



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA**



Trabajo Fin de Grado de Recursos Energéticos



ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

**REDUCTION GHG EMISSIONS STUDY SETTING UP A CCS
TECNOLOGY IN A CEMENT PLANT**

Autor: Jose Luis Soberón Galán
Director: Beatriz Malagón Picón
Convocatoria: octubre 20

AGRADECIMIENTOS

Una vez alcanzado este último paso que conlleva el cierre de un ciclo de mi vida debo recordar con gratitud y emoción todos aquellos momentos que he pasado en la Escuela de Minas de Torrelavega, edificio que alberga tantas ilusiones, fantasías, alegrías y sobre todo calidad humana que hace que siempre que lo recuerdas salga una sonrisa en tu rostro.

Mi primer agradecimiento va dirigido a mi directora de TFG, Beatriz Malagón Picón, ha sido un privilegio el poder realizar este trabajo contigo, tu paciencia y actitud conmigo han sido enormes. Gracias por tus orientaciones y consejos, ya que sin ellas no podría haber llegado hasta aquí.

No puedo dejar de mencionar a todos los profesores que he tenido y conocido durante este periodo, darles mi más grande y sincero agradecimiento por el conocimiento, apoyo y motivación que he recibido por parte de todos ellos. Gracias en especial a Julio Manuel de Luis Ruiz, Gema Fernández Maroto, Jesús Setien Marquinez, Noemi Barral Ramon, Raúl Husillos Rodríguez, Rubén Pérez Álvarez, Jesús Fernández Fernández, Juan Carcedo Haya, Jorge Tomás Cueli López y más... Gracias por todos esos pequeños detalles que habéis tenido que han hecho que no abandonase.

Agradecer a todo el personal laboral de la Escuela como Ana Gema, Elena y compañeros, así como también a las chicas de la biblioteca. por su gran altruismo en cuanto a ayuda, soporte y hacer al alumnado sentirse como en casa.

A mis amigos, Oscar, Laura, Elisa y Diego, vuestro soporte y paciencia ha sido uno de los motores durante todo este viaje. Gracias por quedaros en mi vida.

A Monllor por ocupar un espacio muy grande en mi vida y estar siempre pendiente y motivarme, también por tus paellas y tardes de risas y cervezas en Amsterdam.

Eugenio, Brendan, Álvaro, ¡qué hubiera sido este tramo sin vuestro apoyo y amistad!

Gracias Juan por darme tu apoyo y entendimiento, sin tu ayuda no hubiese llegado hasta aquí, bueno y sin la de Nive, Amy, Romeo y Cholo.

A toda mi familia por toda la paciencia y acogida que han tenido conmigo, pero en especial agradecer a mi madre su gran capacidad de entendimiento, su calidez y candidez personal lo que la convierten en alguien esencial en mi vida.

A la persona que promovió y motivó, desde una galaxia lejana, para que llegase este momento. A Eric. GRACIAS.

Definitivamente a todos vosotros y a otros muchos... ¡MUCHAS GRACIAS!

ÍNDICE DE ABREVIATURAS UTILIZADAS

AEMA:	Agencia Europea de Medio Ambiente
B.O.E.:	Boletín Oficial del Estado
CC:	Cambio Climático
CAC:	Captura y almacenamiento de dióxido de carbono, CO ₂
CAP:	Chilled Ammonia Process. Proceso de Amoniac o refrigerado
CCR:	Ratio de captura de CO ₂
CCS:	Carbon Capture and Storage, por sus siglas en inglés.
CHP:	Combination heat and power. Combinado de calor y energía
CIC:	Consejo Internacional para la Ciencia, ICSU por sus siglas en inglés
CO₂:	Sustancia orgánica dióxido de carbono
CO₂-WW:	CO ₂ water wash. Lavado por agua de CO ₂
COP:	Conferencia de las Partes
CP:	Conference of the Parties
CP-MOP:	Conference of the Parties serving as a meeting of the Parties, por sus siglas en inglés
CMNUCC:	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DCC:	Enfriador por contacto directo
DCH:	Calentador por contacto directo
EEA:	European Environment Agence
eq / equ.:	Equivalentes
etc:	Etcétera
EPA:	United States Environmental Protection Agency
ESA:	European Space Agency. Agencia Europa del Espacio
ESA:	Electric Swing Adsorption. Proceso de adsorción mediante la conducción de una corriente eléctrica de bajo voltaje a través del absorbente
ETS:	Emissions Trading System
EU:	European Union
EUA:	Derechos de emisión de CO ₂
FSC:	Fixed-site-carrier membranes
FG-WW:	Fluent gas water wash, por sus siglas en inglés. Lavado por agua del gas de combustión
GEI:	Gases de efecto invernadero

GHG:	Greenhouse gas emissions
Gt:	Gigatoneladas
ICAP:	International Carbon Action Partnership
IEA:	International Energy Agency, en español: Agencia Internacional de Energía
IE-EE:	Informe Especial de Emisiones
INGEI:	Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change, en español: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MMR:	Monitoring Mechanism Regulation, por sus siglas en inglés. Mecanismo para el seguimiento y notificación de emisiones GEI
Mt.:	Millones de toneladas
OMS:	Organización Mundial de la Salud, WHO por sus siglas en inglés.
ONG:	Organización no Gubernamental
PK:	Protocolo de Kioto
KPIs:	Key Performance indicators, por sus siglas en inglés, Indicadores clave de rendimiento.
PM:	Peso molecular (gr/mol)
PMC:	Programa Mundial sobre el clima
ppm.:	partes por millón
ppm_v:	partes por millón en volumen
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PSA:	Pressure Swing Adsorption. Proceso de adsorción por descenso de la presión
PVAm:	Amina de polivinilo
RCDE UE:	Régimen de comercio de derecho de emisión de la European Union
RC-97:	Instrucción para la recepción de cementos incluida en el RD 1630/1992 incluida en la Directiva
RD:	Real Decreto
RGGI:	Regional Greenhouse Gas Initiative Members
SCE:	Sistema de comercio de emisiones
SPECCA:	Specific primary energy consumption for CO ₂ avoided
TSA:	Temperature Swing Adsorption. Proceso de adsorción por aumento de la temperatura
TSU:	Unidad de Soporte Técnico para el IPCC
UE:	Unión Europea

UNFCCC:	The United Nations Framework Convention on Climate Change
UNEP:	United Nations Environment Programme
UNESCO:	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
WCI:	Western Climate Initiative Members
WG I:	Grupo de trabajo I de IPCC
WG II:	Grupo de trabajo II de IPCC
WG III:	Grupo de trabajo III de IPCC
WMO:	World Meteorological Organization

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA
CEMENTERA

INDICE

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE DE ABREVIATURAS UTILIZADAS	3
INDICE	6
1. RESUMEN	9
2. ABSTRACT	10
3. INTRODUCCIÓN	11
4. OBJETO	15
5. ALCANCE	16
6. EFECTO INVERNADERO, CALENTAMIENTO GLOBAL y CAMBIO CLIMÁTICO	17
6.1. MEDIO AMBIENTE Y CLIMA	17
6.2. EL EFECTO INVERNADERO	17
6.2.1. Efecto invernadero natural.	18
6.2.2. Efecto invernadero artificial.	19
6.3. GASES DE EFECTO INVERNADERO	19
6.4. INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (INGEI):	21
6.5. EL CALENTAMIENTO GLOBAL	23
6.5.1. Causas del calentamiento global	24
6.5.1.1. Causas naturales	24
6.5.1.2. Causas artificiales	26
6.6. EL CAMBIO CLIMÁTICO	27
6.6.1. Factores del cambio climático	28
6.6.2. Impactos asociados al cambio climático	32
6.7. PRINCIPALES HITOS SOBRE MEDIOAMBIENTE, CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS NEGOCIACIONES.	34
6.8. ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO	39
6.8.1. El Protocolo de Kioto	40
6.8.2. El Acuerdo de París	42
6.8.3. El Régimen de comercio de derecho de emisión de la UE, RCDE UE	44
6.9. PRINCIPALES FUENTES DE GEI	47
6.9.1. EL TRANSPORTE	48
6.9.2. LA AGRICULTURA, LA SILVICULTURA Y OTROS USOS DEL SUELO (AFOLU).	49
6.9.3. PRODUCCIÓN ELÉCTRICA Y TÉRMICA	50
6.9.4. EDIFICIOS	52
	6

