivienda para métodos de construcción que reducen las emisiones, (y obviamente la producción de concreto de manera automatizada es una medida relevante) y
- (ii) a través de campañas de concientización para que los actores claves de la construcción (ingenieros, arquitectos) sean conscientes de las ventajas del hormigón automatizado,

La medida es fácil de implementar, pero va a necesitar de 2 a 3 años para producir sus efectos.

4.6.8 Hoja de ruta para la reducción del cemento en el hormigón

- Eje: reducción del cemento en el hormigón
- Objetivo del eje: reducir las ventas de cemento en saco de 40% a 30%
- Nivel de inversión: aproximadamente 500.000 EUR (USD 550,000) para producir 50.000 m³ de hormigón o hasta 13 millones de EUR (USD 14 millones) si se considera que 10% del consumo total de cemento (390.000 toneladas) va a ser suministrado a granel, lo que va a permitir producir unos 1.300.000 m³ de hormigón en plantas centralizadas
- Ahorro sobre el costo de producción: aproximadamente 7,5 EUR/m³ (USD 8,25) de hormigón (según los ECRA papers)
- Reducción de las emisiones: entre 12 y 17 kg CO₂/t cemento (entre 45.320 y 67.980 toneladas de CO₂ al año)
- Barrera: conocimiento técnico, aceptación del mercado
- Acción requerida: Programas de concientización. Negociación de un descuento sobre los impuestos relacionados a la construcción sostenible
- Tiempo necesario para poder implementar la medida: hasta 4 años

5. ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES PROYECTADO HASTA 2030

Como parte del análisis multi-criterio, la evaluación de diferentes opciones de mitigación también considera los costos de abatimiento de las emisiones de GEI, y al potencial de dichos abatimientos. Los costos de abatimiento describen los costos para la reducción de una tonelada de CO₂, o el monto equivalente para otro GEI, mediante una medida de mitigación específica. Los costos de abatimiento corresponden a consideraciones importantes para el diseño de políticas climáticas y el emprendimiento de acciones concretas de mitigación. Ellas revelan la costo-eficiencia de tecnologías o proyectos individuales que pueden lograr determinado volumen de reducción de emisiones. Por lo tanto, los costos de abatimiento y el potencial de mitigación relativos a diferentes tecnologías y/o medidas son frecuentemente ilustradas como una curva de costo marginal de abatimiento (MAC por su sigla en Inglés). Las estimaciones de costos de abatimiento son frecuentemente basadas en opiniones expertas y en modelos que utilizan supuestos basados en la experiencia y en los objetivos climáticos, las emisiones de línea de base, tasas de descuento, opciones tecnológicas futuras, entre otras (Castro, Paula; 2010, pág. 4).

Las opciones de abatimiento son presentadas en orden de nivel de costos (orden de mérito de menor a mayor): desde la medida con el menor costo marginal de abatimiento en la izquierda, hasta la de mayor costo en la derecha. Los costos marginales considerados con los costos incrementales incurridos con la implementación de cada medida, respecto de la línea de base. La curva MAC debería, sin embargo, ser interpretada con precaución, debido a su potencial “shortcomings”. Por ejemplo, es importante entender los supuestos tras las curvas MAC. Las decisiones políticas y económicas pueden ser complejas y la curva MAC solamente representa un resumen simplificado de la realidad. Por esto sus resultados deben ser tratados cuidadosamente y deben ser considerados solamente como una indicación de las opciones de mitigación que aparecen como costo-efectivas y potenciales.

La estimación de la curva MAC para el sector cemento en Chile cubre el periodo 2020 – 2030. Los cálculos están basados en una serie de supuestos que se muestran a continuación.

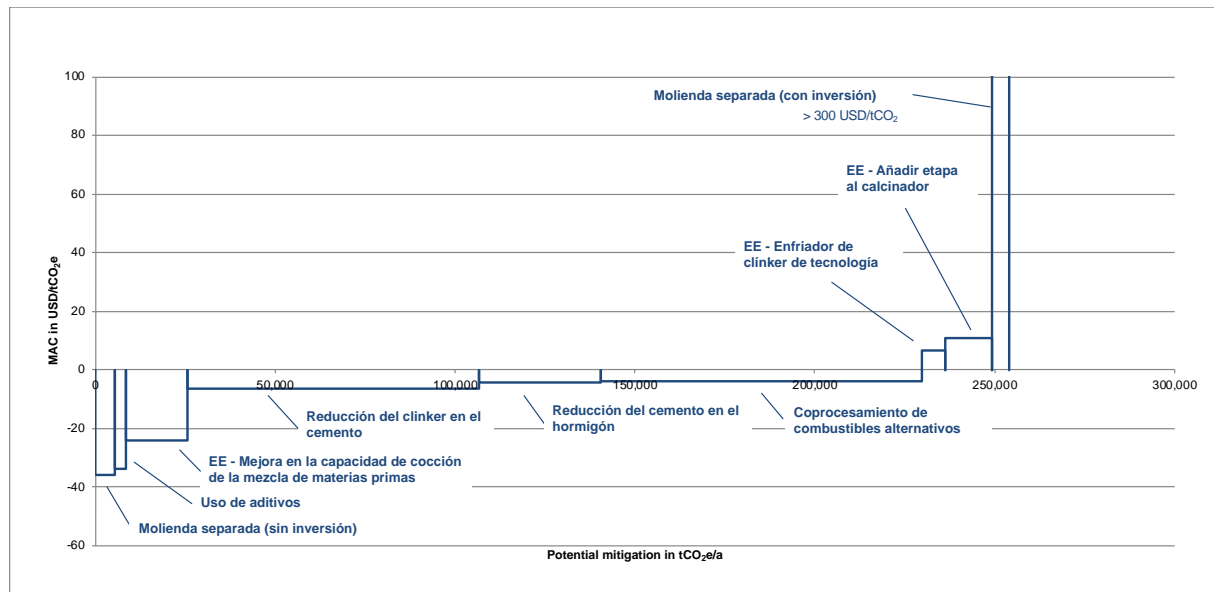
Tabla 5: Supuestos para el cálculo de MAC