6.9.5.	ELIMINACIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS	53
6.9.6.	LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL	54
6.10.	LA ECONOMÍA CIRCULAR	56
6.11.	EXPECTATIVAS Y EVOLUCIÓN FUTURA DE GEI	57
7.	ESTADO DEL ARTE DE LAS TEGNOLOGÍAS CAC, CAPTURA y ALMACENAMIENTO DE CO ₂	62
7.1.	Tecnologías CAC	62
7.2.	Proceso de Captura de CO ₂	63
7.2.1.	Procesos de Postcombustión	65
7.2.1.1.	Absorción química	67
7.2.1.2.	Absorción física	68
7.2.1.3.	Adsorción	70
7.2.1.4.	Criogenia	70
7.2.1.5.	Membranas	71
7.2.1.6.	Captura Biológica.	72
7.2.1.7.	Carbonatación – Calcinación	73
7.2.2.	Procesos de Precombustión	75
7.2.2.1.	Tipos de Tecnologías de precombustión	77
7.2.3.	Procesos de Oxidación	77
7.2.4.	Transporte de CO ₂	80
7.2.4.1.	Métodos de transporte de CO ₂	80
7.2.5.	Almacenamiento de CO ₂	82
7.2.5.1.	Almacenamiento geológico.	83
7.2.5.2.	Almacenamiento oceánico.	84
7.3.	Costos asociados a las CAC	85
8.	PLANTA CEMENTERA	86
8.1.	Fuente de emisión de CO ₂	86
8.2.	Estado del arte de la producción del cemento	87
8.2.1.	Obtención y preparación de materias primas	87
8.2.2.	Trituración y prehomogeneización	89
8.2.3.	Molienda de crudo	89
8.2.4.	Fabricación del Clinker: Horno	89
8.2.5.	Fabricación del Clinker: El Enfriador.	91
8.3.	Datos de producción de cemento y emisiones de CO ₂	91
9.	Aplicación de tecnología de captura de CO ₂ en planta cementera	97
9.1.	CAP, Proceso de Amoniaco refrigerado	98
9.1.1.	Reacciones químicas del proceso	98
9.1.2.	Descripción del proceso	100
9.2.	Caso estudio: aplicación a planta cementera	104
9.2.1.	CAP adaptado a una planta de cemento	104

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA
CEMENTERA

9.2.2.	Planta de referencia	106
10.	Evaluación técnica-medioambiental y económica	109
10.1.	Indicadores ambientales	109
10.2.	Indicador económico	112
11.	Bibliografía y Referencias	121
12.	Lista de Figuras	128
13.	Lista de Tablas	134

1. RESUMEN

A nivel mundial, el cambio climático cuyos efectos son más perceptibles desde hace unas décadas, se ha convertido en uno de los grandes problemas que el hombre tiene que afrontar y solventar con urgencia para frenar las consecuencias que éste pueda ocasionar para el desarrollo de la vida [1].

Relacionado con este problema, se ha demostrado cómo diferentes procesos de producción industrial conllevan la emisión elevada de gases de efecto invernadero (en adelante GEI) a la atmósfera, convirtiéndose de esta manera en uno de los actores principales del efecto denominado “calentamiento global” y especialmente del aumento en la concentración en la atmósfera del dióxido de carbono, CO₂.

En general, una de las primeras acciones que se está llevando a cabo actualmente para la reducción de GEI es el consumo de energías renovables en detrimento de combustibles fósiles como el carbón y los derivados del petróleo, entre otros. Debido a que el cambio hacia un modelo de energías renovables es un proceso lento en el tiempo, de manera paralela se están desarrollando nuevas alternativas como apoyo al freno en la reducción de GEI emitidos a la atmósfera. Dentro del conjunto de éstas, una de las más fiables es la Captura y Almacenamiento de CO₂ (en adelante CAC) [2] [3].

En el presente trabajo fin de grado, se llevará a cabo un análisis de las tecnologías de captura (CAC), la cual puede ser aplicada en los procesos de producción como son la precombustión, oxicomustión y postcombustión. Después de este análisis previo, se realizará un estudio de aplicación a una instalación tipo cementera, eligiendo y justificando una de esas técnicas de captura, para finalmente comparar los resultados obtenidos con una situación de referencia sin dicha tecnología, demostrando que la instalación de una tecnología CAC en una planta de referencia de cemento, en concreto la denominada CAP, captura en postcombustión con amoníaco enfriado, es viable desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental para su aplicación en cuanto a una reducción considerable de emisiones GEI en una planta cementera.

Se realiza una evaluación técnico-económica de la tecnología CAP, calculándose indicadores clave de rendimiento, como el equivalente de CO₂ evitado, el consumo específico de energía primaria (SPECCA), el coste del clínker (COC). El coste del CO₂ evitado se calcula en función de diferentes escenarios de precios de CO₂ en el marco de la comercialización de derechos en Europa (EUA).

2. ABSTRACT

The effects of global climate change have become increasingly perceptible over the past couple of decades. It has become one of the biggest challenges facing humankind and demands urgent solutions to avoid potentially catastrophic consequences to human life as we know it [1].

It has already been proven that many industrial processes are accompanied by high levels of greenhouse gas emissions, (GHG). Emissions of these gasses into the atmosphere – and especially the increase of atmospheric CO₂, carbon dioxide, concentrations - are the main driver of the process called “global warming”.

One of the main actions being taken at present to reduce GHG emissions is investing in renewable energy production to decrease fossil fuel consumption, which includes carbon or petroleum products as well as many others. As the transformation to a renewable energy model is proving to be a slow process, alternative methods are being developed to support this transition in order to minimise GHG emissions. One of the most promising and reliable methods being developed is Carbon Capture and Storage, CCS [2] [3].

This paper presents a documentary analysis of CCS, which is applied to production processes such as precombustion, oxyfuel and postcombustion. After the analysis, the application of this technology in a cement plant is examined. The specific technology in question is Chilled Ammonia Process (CAP) in postcombustion. Finally, the results obtained in this study are compared with the data for a reference situation in which no such technology is used. The goal is to show that CAP is a viable technology from a technological, economic and environmental perspective which can be applied in a cement plant in order to considerably reduce GHG emissions.

The techno-economic and environmental evaluation of CAP technology includes the calculation of various key performance indicators, such as the equivalent CO₂ emissions avoided, specific primary energy consumption for CO₂ avoided, specific primary energy consumption per CO₂ avoided (SPECCA) and cost of clinker (COC). The cost of CO₂ has been calculated according to several CO₂ prices scenarios, which are within the EU emissions trading system (EU ETS) framework.

3. INTRODUCCIÓN

Los niveles de concentración en la atmósfera de agentes contaminantes que en la actualidad se están registrando se han convertido desde hace unas décadas en uno de los factores más agresivos y persistentes en cuanto al calentamiento global que estamos viviendo, cuyo efecto, ya bien conocido, es el cambio climático. Este efecto ya viene siendo tratado a lo largo de las últimas décadas, en los diferentes encuentros que se han desarrollado a nivel internacional, en los cuales se analiza y se estudia uno de los agentes de GEI más importante según el 5° Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático: la concentración de CO₂ en la atmósfera.

En la figura 3.1. muestra gráficamente la tendencia temporal ascendente comentada con anterioridad.

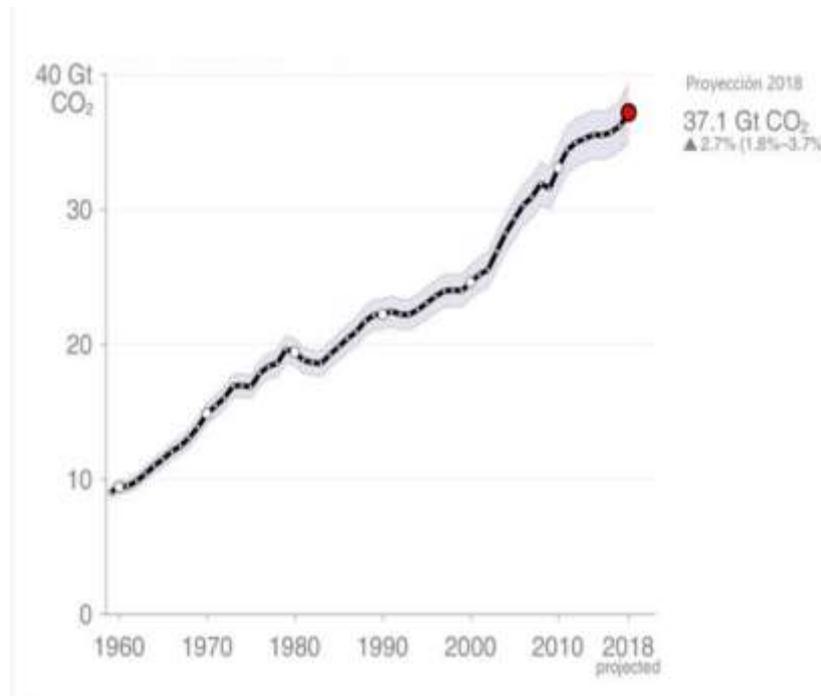


Figura 3.1 Emisiones globales de CO₂ fósil.

Las reuniones que se celebran a nivel mundial periódicamente tienen como objetivo no solo el análisis de las distintas medidas que se debieran tomar por parte de los países participantes para poder poner remedio o frenar este aumento de la temperatura global, sino también de concienciar a los diferentes países y hacerles responsables para que las condiciones medioambientales del planeta no se conviertan en perjudiciales para el desarrollo de la vida.

Uno de los primeros pasos que se está llevando a cabo en cuanto a la reducción en emisiones de GEI es la búsqueda de energías alternativas no contaminantes, cuya aportación de compuestos orgánicos a la atmósfera sea mínima o incluso nula.

La introducción de energías renovables en nuestro mix energético en la suficiente proporción para considerarse un cambio de paradigma requiere de un proceso temporal, que en cualquier caso es demasiado lento considerando las consecuencias debidas al cambio climático. Mientras ocurre la obligada transición hacia el uso de energías sostenibles, es necesario encontrar paralelamente otras nuevas iniciativas para obtener resultados sustanciales a corto plazo, y así comenzar a notar una disminución en las consecuencias ambientales, sociales, etc. que estamos padeciendo en la actualidad.

En estos momentos, entre las opciones o alternativas que se presentan para reducir las emisiones GEI se encuentran:

- La disminución en consumo de energía.
- La utilización de la energía de una manera responsable y eficiente (teniendo en cuenta la conversión energética, entendida como la transformación de una forma de energía a otra que posibilite una mayor eficiencia en cuanto a producción, distribución y uso de la energía obtenida).
- Un empleo mayor de combustibles cuyo contenido en carbono sea reducido (como el gas natural).
- Promoción de los sumideros de CO₂ naturales (bosques, suelo, océanos).
- El uso de energías renovables como fuentes de bajo nivel de emisión de GEI a la atmósfera.
- Utilización de tecnologías CAC, Captura y Almacenamiento de CO₂, CCS por sus siglas en inglés, en las grandes fuentes emisoras.

El uso de tecnologías CAC en los procesos productivos, en desarrollo ya desde hace varias décadas, según el 5° Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas, IPCC, contribuirían a aumentar el porcentaje de Captura de CO₂, posicionándolo en un arco del 15% al 55% en el año 2100 [4][5].

En cuanto a este apartado, la figura 3.2. muestra la localización geográfica de proyectos que se están llevando a cabo en un marco global, evaluando la efectividad de las tecnologías en cuanto a separación industrial y las tecnologías de postcombustión en cuanto a reducción de emisiones GEI.

Tras el ya conocido Protocolo de Kioto, celebrado en 1977, y varias Conferencias de las Partes, CP o COP por sus siglas en inglés, celebradas con posterioridad a éste y con un carácter anual, tiene lugar en París de manera simultánea, del 30 de noviembre al 12 de diciembre del 2015, la 21ª de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, (COP21) y la 11ª sesión del COP e las Partes del Protocolo de Kioto (en adelante CP-MOP11).

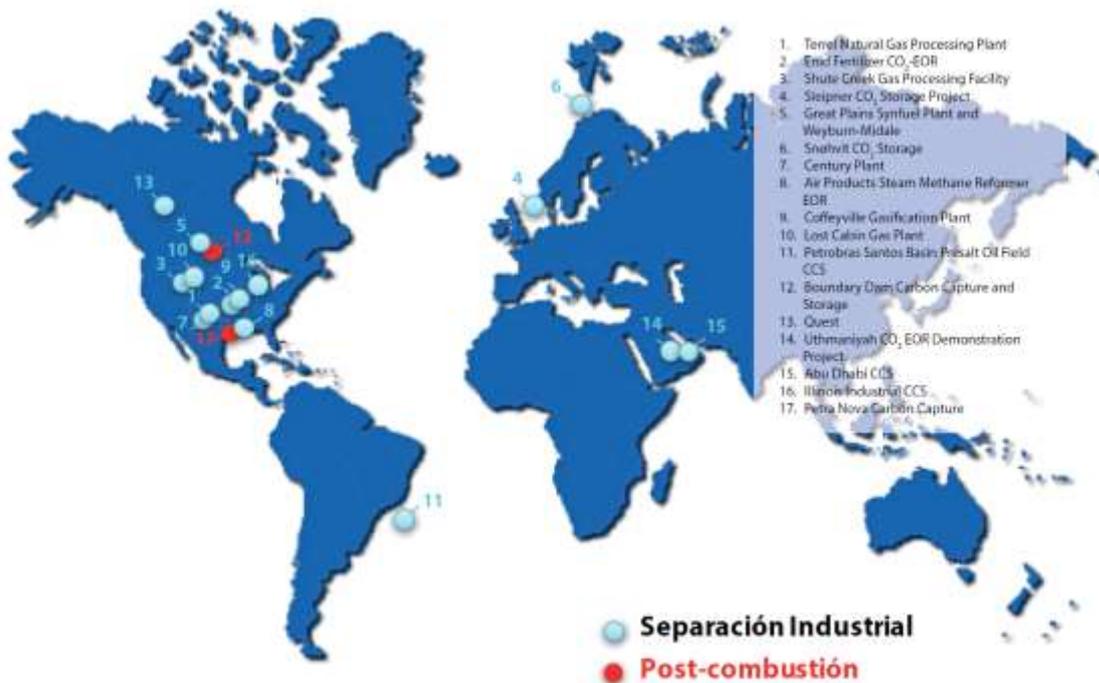


Figura 3.2. Proyectos CAC a gran escala operativos a fecha diciembre de 2017. Fuente: Global CCS Institute

Ésta se resuelve con el Acuerdo de París, texto que engloba la diversidad de realidades de los diferentes países y se caracteriza por ser justo, tener un carácter ambicioso y equilibrado, ser duradero y global, ser jurídicamente vinculante y se enmarca plenamente en la lucha frente al cambio climático actual [6].

Tomando como referencia las emisiones mundiales de CO₂ del año 2012, cuyo valor alcanzó la cifra de 31,6 Gt se marca el objetivo a alcanzar en el Acuerdo de París: una reducción de un 40% a un 70% de las emisiones globales de CO₂ para el año 2050 como primer paso para poder alcanzar un nivel de emisiones GEI próximas a cero o negativas en el año 2100 [7].

En este propósito, la utilización de tecnologías CAC, según la Agencia Internacional de la Energía, IEA por sus siglas en inglés, permitiría una reducción de hasta un 14% sobre la emisión atmosférica de CO₂ actual hasta el 2050, lo que representaría un total de 120 Gt CO₂ en cuanto a captura y almacenamiento de las emisiones GEI.

La eficiencia de este tipo de tecnologías, en cuanto al significado de reducción, se define en dos vertientes, la primera asociada a la captación del CO₂ generado durante los procesos industriales llevados a cabo en los centros de emisión y la segunda relacionada con el almacenamiento de CO₂ captado.

En cuanto a la captación, se lleva a cabo en los principales focos de contaminación involucrados en los altos niveles de emisión actuales, destacando: centrales eléctricas, centrales siderúrgicas, refinerías de petróleo, industria del papel y la industria del cemento, entre otras.

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

En este estudio, la industria del cemento es la elegida para hacer un análisis respecto a la funcionalidad de la implantación de uno de los procesos CAC. Éste será seleccionado entre las tecnologías actuales para conseguir reducir la emisión GEI durante la actividad productiva del cemento.

La tecnología CAC puede llevarse a cabo principalmente mediante tres diferentes procesos: la precombustión, la postcombustión y la oxcombustión. Éstos serán los que se definirán y valorarán para establecer el más adecuado, en cuanto a ventajas e inconvenientes que presente para su aplicación en una planta cementera.

Asimismo, se incluirá un estudio de costos referente a la captura y almacenamiento de CO₂ para así poder hacer una valoración en cuanto a viabilidad de la utilización de la CCS en la planta cementera.

4. OBJETO

Este estudio de reducción de emisiones GEI a través del uso de una tecnología CAC en una planta cementera tiene como objeto estudiar la viabilidad técnica en cuanto a la captura de CO₂ en la planta, y así convertirse en una medida de disminución de las emisiones de ésta a la atmósfera y así poder contribuir a un descenso del calentamiento global.

Como objetivos específicos de este estudio se encuentran:

- Entender tanto la implicación como la relevancia de los gases GEI, destacando el CO₂, en cuanto al papel que desempeñan en el cambio climático actual.
- Presentar las principales metodologías que en la actualidad existen para disminuir la concentración de CO₂ en la atmósfera a través de su captura y almacenamiento, comentando sus ventajas y desventajas.
- Una vez desarrollados los puntos anteriores, escoger uno de los métodos que pueda ser aplicable a una planta cementera.
- Llevar a cabo un estudio de viabilidad técnica-económica.

5. ALCANCE

El alcance de este trabajo es estudiar la aplicación en una planta cementera de una de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en desarrollo actualmente.

Partiendo del estudio de viabilidad técnica presentado, se podría estudiar la posibilidad de extender su utilización hacia otras plantas cementeras localizadas en territorio español y de esta manera ayudar a alcanzar los compromisos recogidos en los Acuerdos relacionados con el cambio climático.

6. EFECTO INVERNADERO, CALENTAMIENTO GLOBAL y CAMBIO CLIMÁTICO

En este apartado se introducen unos conceptos generales importantes para poder situarnos en el marco del estudio. Para ello, se han consultado diferentes fuentes de información, entre ellas cabe destacar: Real Academia de la Lengua Española, Ministerio para la Transición Ecológica, UNESCO-PNUMA, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.

6.1. MEDIO AMBIENTE Y CLIMA

Medio ambiente: conjunto de componentes físicos (clima, geología, ...), químicos, biológicos (flora, fauna, población humana, agua, ...) y sociales (conflictos sociales, ordenamiento urbano, actividad laboral, cultura), todos ellos interrelacionados entre sí, capaces de causar efectos directos o indirectos debido a la manipulación antropogénica, en un plazo corto o largo, sobre los seres vivos y las propias actividades humanas en un lugar y momento determinado [8].