Unidad		Valor	Comentarios	Fuente
Eficiencia Energía Térmica				
<i>Eficiencia Térmica (2017)</i>	<i>MJ/ton clínker</i>	3.550	KPI Energía Térmica (GNR)	Cuestionario
Sustitución coprocesamiento				
<i>Sustitución (2017)</i>	%	12,6%	Sustitución térmica real	Cuestionario
<i>Sustitución (2030)</i>	%	30%	Proyección sustitución en base a neumáticos y CDR	
Producción cemento				
<i>2017</i>	<i>Mt/a</i>	3,9		
<i>2030</i>	<i>Mt/a</i>	3,9		
Factor Clínker				
<i>Factor clínker (actual)</i>	<i>% cli/cem</i>	65%	2017	Cuestionario
<i>Factor clínker (2030) - LC3</i>	<i>% cli/cem</i>	55%		

	Unidad	Valor	Comentarios	Fuente
Factores de Emisión / Poder calorífico				
<i>Factor de emisión por t cemento (Chile)</i>	<i>tCO₂/t cemento</i>	0,581	Valor 2014	Hoja de Ruta FICEM-ICH
<i>Emisiones directas proceso</i>	<i>tCO₂/t clinker</i>	0,525	Valor por defecto IPCC	IPCC
<i>Factor de emisión de la red eléctrica</i>	<i>tCO₂/MWh</i>	0,600	GEF	IGES, 2018
<i>Petcoke</i>	<i>tCO₂/TJ</i>	97.500	Valor por defecto IPCC	2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chpt. 1, Page 1.23
<i>Poder calorífico Petcoke</i>	<i>TJ/t</i>	0,033	Valor por defecto IPCC	2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chpt. 1, Page 1.18
<i>Poder calorífico CDR</i>	<i>MJ/kg</i>	15.000	Sustitución 22,5%	
<i>Poder calorífico neumáticos</i>	<i>MJ/kg</i>	30.000	Sustitución 7,5%	
Precios energía				
<i>Energía Eléctrica</i>	<i>USD/kWh_{el}</i>	0,04	última información disponible	
<i>Petcoke</i>	<i>USD/t</i>	84,00	Última información disponible	
Costo combustibles alternativos				
<i>Costo puesto en planta</i>	<i>USD/t</i>	0,00	Supuesto basado en la experiencia	
<i>Costo arcilla calcinada</i>	<i>USD/t</i>	5	Supuesto basado en experiencia experta	
<i>Yeso</i>	<i>USD/t</i>	2	Supuesto basado en experiencia experta	-
<i>caliza</i>	<i>USD/t</i>	2	Supuesto basado en experiencia experta	
Supuestos financieros				
<i>Tasa de descuento / costo capital</i>	<i>%</i>	8,3%	Valor por defecto	Global dataset UNFCCC (CDM Tool 27 (Version 9.0)
<i>Periodo de evaluación</i>	<i>años</i>	10		
<i>Tasa inflación</i>	<i>%</i>	4%	Supuesto basado en estadística	
<i>Tipo de cambio</i>	<i>USD/EUR</i>	1,10	Efectivo a Octubre 2019	http://www.oanda.com

Además de los principales supuestos, (costos e impactos principalmente), la tasa y tiempo de descuento son asuntos relevantes en los cálculos. La tasa de descuento es utilizada para reflejar los niveles (tasas) de interés a las que las medidas de mitigación están sujetas, además de cualquier riesgo financiero que sea aplicable al país donde las inversiones tienen lugar. Para la tasa de descuento que refleje la realidad del sector privado, se utiliza el típico mínimo retorno de equity esperado.

Figura 12: Curva de costos marginales de abatimiento



Como se puede observar, la mayor parte de las opciones de mitigación tienen un costo marginal de abatimiento negativo, lo que significa que son económicamente viables. La opción más atractiva bajo este criterio es la “molienda separada” (no requiere inversión) y el “uso de aditivos”, así como la “reducción de cemento en el hormigón”, “coprocesamiento” y la “reducción del clinker en el cemento”. La implementación integral de las acciones de mitigación no se logrará de una vez en el corto plazo. Los potenciales estimados de mitigación, relativos a las acciones priorizadas y sus respectivos volúmenes de mitigación y costos, asumen una implementación total de todos los ejes hacia 2025. Esto dependerá obviamente de diferentes aspectos tanto políticos como económicos.

Tabla 6: Impacto potencial de las medidas de alta prioridad, sin considerar interacción entre ellas

Medida	Ahorro de emisiones	Base de cálculo anual	Ahorro por eje ²⁸
Uso de combustible alternativo	59 kg CO ₂ /t clinker	2,0 Mt de clinker	hasta 119.000 tCO ₂ /año (netas)
Producción de cementos a base de arcilla calcinada	48,7 kg CO ₂ /t cemento	3,9 Mt cemento	hasta 190.000 tCO ₂ / año
Molienda separada	0,7 – 1,6 kg/t cemento	3,9 Mt de cemento	2.700 – 6.200 tCO ₂ / año
Producción centralizada de hormigón	12 – 17 kg CO ₂ /t cemento	3,9 Mt de cemento	45.000 – 68.000 tCO ₂ / año

²⁸ Efecto individual máximo sin inter-relación entre ejes

Como indica el título de la tabla, las reducciones potenciales que se observan en la Tabla 5 son solamente referenciales, ya que reflejan el máximo alcanzable en forma aislada, sin la interrelación entre los diferentes ejes.

La tabla siguiente muestra el efecto combinado de los diferentes ejes si se llevan a su máximo potencial individual, coexistiendo unos con otros. Se observa en este caso que el potencial máximo de la producción de cemento con arcilla calcinada disminuye tanto para emisiones brutas como netas (principalmente netas), ya que se combina con el efecto del coprocesamiento que ya implica una disminución en la emisión específica por tonelada de clínker. Con esto, el potencial de disminución para emisiones directas Alcance 1 que se considera aplicable, es el que se observa en la Tabla 7.

Para el caso de los otros ejes, el cálculo potencial se ha basado en el promedio del rango establecido por la referencia internacional (ECRA).