Clima: conjunto de características atmosféricas que determinan una región específica como consecuencia de la interacción de los elementos meteorológicos a lo largo de los diferentes periodos estacionales anuales. [9].

6.2. EL EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero es un proceso mediante el cual tanto la superficie terrestre como las capas de la atmósfera más próximas a ésta sufren un calentamiento provocado por un exceso de calor, la radiación solar. Este exceso procedente del sol no es absorbido en su totalidad, por lo que las radiaciones infrarrojas emitidas por la superficie no emigran hacia el exterior por el fenómeno de absorción debido a los gases contenidos en las primeras capas de la atmósfera, provocando de esta manera un aumento de la temperatura media del planeta terrestre que se suma al existente por radiación.

La denominación de “efecto invernadero” se debe al funcionamiento de la atmósfera como un invernadero para la Tierra, la cual deja pasar la luz y guarda el calor, por lo que podemos decir que es un efecto físico necesario tanto para que se genere vida como para el mantenimiento y evolución de ésta sobre la Tierra. Por el contrario, sin este efecto las temperaturas medias globales se aproximarían a los -15°C , lo que implica que la superficie terrestre estaría congelada [10].

Se consideran dos tipos de efecto invernadero: natural y artificial. La diferencia existente entre el efecto invernadero natural respecto al efecto invernadero artificial radica en la forma en la que se produce éste como consecuencia de los vectores implicados en él [11].

6.2.1. Efecto invernadero natural.

La figura 6.1 presenta de una manera esquemática el funcionamiento a través de los diferentes estadios con flujos globales en los que se puede dividir el fenómeno de efecto invernadero natural. De esta manera, el planeta Tierra puede trabajar en equilibrio, manteniendo por sí mismo tanto unas condiciones climáticas óptimas como unas temperaturas favorables para la vida. El efecto invernadero natural se debe a las fuerzas de la naturaleza y no conlleva cambios climáticos drásticos.



Figura 6.1. Efecto invernadero natural. Fuente. Okinagan University College, University of Oxford, United States Environmental Agency. The Science of climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP, WMO. Cambridge University Press. USA 1996.

De una manera más ajustada, la figura 6.2. muestra el balance de flujo energético natural de intercambio existente entre atmósfera y la superficie terrestre obteniendo el equilibrio descrito con anterioridad. Las cantidades que figuran entre paréntesis nos indican la variación existente respecto a los valores tomados en 1996.

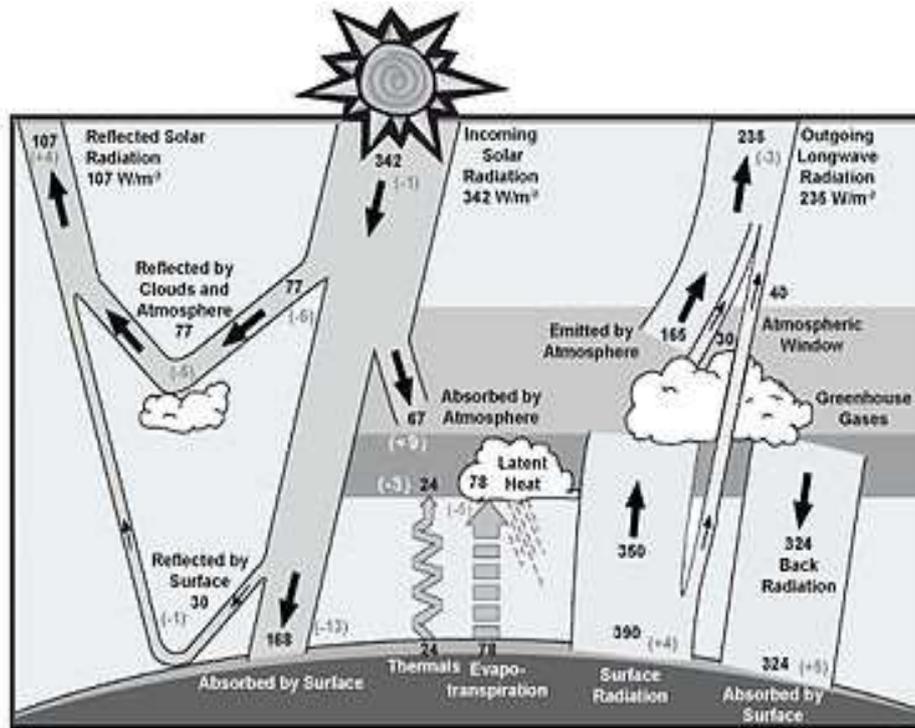


Figura 6.2. Balance pormenorizado de los flujos de energía entre el espacio, la atmósfera de la Tierra y el suelo. Fuente: publicación por la NASA, The Earth Observer November-December 2006. Volume 18, Issue 6. page 38, basado en las mediciones del programa SORCE en 2006.

6.2.2. Efecto invernadero artificial.

Es el fenómeno que rompe el equilibrio del planeta Tierra en cuanto al mantenimiento de las condiciones climáticas y temperaturas favorables para la vida. Este desequilibrio se debe a la acción antropogénica y su causa es el aumento en las emisiones de GEI a la atmósfera lo cual acelera el proceso de calentamiento global del planeta.

6.3. GASES DE EFECTO INVERNADERO

Conjunto de gases que comprende, por una parte, los que por su naturaleza ya se encuentran en la propia atmósfera y, por otra, los emitidos desde la Tierra debido a una acción antropogénica. Éstos favorecen que se realice el efecto ya explicado con anterioridad y conocido por “efecto invernadero”. Entre los primeros, hay que nombrar como principales el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃). En referencia a los GEI antropogénicos podemos destacar los recogidos tanto en el Protocolo de Montreal como en el de Kioto y son los halocarbonos y las sustancias con contenido en cloro y bromuro, así como también el CO₂, N₂O y CH₄ junto con el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

En la tabla 6.1 se han recogido los GEI descritos en el párrafo anterior reseñando sus fuentes principales de emisión junto con la actividad o sector emisor asociado a éstos.

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

La capacidad de las moléculas de estos gases de absorber y remitir las radiaciones infrarrojas, radiación de onda larga y naturaleza térmica, de origen solar y terrestre por reflexión, genera de forma natural un flujo de energía natural que es controlado a través del sistema climático.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente respecto al balance energético natural (figura 6.3.) y gases GEI (Tabla 6.1.), y refiriéndonos ya a las nuevas condiciones ambientales generadas por el incremento de radiación infrarroja en la troposfera provocadas por acción antropogénica, no cabe ninguna duda de la existencia de un reajuste de orden no natural, cuyo efecto está provocando el cambio climático que estamos evidenciando como actores principales.

<i>Gas de efecto Invernadero</i>	Dióxido de carbono (CO₂)	Metano (CH₄)	Óxido nitroso (N₂O)	Carburos Hidrofluorados (HFC) Carbonos Perfluorados (PFC)	Clorofluorocarbonos (CFC)	Hexafluoruro de azufre (SF₆)
<i>Fuente</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) - Deforestación - Cambio de uso del suelo - Quema de bosques - Transporte y generación térmica - Forestal - Agricultura - Incendios Forestales 	<ul style="list-style-type: none"> - Botaderos de basura - Excrementos de animales - Gas natural - Descomposición de desechos orgánicos - Ganadería - Petrolera 	<ul style="list-style-type: none"> - Combustión de automóviles - Fertilizantes - Alimento de ganado - Fertilización nitrogenada - Estiércol - Desechos sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de refrigeración - Industria frigorífica 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de refrigeración - Plástica - Aerosoles - Electrónica - Sector Industrial 	<ul style="list-style-type: none"> - Aislante, eléctrico y estabilizante - Interruptores eléctricos (breakers) - Transformadores - Sistemas interconectados de redes eléctricas - Extintores de incendios
<i>Actividad</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Transporte y generación térmica - Forestal - Agricultura - Incendios Forestales 	<ul style="list-style-type: none"> - Descomposición de desechos orgánicos - Ganadería - Petrolera 	<ul style="list-style-type: none"> - Transporte - Agricultura - Industrias - Quema de desechos sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Industria frigorífica 	<ul style="list-style-type: none"> - Sector Industrial 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema interconectado de redes eléctricas - Extintores de incendios

Tabla 6.1. Gases de efecto invernadero por fuente y actividad emisora. Fuente: Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático-Ecuador, 2011. Elaboración propia.

El cambio climático conlleva un aumento de la temperatura media global lo cual provoca la aparición de fenómenos como por ejemplo un aumento del nivel del mar, cambios en los regímenes de precipitación, una mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como huracanes, terremotos, etc. afectando a los sectores de la agricultura, los recursos hídricos, los ecosistemas, la salud humana, etc [12].

6.4. INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (INGEI):

Siguiendo los compromisos adoptados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) del 21 de diciembre de 1993 y el Protocolo de Kioto del 10 de mayo de 2002 para el periodo 2013-2020 y reglamento (EU) 525/2013, los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero deberán recoger toda información necesaria para listar todos aquellos GEI emitidos por el país.

El registro de datos debe facilitar, por una parte, la elaboración de un inventario de GEI dentro del marco de la normativa internacional y europea de emisiones y, por otro, debe posibilitar una comparativa en cuanto a contribuciones relativas al efecto invernadero de cada país. Dicho inventario se realizará en los principales sectores o fuentes, tanto naturales como antropogénicas, y se tendrá en cuenta también la absorción por sumideros.

Toda esta información recogida anualmente por cada país sirve de base de datos para el desarrollo y puesta en práctica de medidas políticas, tanto a nivel nacional como a nivel internacional, que puedan reducir las emisiones emitidas a la atmósfera.

Además, los inventarios permiten la realización de evaluaciones periódicas de las medidas adoptadas en función de las tendencias registradas, facultándolos para la adopción de otras diferentes en el caso de que fuera necesario [13].

Respecto al Sistema Español de Inventario de Emisiones:

- La edición 2019 del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero dispone de la siguiente información representativa de la Serie 1990-2017:
 - Documento Resumen (enero 2019)
 - Informe Inventario Nacional (NIR, National Inventory Report) (abril 2019)
 - Tablas de datos de reporte (CRF, Common Reporting Format) (marzo 2019)
 - Tabla resumen de emisiones. ED 2019-Inventario Nacional (febrero 2019)
 - Enlace a la web oficial de reporte de UNFCCC (NIR, CRF)
 - Enlace a la web oficial del reporte de la Comisión Europea (NIR, CRF)
 - Resolución de aprobación del Inventario 2019 (diciembre 2018)
 - Informe de Revisión ESD de la edición 2019 del Inventario de GEI (abril 2019)
 - Infografía, figura 6.4.: Emisiones Brutas por sectores GEI-2017 (abril 2019)

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

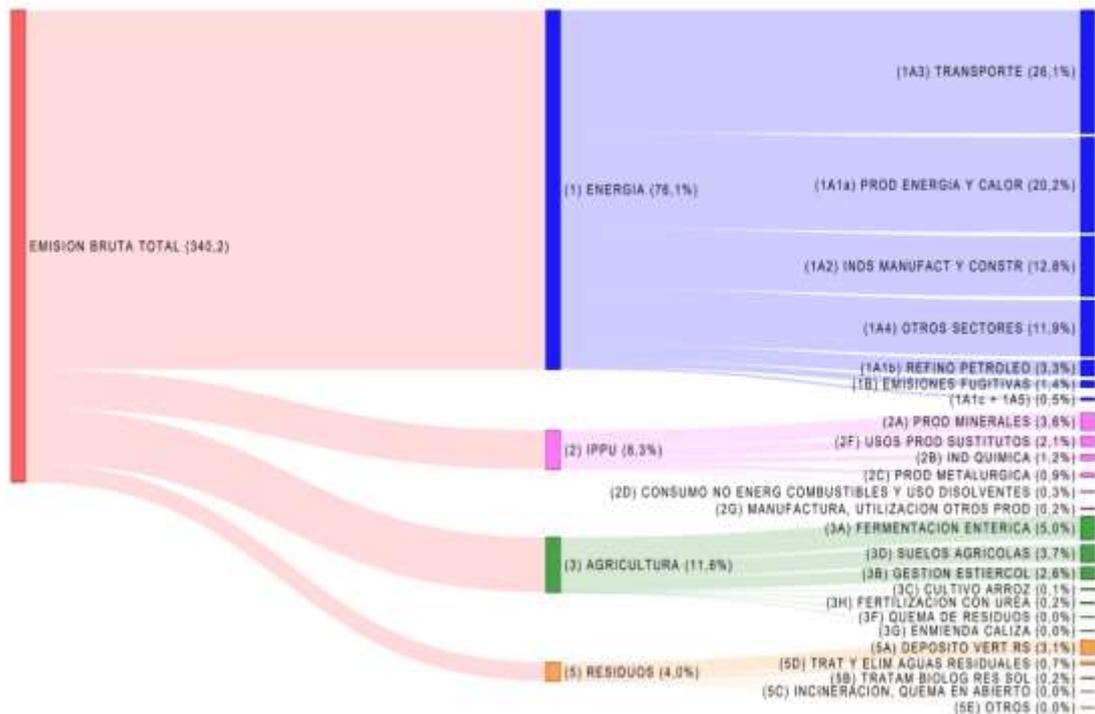


Figura 6.4. Emisión Bruta Total (desagregado) (Mt CO₂-eq – 2017 – Sectores y actividades). Fuente: Infografía: Emisiones GEI-2017 (abril 2019). Ministerio para la Transición Ecológica.

El inventario válido corresponde a la última edición que se publica, ya que cuando se lleva a cabo una nueva edición existe una reestimación de las emisiones de años anteriores debido a las actualizaciones de las metodologías de toma de datos [14].

Se ha publicado un avance de la edición 2020 que recoge la serie 1990-2018, como muestra la figura 6.5. En el avance, se estima que las emisiones brutas, medidas en

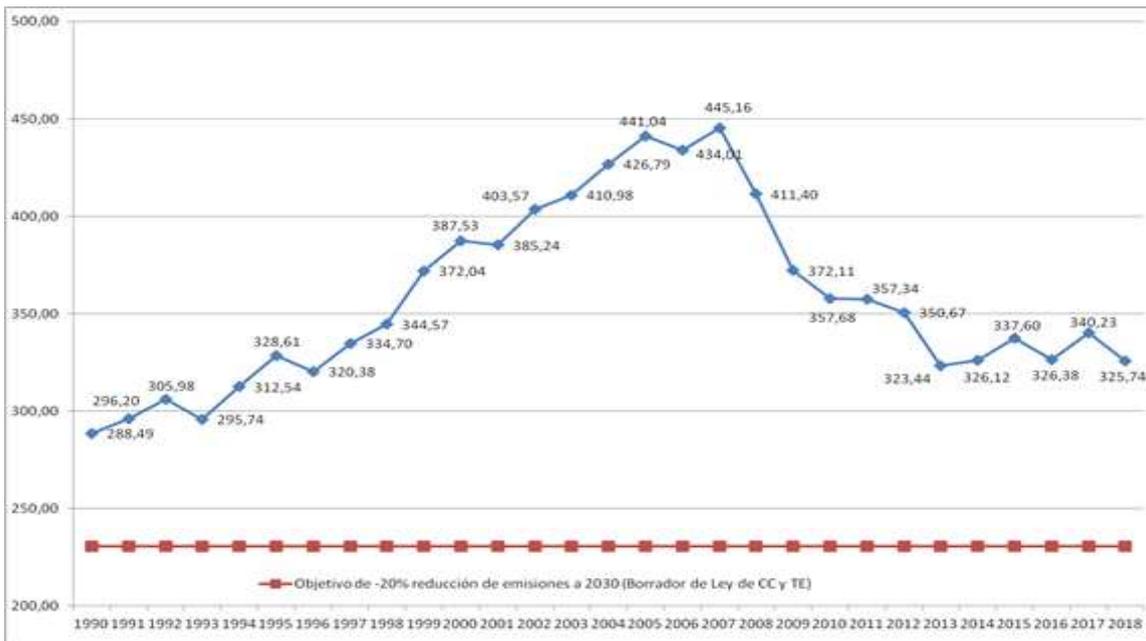


Figura 6.5. Evolución emisiones GEI (kt CO₂-eq) para el año 2018.

millones de toneladas de CO_{2eq} se sitúan en 332,8. El estudio de este dato implica un positivo respecto al año 1990 de +15,4%.

6.5. EL CALENTAMIENTO GLOBAL

El término “calentamiento global” se identifica con el aumento de la temperatura media no solo de la atmósfera, sino también de los océanos, como consecuencia de una actividad antropogénica por emisión de gases de efecto invernadero, como el CO₂.

En este sentido y en relación con el consenso científico sobre los efectos del calentamiento global, se estima que la temperatura media terrestre ha aumentado en un rango que va desde los 0.4°C a los 0.8°C con relación a los últimos 100 años. Mirando hacia el futuro, científicos pertenecientes al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático predicen que, si seguimos en esta trayectoria, la temperatura media global terrestre podría incrementarse entre 1.4°C y 5.8°C para el año 2100 [15].

Para ilustrar este hecho se presentan las figuras 6.6. y 6.7, tomando diferentes marcos geográficos. La evolución de las temperaturas se ha realizado también a diferentes escalas como puede apreciarse.