Tabla 7: Disminución de emisiones 2017-2030 (tCO₂/año) con todos los ejes a su máximo potencial

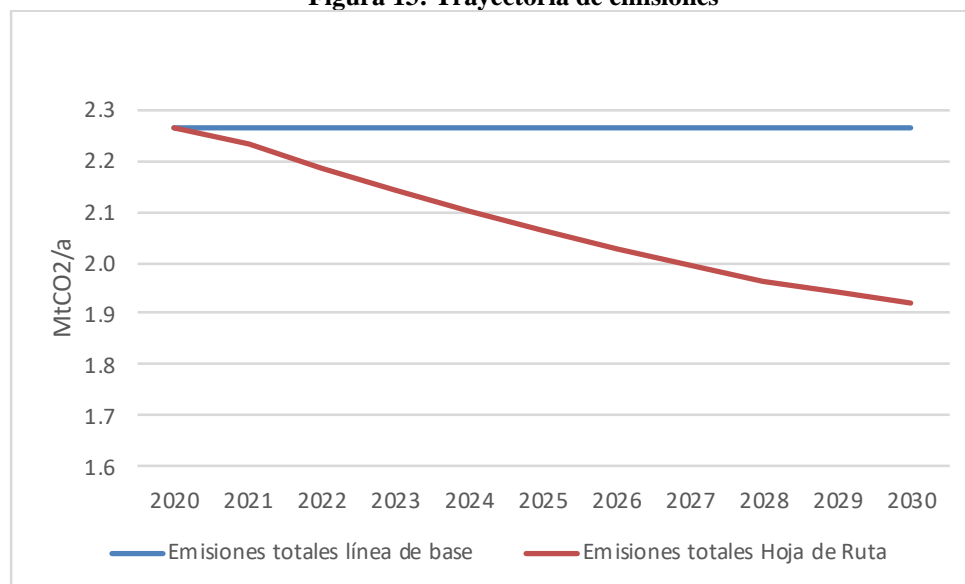
Emisiones Directas (Alcance 1)					
	Potencial Disminución emisiones - Brutas	Potencial Disminución emisiones - Netas	Base de cálculo	Total Potencial Disminución emisiones - Brutas	Total Potencial Disminución emisiones - Netas
Coprocesamiento	kg CO ₂ /t clínker	kg CO ₂ /t clínker	Mt clínker	tCO ₂ /año	t CO ₂ /año
	10,6	59,3	2,0	21.200	118.600
Producción de Cemento Arcilla Calcinada	kg CO ₂ /t cem Arcilla calcinada	kg CO ₂ /t cem Arcilla calcinada	Mt cemento Arcilla Calcinada	tCO ₂ /año	tCO ₂ /año
	331	294	500.000 ²⁹	165.450	147.225
Total parcial potencial (tCO ₂ /año)				186.650	265.825
Emisiones Indirectas (Alcance 2)					
	Potencial Disminución emisiones		Base de Cálculo	Total Potencial Disminución emisiones	
	kg CO ₂ /t cem		Mt cemento	tCO ₂ /año	
Molienda Separada	1,15		3,9	4.485	
Total parcial potencial (tCO ₂ /año)				4.485	

²⁹ Considerando que se reemplaza 500.000 t de cemento OPC por 500.000 t de cemento a base de arcilla calcinada (12.8% de la producción total de cemento)

Otras Emisiones			
	Potencial Disminución emisiones	Base de Cálculo	Total Potencial Disminución emisiones
	kg CO ₂ /t cem	Mt cemento	tCO ₂ /año
Producción Industrializada de Hormigón	14,5	3,9	56.550
Total parcial potencial (tCO₂/año)			56.550
Total parcial potencial (tCO₂/año) - netas			326.860

A través del tiempo, el potencial de mitigación alcanza hasta un 15% para 2030, comparado con la situación actual (2017)³⁰. Como resultado, el sector cementero podría reducir desde casi 2,3 MtCO₂/año a 1,9 MtCO₂/año.

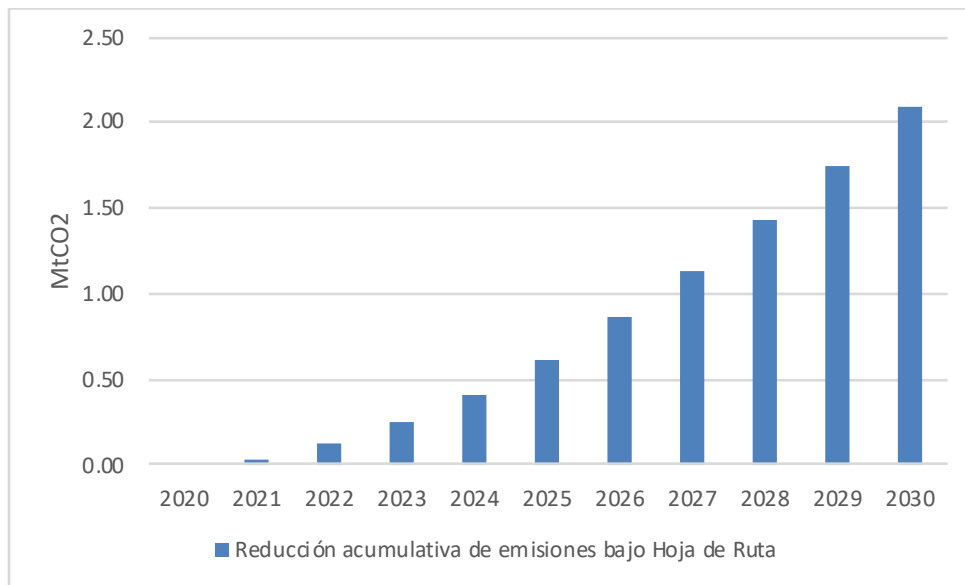
Figura 13: Trayectoria de emisiones



La reducción total de emisiones relativa a los 4 ejes principales identificados, puede alcanzar un acumulado, a 2030, de hasta 2,1 MtCO₂.