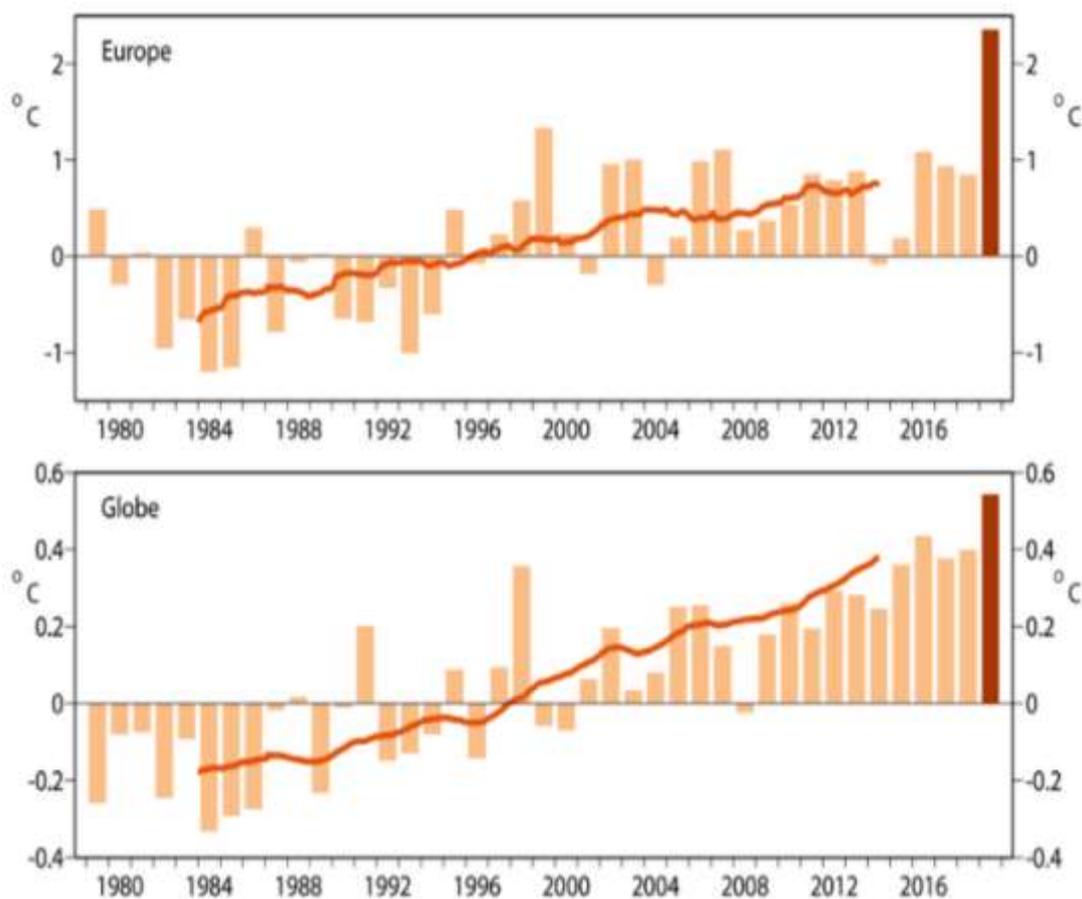


Figura 6.6. Evolución de la temperatura media en los últimos 30 años en el mes de junio, donde se aprecia el aumento considerable en el año en curso respecto a los anteriores no solo a escala europea sino también a nivel global. Fuente: ECMWF, Copernicus Climate Change Service.

Respecto a la figura 6.6, se puede hacer una lectura respecto al cambio que se produce a partir del 1996, momento en el que se pasa de un crecimiento negativo a uno positivo no dejando de crecer uniformemente hasta la actualidad, aunque aparezcan distintos picos representando máximos y mínimos relativos, la tendencia no deja de ser creciente. Observando la figura 6.7. se puede observar con claridad los picos máximos pertenecientes a las temperaturas medias anuales más calurosas en España.

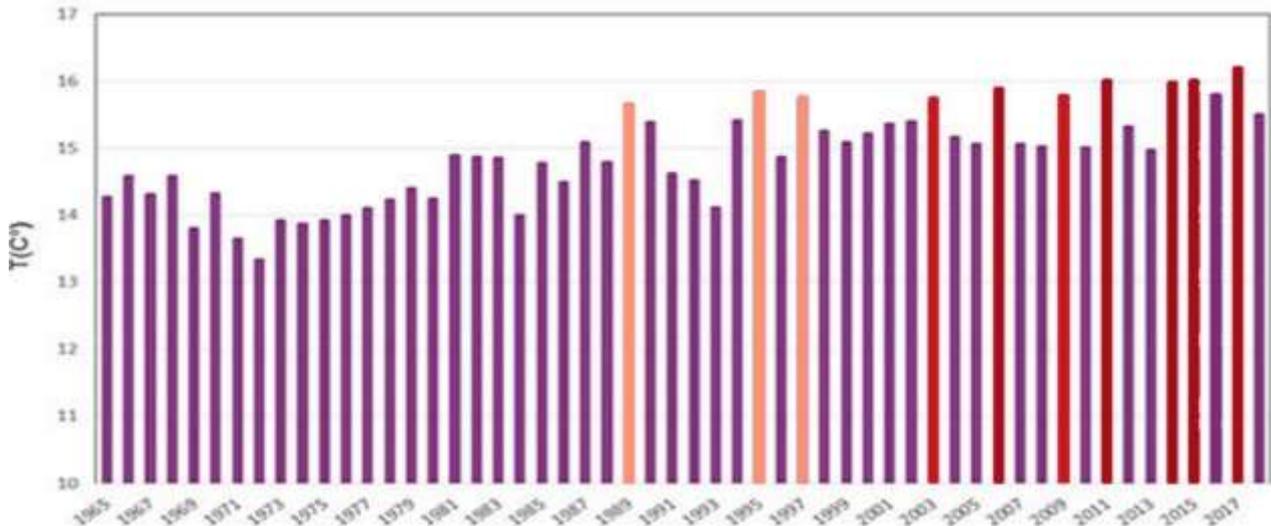


Figura 6.7. Serie histórica desde 1965 hasta 2017 de las temperaturas medias anuales españolas. Se puede ver que siete de los 10 años más calurosos acontecen y se agrupan en los últimos 20 años. Fuente: AEMET, Agencia Estatal de Meteorología.

6.5.1. Causas del calentamiento global

Se pueden distinguir varias causas o fuentes implicadas en el calentamiento global, por una parte, causas naturales y artificiales. En el primer caso, la acción del calentamiento global del planeta recae en la propia naturaleza como proceso intrínseco, con escasa capacidad de provocar por sí misma cambios climáticos drásticos, al contrario que en el segundo caso, cuya acción recae en el hombre y es de tal magnitud que está provocando cambio climático acelerado y drástico [16].

6.5.1.1. Causas naturales

Dentro de esta clasificación podemos encontrar tres principales causas naturales que inciden de manera clara en el proceso natural del calentamiento global, y que son:

- **La actividad solar:** actividad que acontece cada 11 años, en la cual tanto la estructura magnética como la actividad del Sol se sitúan entre un máximo solar, momento en que el Sol emite altos niveles de radiación solar, y que se caracteriza por una expulsión de material solar en grandes proporciones, en ese momento el sol presenta grandes manchas solares intensas, erupciones y otros fenómenos, y un mínimo solar, momento en el que no presenta actividad alguna. Estos cambios

se presentan en diferentes ciclos como se observa en la figura 6.8. y causan efectos en el espacio, la atmósfera y superficie de la Tierra, pero no son responsables directos del aumento de temperatura [17].