³⁰ La situación actual de la industria, bajo el escenario “business as usual” se asume como el desarrollo de la línea de base. Dada la actual sobrecapacidad en la producción de clínker y el estándar de competitividad comparable con las mejores tecnologías disponibles y mejores prácticas (Ej. Promedio de consumo térmico, factor clínker, etc), no se esperan mayores desviaciones respecto del escenario “business as usual”, sin intervención política o regulatoria. Las cifras e indicadores correspondientes a 2017 corresponden a la información más actualizada para el sector.

Figura 14: Reducción acumulativa de emisiones hasta 2030



6. PLAN DE ACCIÓN PARA EL DESARROLLO DE BAJAS EMISIONES EN SECTOR CEMENTERO CHILENO

La siguiente tabla resume las medidas propuestas y su nivel de prioridad. Los detalles de costo de la versión, costo de producción, y nivel de reducción de las emisiones son de los papers de la ECRA, salvo que se precise otra fuente.

Tabla 8: Resumen de Acciones y Prioridades

Eje	Medida	Nivel de inversión	Impacto en el costo de producción	Periodo de recuperación	Nivel de reducción de CO ₂	Prioridad	En la Hoja de Ruta
A nivel de clínker	Coprocesamiento de combustibles alternativos	USD 20 a 25 millones para pre-procesamiento (a ser cubierto por la industria de gestión de residuos) y 12 – 16 millones para recepción y alimentación en plantas (a ser cubierto por empresas cementeras)	-1,6 USD /t clínker (base 2017)	Periodo de recuperación entre 3 y 7 años	59 kg CO ₂ /t clínker (Netas) (Equivalentes a 39,5 kg CO ₂ /t cem a un factor clínker del 67%)	Alta	SI
	Mejora de la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas	0	-USD 0,07 – 0,5 /t cemento	NA (no hay inversión)	5 kg CO ₂ /t cemento (FICEM-ICH)	Media	Se recomienda asesorar individualmente
	Enfriador clínker eficiente	Modernización: USD 1,1 – 3,3 millones por enfriador	-USD 0-0,55 /t cemento	Entre 3 y 5 años No factible (> 20 años)	4 kg CO ₂ /t cemento (FICEM-ICH)	Media si modernización.	NO

Eje	Medida	Nivel de inversión	Impacto en el costo de producción	Periodo de recuperación	Nivel de reducción de CO ₂	Prioridad	En la Hoja de Ruta
		Nueva inversión: USD 16,5 - 22 millones				No factible si nueva inversión	
	Aumentar capacidad de los hornos	hasta 285 millones por planta	-USD 1,5 - 1,9 /t cemento	No factible (> 20 años)	13 - 18 kg CO ₂ /t cemento	La sobrecapacidad en Chile no lo justifica.	NO
	Añadir etapa al calcinador	USD 5,5 - 9 millones	-USD 0,22 – 0,28 /t cemento	No factible (> 20 años)	7 -9 kg CO ₂ /t cemento	La sobrecapacidad en Chile no lo justifica.	NO
A nivel del cemento	Producción de cemento a base de arcilla calcinada	USD 9 - 13 millones por unidad de producción de 1 millón de toneladas en una planta integrada existente	Entre USD 7.7 (según www.LC3.ch) y USD 10,9 /t cemento según ECRA	< 5 años	147.000 t CO ₂ netas al año, equivalente a 38 kg CO ₂ /t cemento a una producción total similar a la actual (3,9 Mt cemento) (considerando Implementación de coprocesamiento)	Alta	SI
	Molienda separada	0 si hay suficiente capacidad, hasta 38 millones por molino si hay que comprar nuevos	USD 0,04 – 0,40 /t cemento	NA si no hay inversión. No factible si necesita nueva molienda (>20 años)	0,7-1,6 kg CO ₂ /t cemento (indirecto) 2.730 – 6.240 tCO ₂ /año	Alta	SI
	Uso de aditivos por la molienda	0 (se considera únicamente el caso donde no se necesita inversiones y que	USD 0,04 – 0,22 /t cemento	NA (no hay inversión)	0,3 – 1,1 kg CO ₂ /t cemento (indirecto)	Alta por las plantas que no lo hacen ya	Se recomienda asesorar individualmente

Eje	Medida	Nivel de inversión	Impacto en el costo de producción	Periodo de recuperación	Nivel de reducción de CO ₂	Prioridad	En la Hoja de Ruta
		hay sobre capacidad existente)					
	Molinos verticales con separador	USD 22 – 33 millones	USD 0,55 – 1,4 /t cemento	No factible (> 20 años)	2,6 – 6,8 kg CO ₂ /t cemento (indirecto)	La tecnología actual de los molinos en Chile no justifica reemplazarle	NO
A nivel del hormigón	Aumento del hormigón premezclado versus fabricación manual en la obra	USD 550.000 para una planta de 50.000 m ³ anual de hormigón. El ahorro sería de 50 kg /m ³ de hormigón, equivalente a USD 375.500 de ahorro al año		< 2 años	12 – 17 kg CO ₂ /tonelada de cemento	Alta	SI

Como se muestra en la tabla, la inversión total requerida para la implementación de las medidas recomendadas tanto para producción de clínker como de cemento (uso de combustible alternativo, producción de cementos a base de arcilla calcinada, molienda separada) totalizarían 20 a 30 millones de USD. De acuerdo con los “ECRA papers”, estas medidas podrían tener un potencial de reducción de costos operacionales entre 9 y 12 USD/t cemento. La viabilidad económica y retornos de la inversión dependen de la factibilidad individual (determinada en base a estudios de factibilidad) de cada proyecto (medida) específico.

La siguiente tabla resume las medidas propuestas y sus barreras y medida de mitigación únicamente para las medidas incluidas en la Hoja de Ruta.