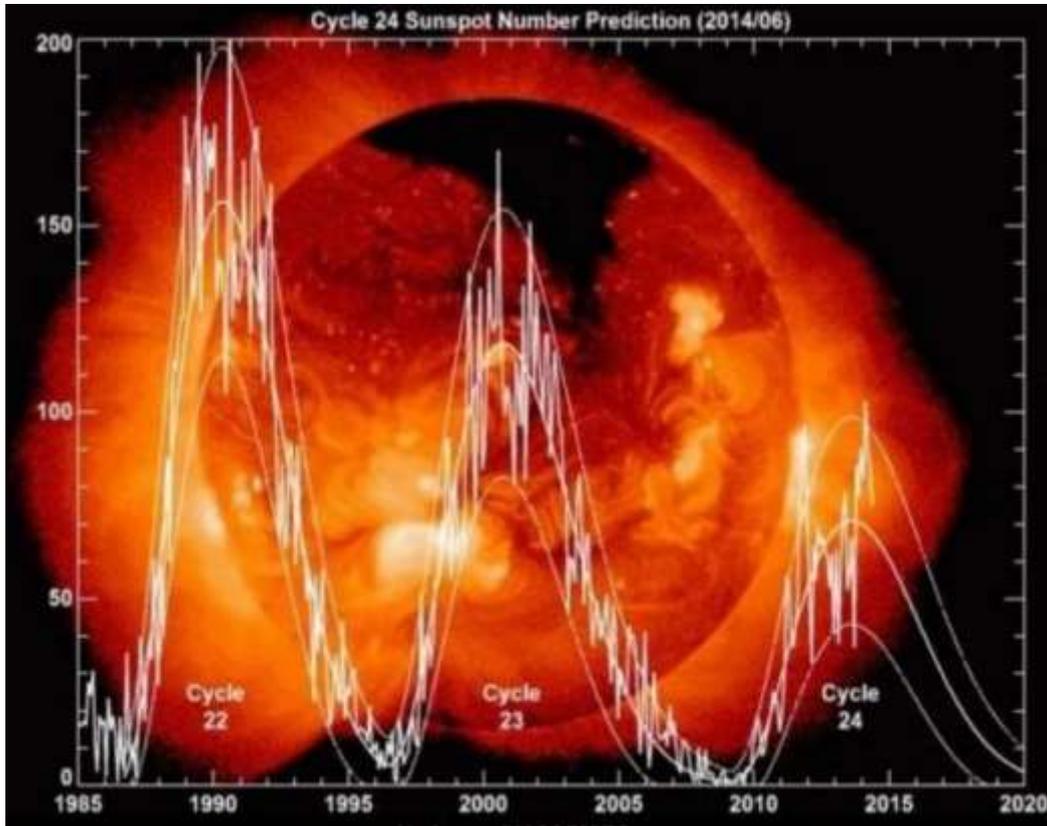


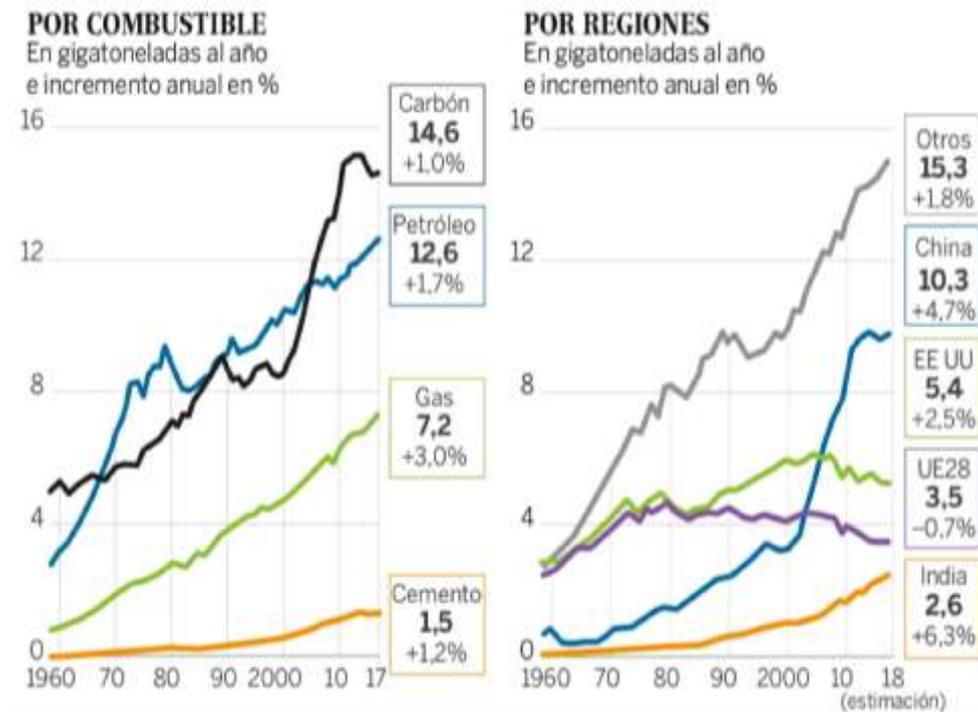
Figura 6.8. Actividad solar desde 1985 hasta 2015 junto con predicciones hasta el año 2020.
Fuente: NASA/Marschall Space Flight Center).

- **El aumento del vapor de agua:** los gases de efecto invernadero naturales, que por su abundancia en la atmósfera, presentan un rol muy importante dentro del balance energético de la tierra. Su implicación en el calentamiento global aparece como efecto secundario al aumentar la temperatura superficial terrestre. Este ascenso conlleva el consiguiente aumento en la humedad atmosférica, por consiguiente, las emisiones a la atmósfera elevan la humedad de ésta amplificando el proceso de calentamiento [18].
- **Los ciclos climáticos:** el clima terrestre depende de diversos factores lo que aporta a éste una cierta inestabilidad. De este modo, los diversos agentes implicados pueden actuar interrelacionados con un resultado común a todos ellos. Así podemos citar la acción del Sol, la variabilidad de la órbita y del movimiento terrestre, las grandes erupciones volcánicas y su emisión de grandes masas de polvo y gases, las variaciones en el magnetismo terrestre y también tanto los calentamientos como los enfriamientos que sufre la tierra [19].

6.5.1.2. Causas artificiales

Las causas artificiales generadoras de calentamiento global son:

- **Aumento de los gases de efecto invernadero:** es a partir de la Revolución Industrial cuando comienzan a registrarse una mayor emisión de GEI a la atmósfera como consecuencia del imparable aumento de la actividad industrial en el mundo. Esta frenética actividad es un actor muy importante de que nos encontremos con las altas tasas de concentración de GEI, interfiriendo así la salida de calor de las capas más inferiores de la atmósfera y creando el efecto invernadero, y por tanto el calentamiento.
- **Quema de combustibles fósiles:** este aspecto hace referencia al consumo de aquellos productos que tienen su origen en los procesos de descomposición natural de la materia orgánica tras sufrir procesos de transformación durante millones de años, como son el carbón, el petróleo y el gas natural, los llamados combustibles fósiles, y cuya combustión produce como residuo CO₂ y otros GEI. La serie histórica que presenta la figura 6.9., desde 1960 hasta el año 2018, refleja el efecto por regiones respecto al consumo de combustibles fósiles. Respecto a la gráfica de consumos por combustible, se observa con claridad como en todos éstos la tendencia en su consumo es ascendente desde 1960.



- **Deforestación de selvas y bosques:** el daño provocado por esta causa, contrario a las actuales creencias, es global. La falta de masa forestal o de pulmones verdes hace que la concentración de CO₂ aumente con el consabido aumento de la

temperatura. El proceso de la fotosíntesis es necesario para la captación y descenso de CO₂, reduciendo así la contaminación.

- **Excesivo uso de fertilizantes:** Causa directa también del calentamiento global por uso descontrolado de pesticidas, fertilizantes y otros químicos, entre cuyos componentes se encuentra el óxido de nitrógeno, el cual se considera un potente GEI.
- **Alta producción de residuo:** La demanda que el mercado actual genera en los consumidores hace de motor en cuanto a actividad industrial, contribuyendo a que exista un constante aumento en la producción de residuos. Esta generación de vertidos crea un ascenso en los niveles de metano por degradación de los materiales lo que termina en la aparición de más GEI en la atmósfera [16].

Un grupo de científicos, pertenecientes a la Universidad de Southampton y al Instituto Meteorológico Koninklijk holandés, han pronosticado que el periodo 2018-2022, por causas naturales, será más cálido de lo esperado. De esta manera, para dicho periodo, el calentamiento global ocasionado por el ciclo natural climático reforzará a éste a consecuencia de la incesante actividad antropogénica [20].

6.6. EL CAMBIO CLIMÁTICO

La figura 6.10, muestra una infografía que muestra de una manera rápida el fenómeno de cambio climático y así poder entender la implicación y relevancia del clima en cuanto a la calidad medioambiental del planeta.

El clima, sometido siempre a un estado de cambio continuo y de evolución en los patrones climáticos, se presenta como un campo complejo en cuanto a su estudio y entendimiento debido al entramado de factores que influyen sobre éste.

La lucha contra el cambio climático requiere de acciones colectivas asociadas tanto al modo de producción como al modelo energético.