Tabla 9: Lista de Acciones, barreras y medida de mitigación para las medidas recomendadas en la Hoja de Ruta

Eje	Medida	Barrera a gestionar	Nivel esfuerzo requerido (menor, moderado, mayor)	Medida de mitigación recomendada	Probabilidad de superar la barrera y tiempo esperado (muy probable, probable, improbable)	Tipo de asistencia nacional o internacional necesaria, si es que se identifica la necesidad
A nivel de clínker	Coprocesamiento de combustibles alternativos	Largos y complejos procesos de obtención de permisos para el coprocesamiento	mayor	Acuerdo de cooperación público-privado (APL por ejemplo según lo descrito en sección 4.2.7 b.) y Capacitación a autoridades	Probable, 12 – 24 meses, luego permanente, es decir, mantención de programas de capacitación a autoridades.	No
		Falta de reconocimiento de la fracción no reciclable de envases y embalajes para valorización energética en la Ley REP, que corresponde a una de las principales oportunidades de crecimiento	mayor	Cooperación público-privada en base a una gestión sectorial / gremial	Probable, 6 meses	No
		Falta de conocimiento técnico de algunas cementeras	moderado	Involucramiento temprano con SIGs REP	Probable, 12 – 24 meses, luego permanente	No
		Falta de conocimiento técnico de algunas cementeras	moderado	Programa capacitación	Muy probable, 12 meses, luego se repite anualmente	No
		Dificultad de convencer sobre las ventajas del coprocesamiento a algunas ONG y comunidades	mayor	Implementación de proyectos de valor	Probable, 12 meses para primera	

Eje	Medida	Barrera a gestionar	Nivel esfuerzo requerido (menor, moderado, mayor)	Medida de mitigación recomendada	Probabilidad de superar la barrera y tiempo esperado (muy probable, probable, improbable)	Tipo de asistencia nacional o internacional necesaria, si es que se identifica la necesidad
				compartido con comunidades	implementación, luego permanente	
	Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas	Sin información	NA	NA	NA	NA
A nivel del cemento	Producción de cemento a base de caliza y arcilla calcinada	Conocimiento de la tecnología Aceptación del mercado	moderado	Proyecto piloto, programas de concientización, capacitación, y asistencia técnica	Muy probable. 12 – 18 meses	Asistencia técnica durante la fase de prueba técnica y programas de capacitación al uso de este cemento Fuente potencial de financiamiento: financiamiento climático internacional
	Molienda separada sin inversión	Prohibición de la molienda separada	menor	Demostrar al regulador las consecuencias en términos de GEI	Muy probable 12 meses	No
	Uso de aditivos por la molienda	Sin información	NA	NA	NA	No

Eje	Medida	Barrera a gestionar	Nivel esfuerzo requerido (menor, moderado, mayor)	Medida de mitigación recomendada	Probabilidad de superar la barrera y tiempo esperado (muy probable, probable, improbable)	Tipo de asistencia nacional o internacional necesaria, si es que se identifica la necesidad
A nivel del hormigón	Aumento del hormigón premezclado versus fabricación manual en la obra	Falta de concientización de los actores claves de la construcción de las ventajas de la producción de concreto automatizado. Falta de incentivo de la producción responsable de concreto	mayor	Iniciar programas de concientización sobre las ventajas de la producción de concreto automatizado. Proponer descuentos sobre los impuestos relacionados a la vivienda para construcción responsable.	Muy probable	Asistencia técnica para los programas de concientización

La siguiente tabla resume el plan de acción para el desarrollo de bajas emisiones en sector cementero chileno:

Tabla 10: Plan de acción para las medidas recomendadas en la Hoja de Ruta

Eje	Medida	2020	2021	2022	2023	2024	2025
A nivel de clínker	Coprocesamiento de combustibles alternativos	Diseño, Negociación e implementación Acuerdo de Producción Limpia					
		Coprocesamiento como alternativa de valorización para E&E					
		Capacitación sector público en coprocesamiento				Capacitación sector público en coprocesamiento	
		Diseño Proyectos de valor compartido	Implementación Proyectos Valor Compartido				
		Capacitación y evaluación técnica y estratégica empresas cementeras			Capacitación y evaluación técnica y estratégica empresas cementeras		
		Involucramiento con SIGs REP					
		Inversión 20-25 Mio USD en pre-procesamiento					
			Inversión 4,2 Mio USD en Plantas	Inversión 2,8 Mio USD en Plantas	Inversión 2,8 Mio USD en Plantas	Inversión 2,1 Mio USD en Plantas	Inversión 2,1 Mio USD en Plantas
			Sustitución 16%	Sustitución 20%	Sustitución 22%	Sustitución 25%	Sustitución 27%
	Mejora en la capacidad de cocción de la mezcla de materias primas	Estudios de factibilidad caso a caso					
			Implementación				
A nivel del cemento	Producción de cemento a base de caliza y arcilla calcinada	Estudios de factibilidad proyecto piloto					

Eje	Medida	2020	2021	2022	2023	2024	2025
			Ejecutar proyecto piloto				
				Programas de concientización, capacitación			
					Ejecución progresiva de las inversiones para llegar al objetivo de la Hoja de Ruta		
	Molienda separada sin inversión	Discusión con las autoridades para cancelar la restricción legal					
			Implementación				
	Uso de aditivos por la molienda	Discusión con las autoridades para cancelar la restricción legal					
			Implementación				
A nivel del hormigón	Aumento del hormigón premezclado versus fabricación manual en la obra	Programas de concientización. Negociación de un descuento sobre los impuestos relacionados a la vivienda para construcción responsable, por ejemplo descuento sobre las contribuciones de bienes raíces					
			Por los 3 próximos años seguimiento de la concientización.				

7. EFFECTO POTENCIAL DE UN PRECIO AL CARBONO SOBRE LA COMPETITIVIDAD DE LA INDUSTRIA CEMENTERA

Como se mencionó anteriormente, la industria chilena sufre de dos desventajas particulares:

- Un alto costo de producción debido a la mala calidad y baja disponibilidad de su principal materia prima, la caliza (hasta USD 18 por tonelada cuando no supera los USD 4 en la mayoría de los países), y
- Precios de importaciones de clínker y cementos artificialmente bajos debido al bajo costo del flete de retorno desde Asia en barcos utilizados para exportar materias primas chilenas como el cobre.

Esta situación se confirma por el hecho que la industria cementera chilena no genera márgenes suficientes para bajar su precio de ventas y limitar estas importaciones que alcanzan el 40% del consumo total de cemento y clínker en Chile. Resulta que cualquier costo adicional, incluso de un precio al carbono como el impuesto verde, que no se aplique igualmente a las importaciones, obligará probablemente a las tres grandes compañías integradas a detener la producción de clínker en Chile y de recurrir a importaciones.

La necesidad de reducir las emisiones de carbono para alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático requiere penalizar dichas emisiones de una forma u otra. Se puede clasificar a los países a nivel mundial en tres grupos principales según su acción en términos de fiscalización y desincentivo de las emisiones de carbono:

- (1) Los que no imponen ningún tipo de penalización
- (2) Los que imponen una tasa directa sobre las emisiones
- (3) Los que tienen un sistema de “cap and trade” tipo Emissions Trading Scheme (ETS) donde se autorizan las emisiones hasta un cierto nivel. De manera muy simplificada, este sistema implica que los que emiten sobre este límite tienen la oportunidad de recurrir al mercado comprando “permisos de emisiones” de los que emiten menos que el límite.
- (4) Los que tienen un mix de (2) y (3) y / o incorporando mecanismos de flexibilidad como la posibilidad de poder compensar emisiones con certificados de reducción.

El mayor desafío al que se enfrentan estos sistemas de fiscalización de las emisiones son las fugas de carbono. Por ejemplo, un usuario de un producto emisor de carbono (por ejemplo, cemento), ubicado en un país donde existe una tasa aplicada a la emisión de carbono, recurrirá a importaciones desde países donde no se apliquen estas tasas. La mayoría de los sistemas ETS incluyen un mecanismo para mitigar este riesgo: la asignación gratuita de derechos de emisiones para las industrias con mayor riesgo de generar fugas de carbono

Una forma eficiente de evitar estos resultados indeseados y de mantener una competencia equilibrada entre importaciones y producción local es la de implementar un BCA (Border Carbon Adjustment). De manera simplificada, el BCA consiste en imponer a cada producto importado la diferencia entre el precio

del carbono que se aplica localmente al producto importado y el precio aplicado en el país de origen. La EU está preparando una reforma de sus ETS que incluirá un BCA³¹. Obviamente esta medida va a necesitar la aprobación del WTO.

En conclusión, la recomendación para la industria cementera chilena es de implementar una fiscalización de las emisiones a base de un impuesto directo o de un ETS pero con BCA. En el caso del impuesto directo, éste debiera ser aplicado tanto a producción nacional como a importaciones. Si se trata de un ETS se sugiere no desarrollar un nuevo sistema para evitar los esfuerzos considerables en términos de tiempo y de costo, sino que adaptar uno de los sistemas existentes a la realidad chilena. De manera más precisa se recomendaría explorar un sistema ETS de tipo California o Canadá que, a diferencia del sistema europeo, tienen como ventaja principal de calcular las asignaciones gratuitas a base de una referencia histórica más corta. Este ETS podría inicialmente incluir a los países de la Alianza Pacífico.

En cuanto a definir el nivel de un impuesto al carbono, se tienen que considerar dos casos:

- Si el precio al carbono no se aplica a las importaciones, cualquier nivel de precio puede llegar a cerrar las unidades de producción de clínker en Chile.
- Si se aplica a las importaciones, el nivel de aceptación no dependerá de la industria, sino que del mercado. En otros términos, si se aplica un precio al carbono de 10 USD /t CO₂, el impacto sobre el precio de venta del cemento será de USD 5.8 /t cemento si se consideran las emisiones de 2014 (581 kg /t cemento) o de USD 4.9 /t cemento tomando en cuenta el nivel de emisión anticipado en la Hoja de Ruta (493 kg /t cemento).

Se puede mencionar un trabajo (tesis) detallado sobre el tema impuesto verde en Chile de Marcelo Sánchez Ramírez de la Universidad Técnica Federico Santa María:

“ANÁLISIS DE ESCENARIOS ANTE UNA EVENTUAL MODIFICACIÓN EN EL CRITERIO DE AFECCIÓN AL IMPUESTO VERDE PARA FUENTES FIJAS”

Se mencionó durante las discusiones el posible impacto del combustible alternativo sobre el costo de producción, teniendo como objetivo, en caso de que este impacto sea positivo, de compensar la diferencia por un precio al carbono. El ejemplo siguiente es a base de números reales de Egipto:

- Energía térmica requerida para producir una tonelada de clínker 740 Mcal/t de clínker.
- Costo promedio de un Mcal de carbón: 0,02 USD/Mcal a base del costo de carbón en Egipto en Diciembre de 2019.
- Costo del combustible: 740 Mcal x 0,02 USD/Mcal = 14,8 USD/t de clínker.

³¹ <https://www.euronews.com/2019/12/19/the-eu-s-green-deal-is-ambitious-but-its-success-rides-on-its-most-controversial-part-view>

- Asumiendo un impuesto verde de 10 USD /tCO₂ sobre el clinker y emisiones de CO₂ de 820 kg /t de clinker, el costo de este impuesto sería de 10 USD x 0,82 tCO₂ /t clinker = 8,2 USD/t clinker.
- Si queremos absorber este aumento del costo de producción de 8,2 USD /t de clinker a través de una reducción del costo de combustible, este mismo costo de combustible tiene que alcanzar 14,8 USD/t clinker (costo actual) menos impacto del impuesto verde de 8,2 USD /t = 6,6 USD /t clinker. Como se necesitan 740 Mcal para producir una tonelada de clinker el objetivo de costo de combustible será de 6,6 USD / 740 Mcal = 0,009 USD/Mcal.
- Asumiendo el objetivo de tasa de sustitución de la Hoja de Ruta (30%), el costo del Mcal del combustible de sustitución tendrá que (30% x costo del combustible alternativo + 70% costo del carbon) = 0,009 USD/Mcal. Como se ha explicado antes, el costo del carbón es de 0,02 USD/Mcals, por lo que el costo del combustible alternativo tendrá que ser POSITIVO de 0,016 USD/Mcal para que el promedio resulte en 0,009 USD/Mcal.
- Quiere decir que si se considera un residuo con 3,000 Mcal por tonelada de residuo, a la cementera se le debería pagar 3.000 Mcal x 0,016 USD/Mcal = 48 USD/tonelada de residuo. Sumando el costo de almacenamiento y coprocesamiento, el total llegará a casi 60 USD/tonelada de residuo que la cementera tendrá que recibir. Esto no parece factible para el contexto de Chile.

En todo caso se recomienda no implementar ningún tipo de sistema que lleve a la industria chilena a pagar un impuesto que no sería igualmente aplicado a las importaciones. Se recomienda que las autoridades exploren la aproximación europea para ver bajo qué condiciones un BCA sería aceptable por el WTO.

8. CONCLUSIONES

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 disponible a este costo, volumen, y características técnicas. La industria cementera es responsable de 8% de las emisiones antrópicas de CO₂. Es decir que es muy importante para la gestión del cambio climático buscar soluciones que permitan reducir las emisiones relacionadas al uso del cemento.

Según los datos del GNR el nivel promedio de emisiones por tonelada de cemento bajó de manera significativa entre 1990 y 2010, pero esta reducción fue mucho más limitada entre el 2010 y el 2017. Eso se debe (I) a que 60% de las emisiones generada por el clínker, el componente más importante del cemento, provienen de la reacción química característica de la fabricación del clínker, y (II) que se está acercando del nivel máximo de tecnología económicamente realista que se puede alcanzar para reducir las emisiones de CO₂ en el cemento. Nuevas tecnologías, como la captura de carbono, no son todavía factibles económicamente para ser implementadas a escala industrial por la industria cementera.

A base de este mismo informe GNR, se destaca que la industria cementera chilena tiene un bajo nivel de emisiones de CO₂ por tonelada de cemento gracias a un contenido de clínker en el cemento entre los más bajos del mundo. Esto se debe principalmente al hecho de que no solamente Chile dispone de materias de reemplazo al clínker como las escorias de alto horno, las cenizas, o la puzolana natural, sino que también al hecho de que la industria cementera comenzó tempranamente a acostumbrar al mercado a estos tipos de cementos con adiciones y bajo contenido de clínker, siendo la reticencia del mercado a nuevos tipos de cemento una de las principales barreras a la reducción del factor clínker. A pesar de esta situación, la industria cementera y las autoridades chilenas manifiestan su interés por continuar con el esfuerzo de reducir las emisiones más allá de su nivel actual a través de 3 palancas principales:

- Aumento de la tasa de sustitución de combustible fósil por combustible alternativos de 12.6% (2017) a 30% (2030),
- Reducción del contenido de clínker en el cemento de 65% (2017) a 55% (2030),
- Reducción del contenido de cemento de 50 kg de cemento por m³ de hormigón.

La combinación de los alcances de la Hoja de Ruta FICEM-ICH, publicada en abril de 2019, y de este trabajo permitirían reducir las emisiones en hasta un 15% hacia el año 2030, en comparación con su nivel en 2014, confirmando el liderazgo mundial de la industria cementera chilena en términos de emisiones de CO₂ por tonelada de cemento.

9. ANEXOS

Anexo 1

Huella de Carbono de la Industria Nacional

Ratificamos que la baja huella de CO₂ en la producción de cemento nacional de 581 kg CO₂/ton cemento, está 10% bajo del promedio mundial de 637 kg CO₂/ton cemento, según GNR (página 6) y compartimos que esto se debe, en forma importante, al bajo factor clínker y a los esfuerzos de potenciar el uso de cementos con adiciones en nuestro país. Es necesario destacar, sin embargo, que esto es resultado, fundamentalmente, del uso de puzolana natural -materia prima con amplia disponibilidad física y económica- por un lado, y a la confianza del mercado en estos cementos por otro lado., cementos que han demostrado cumplir con exigentes requisitos de uso en Chile.

Fuga de Carbono e Instrumentos de Precio al Carbono

Compartimos la preocupación del Estudio por la denominada fuga de carbono, no obstante, las soluciones normativas deben ser estudiadas en mayor profundidad y de acuerdo con la realidad nacional. Entendemos que el establecimiento de adecuados Instrumentos de Precio al Carbono, como impuestos, sistemas de comercio de emisiones y offsets, pasan por abordar temas centrales para cada sector económico, como es la competitividad con relación a las importaciones, su importancia estratégica para el país y acciones para evitar la fuga del carbono, que afecta la lucha global contra los efectos del cambio climático. En este sentido, industrias como la del acero y el cemento son especialmente sensibles a este fenómeno y, por ejemplo, casi la totalidad de países OCDE que aplican instrumentos de precio al carbono, cuentan con mecanismos para proteger la competitividad de estas industrias y evitar riesgos de fugas de carbono.

Consideramos que las propuestas del documento en este tema son complejas legalmente dado que nuestra legislación tributaria es exigente al momento de gravar materias o sectores específicos, lo que solo podría hacerse en forma general y podría producir efectos económicos negativos relevantes en la cadena de valor. Además, se debe considerar los efectos de la doble tributación a nivel internacional que podría generarse, entre otros conflictos relacionados al comercio internacional de este tipo de commodities. Por otro lado, en un trabajo posterior, complementario al Estudio, sería necesario considerar los efectos en los PPDA existentes en la materia y los offsets propuestos en la modificación de la ley de impuestos verdes.

Coprocesamiento

Compartimos lo indicado en el Estudio, respecto a la valorización de residuos a través del coprocesamiento y su importancia estratégica para el éxito de la Ley REP. Por lo señalado, nuestra industria ha establecido la valorización de residuos, como uno de los ejes centrales para disminuir su huella de carbono al año 2030, lo que se expresa en los compromisos establecidos en su Hoja de Ruta:

“Apoyar el desarrollo de una política de residuos que reconozca y recompense los beneficios del coprocesamiento y su estrecha integración con otras industrias”.

“Concretamente se compromete a alcanzar un 30% de coprocesamiento al año 2030, teniendo como referencia el 12% alcanzado el año 2014 de acuerdo al informe de PwC”.

Es importante destacar, que estas reducciones de combustibles alternativos no pueden ser utilizadas hoy en día, pues la legislación nacional no las reconoce como tal. Para el caso de la biomasa la situación es similar, pues no es mayoritaria en el mix de combustibles, para ser reconocida como carbono neutral. De aquí la importancia de los esfuerzos que la industria ha venido realizando en las discusiones legislativas asociadas, para que se considere a los Combustibles Derivados de Residuos (CDR) como carbono neutral.

Factor Clínker y Adiciones

Compartimos lo señalado en el Estudio, que estima que el factor clínker es fundamental para las reducciones de emisiones de CO₂. Pese a que el factor clínker de Chile es uno de los más bajos a nivel mundial, la industria del cemento de Chile en su Hoja de Ruta se ha comprometido a:

“Potenciar la sustitución parcial del clínker por adiciones como la puzolana, escorias de alto horno, cenizas volantes, entre otros, para disminuir la emisión de CO₂ por toneladas de cemento.

Fomentar el establecimiento de regulaciones y estándares que permitan un mayor uso de adiciones en el cemento, por ejemplo, mediante la desclasificación de las cenizas volantes como residuos.

Apoyar y promover la investigación en el uso de materias primas alternativas, a fin de garantizar el avance en el desarrollo de uso de cementos con una menor huella de carbono.”

Estos compromisos son similares a las conclusiones del Estudio, no obstante, no concordamos en enfocar las reducciones al factor clínker en una sola tecnología, como las arcillas calcinadas, las que requerirían una importante inversión al tener que adaptar los hornos existentes y desplazar parte de la actual producción clínker, análisis que debe ser considerado para esta tecnología. Además, la industria estima que es razonable desde el punto de vista ambiental y económico aprovechar las materias primas de origen natural como las puzolanas de gran disponibilidad presente y futura en nuestro país, como también seguir incorporando materias primas alternativas para valorizar residuos, como son cenizas y escorias de alto hornos. Estas últimas han sido utilizadas intensamente en el denominado cemento siderúrgico en nuestro país. Es importante considerar, además, que otra característica de las adiciones usadas en Chile es que no producen nuevas emisiones a diferencia, por ejemplo, de las arcillas calcinadas.

Por otro lado, no encontramos un informe mineralógico que abarque la totalidad de las puzolanas que justifique la limitación de uso, tal como lo plantea este estudio, donde además se debe considerar que Chile cuenta con un sistema jurídico, que permite la libre explotación del material en cuestión, vía concesional minera. Desde otra perspectiva, y basado en la lógica de desclasificación de residuos, los

restos o residuos de excavaciones con contenido puzolánico podrían utilizarse en los procesos cementeros, fomentando con ello la economía circular.

Es necesario hacer presente, que el uso de adiciones no es solo un mero acostumbramiento comercial del consumidor, sino que responde a que estas adiciones confieren propiedades importantes de calidad al cemento y confieren al hormigón mayor impermeabilidad y resistencia a agentes químicos para que este pueda tener buenos comportamientos de resistencia en el largo plazo sin deterioros por procesos químicos, propiedades que son aún más relevantes en un país sísmico como el nuestro.

Molienda Separada.

Respecto a la molienda separada que se propone en el documento, se sugiere revisar el nivel de inversión, considerado como nulo bajo algunos supuestos, puesto que para la realidad de Chile sí podría requerirse mayor cantidad de silos de almacenamiento para cada material molido en forma separada, sistemas de mezcla de esos materiales molidos y de acopio, así como sistemas para asegurar la calidad requerida en el producto final, por ejemplo.

10. REFERENCIAS

- Cámara Chilena de la Construcción (2019). *Download Excel "Despachocementoweb"*. Obtenido de <https://www.cchc.cl/>: <https://www.cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento>
- Ecoconsult Capital. (2019). *Análisis Económico de la Propuesta de Modificación al Impuesto Sobre Emisiones de GEI*. Santiago: Ecoconsult.
- ECRA (2017). *ecra-online.org*. Obtenido de https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf: <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>
- ETZ Zurich (2018). *A sustainable future for the European cement and concrete industry – Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. Obtenido de sc.ibi.ethz.ch/en/news: <https://sc.ibi.ethz.ch/en/news/2018/11/a-sustainable-future-for-the-european-cement-and-concrete-industry--technology-assessment-for-full-decarbonisation-of-the-industry-by-2050.html>
- European Union (2018). *DIRECTIVE (EU) 2018/850 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. Brüssel: Official Journal of the European Union.
- FICEM-ICH (2019). *Hoja de ruta*. Obtenido de www.ich.cl: <http://hojaderutaficem.ich.cl/>
- FICEM-ICH (2019). *Hoja de ruta*. Retrieved from www.ich.cl: <http://hojaderutaficem.ich.cl/>
- GCCA (2018). *GCCA Sustainability Guidelines*. Obtenido de gccassociation.org: https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/03/GCCA_Guidelines_CO2Emissions-v0.pdf
- GCCA (2019). *Getting the Numbers Right Project - Emissions Report 2017*. WBCSD Cement Sustainability Initiative: Global Cement and Concrete Association (GCCA).
- GIZ - Cementis (2017). *Mecanismos Financieros para un Desarrollo bajo en Carbono – FinanCC Perú (BMZ/USAID), Programa CF Ready*. Lima: GIZ - USAID.
- GTZ-Holcim (2006). *Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento Cooperación Público-Privada GTZ-Holcim*.
- Hong Dong, Y., Jaillon, L., Chu, P., & Poon, C. (2015). *Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods - A case study of high-rise private building*. Hong Kong: City University of Hong Kong & The Hong Kong Polytechnic University.

- IEA-WBSCD (2018). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris: International Energy Agency – IEA; Cement Sustainability Initiative – CSI; World Business Council for Sustainable Development – WBCSD.
- Laboratoire National des Ponts et Chaussées (2010). Technical and environmental effects of concrete production: dry batch versus central mix plant. *Journal of Cleaner Production*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00595563/document>.
- Less, C., & McMillan, S. (2005). *Achieving the Successful Transfer of Environmentally Sound Technologies*. Paris: OECD Trade and Environment Working Papers.
- Scrivener, K. (2018). Limestone Calcined Clay Cements (LC3): a promising alternative for a sustainable construction industry. *International Cement Review*.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2016). *Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry*. Paris: United Nations Environment Programme.
- UNEP Karen L. Scrivener, Vanderley M. John, Ellis M. Gartner (2016). *Eco-efficient cements: Potentially Economically viable solution for a low-CO₂ cement based material industry*. UNEP.