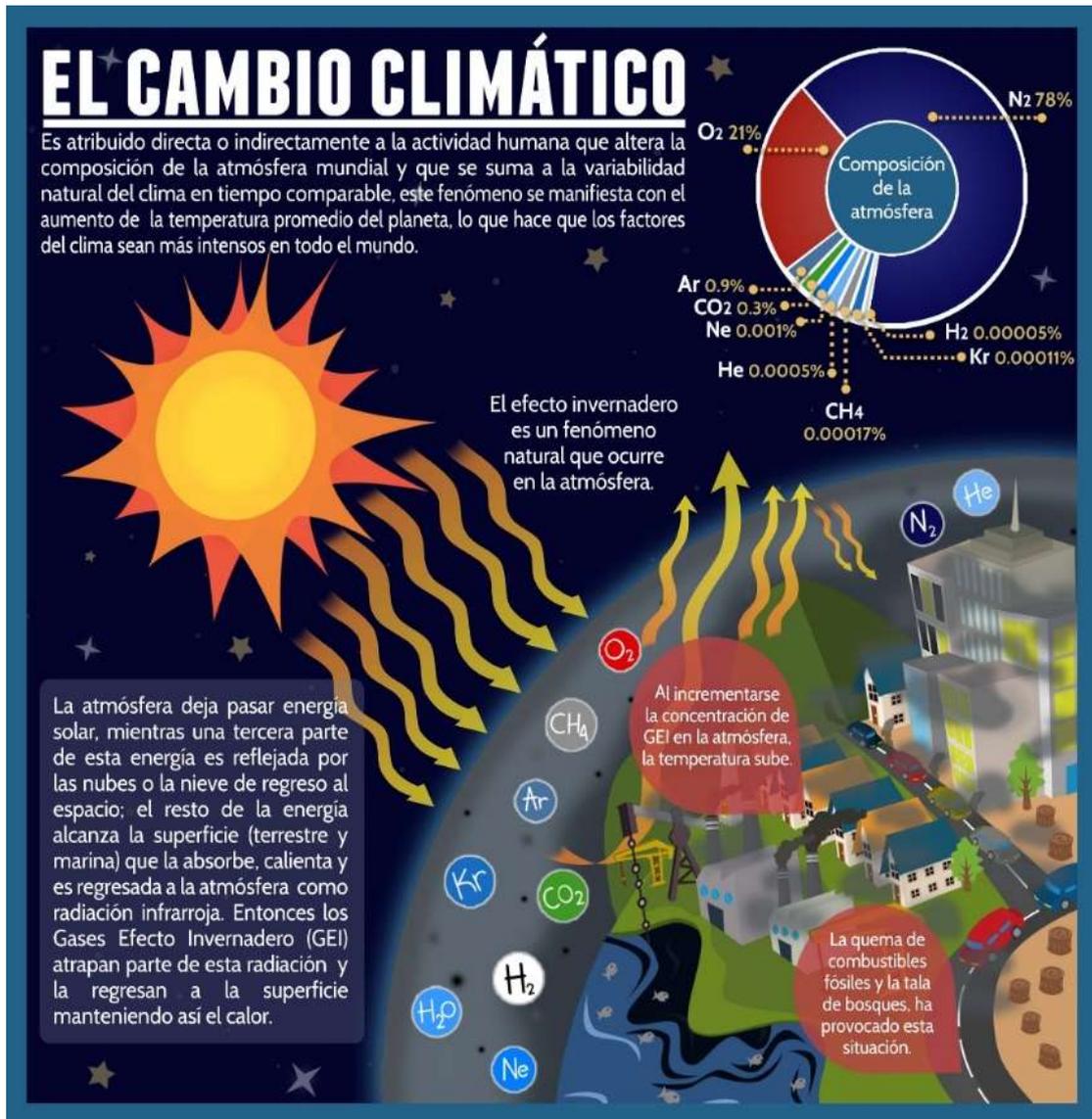


Figura 6.10. Imagen que detalla el primer plano del flexágono del cambio climático, la interacción entre el Sol y los diversos gases que integran la atmósfera terrestre, cómo ocurre de manera natural el efecto invernadero, y que debido a la quema de combustibles fósiles y la tala de bosques se incrementa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y se modifica la temperatura. Fuente: Joaquín Flores Ramírez, El flexágono del Cambio Climático. Instituto de Tecnología del Agua.

6.6.1. Factores del cambio climático

La ocurrencia del cambio climático se puede referenciar al proceso de interacción de distintos factores o procesos que culmina con un cambio significativo o relevante en el clima. Este cambio se debe principalmente a diferentes procesos o factores:

- **Factores naturales**, dentro de este grupo está principalmente la inclinación de la Tierra respecto al plano perpendicular a la órbita solar de 23.5°C, cuyo eje llega a modificarse un poco más de medio grado cada cien años, o los cambios que pueden acontecer respecto a la intensidad y actividad del Sol.
- **Procesos naturales**, principalmente, las emisiones de GEI a la atmósfera por la ocurrencia de actividad volcánica, corrientes oceánicas, etc. En este sentido, la

figura 6.11 muestra la anomalía del Golfo, modificación del sentido de circulación de las corrientes de los océanos debido a la absorción de la radiación solar por las masas de agua, ese fenómeno genera una alteración en el equilibrio en cuanto a balance energético.



Figura 6.11. Anomalía del Golfo. La corriente que asegura un clima templado a Europa está modificando su comportamiento por la influencia de aguas de deshielo polar. Fuente: LA VOZ

- **Factor humano o antropogénico**, la incidencia que el ser humano a través de la producción industrial, el consumo energético de combustibles fósiles o el propio uso del suelo que conlleva principalmente deforestación extrema.

De entre estos factores, la comunidad científica, cada vez más concienciada en referencia a este efecto devastador, pone el punto de mira hacia la creciente y clara incidencia que la acción antropogénica tiene en el cambio climático mundial [21][22].

Se refleja en la figura 6.12 la serie temporal de 300 años en cuanto a la concentración de CO₂ en la atmósfera, observándose un aumento continuo hasta 1958 y desde este punto la curva de concentración se dispara en positivo hasta nuestros días, evidenciando un aumento de casi 95 ppm desde hace 60 años frente a los 40 ppm en un periodo de más de 250 años.

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la ONU, IPCC, por sus siglas en inglés, creado en 1988, y cuyo objetivo es la obtención de una información científica y fiable, en su 5º Informe de Evaluación del 2013 concluyó que la actividad humana se traduce en un exponencial aumento de emisiones GEI a la atmósfera, que generan a su vez un ascenso de la temperatura mundial.

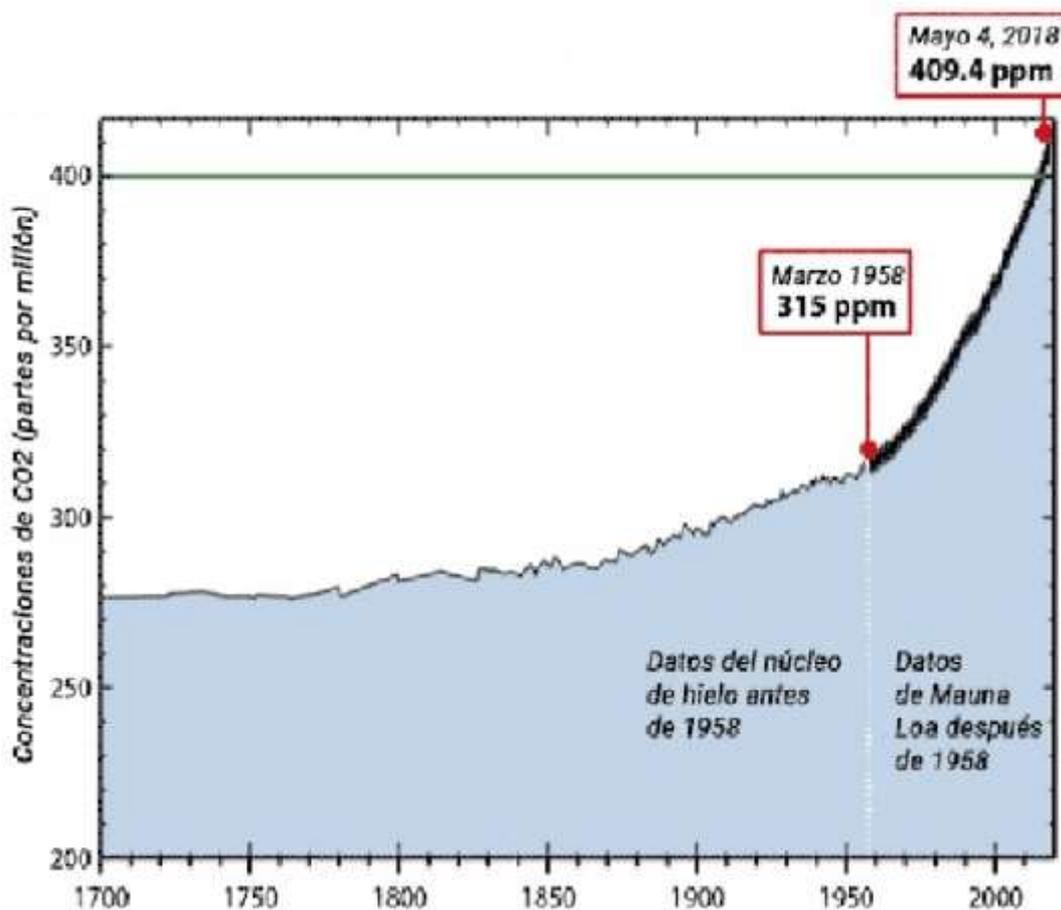


Figura 6.12. En la gráfica se muestra las concentraciones atmosféricas de CO2 en partes por millón, desde el 1700 al momento presente. Fuente: InsideClimate News. Scripps Institution of Oceanography.

Además del registro del aumento de 0,85°C en la temperatura media mundial en el pasado 2012 respecto a finales del siglo XIX, otro de los efectos significativos tratados en el Informe es el ascenso del nivel medio mundial del mar. En un intervalo de poco más de 100 años, 1901 a 2010, ha llegado a aumentar 19 cm a consecuencia de los efectos provocados por el progresivo calentamiento como son la expansión de los océanos y el deshielo ocurrido por el calentamiento (Figura 6.13).

Se estima que en el año 2065 haya aumentado entre 24 y 30 centímetros y para el 2100 desde los 40 hasta 63 centímetros, tomando como referencia el periodo 1986-2005. Respecto a este fenómeno, la figura 6.13 muestra que efectos tendrán lugar según el aumento en mm del nivel del mar (deshielo, expansión térmica y almacenamiento de agua en tierra).

También se constata que incluso en el caso de una interrupción en las emisiones globales de GEI, sus efectos seguirían notándose a lo largo de los siglos.

La pérdida de masa glaciar se encuentra entre uno de los efectos asociados al fenómeno de cambio climático. La figura 6.14 ilustra, utilizando la imagen del Glaciar Muir en diferentes momentos históricos, como en este espacio temporal, una diferencia de 115

años, el fenómeno que estamos comentado ha actuado sobre éste ocasionando la pérdida en su extensión respecto a su masa.

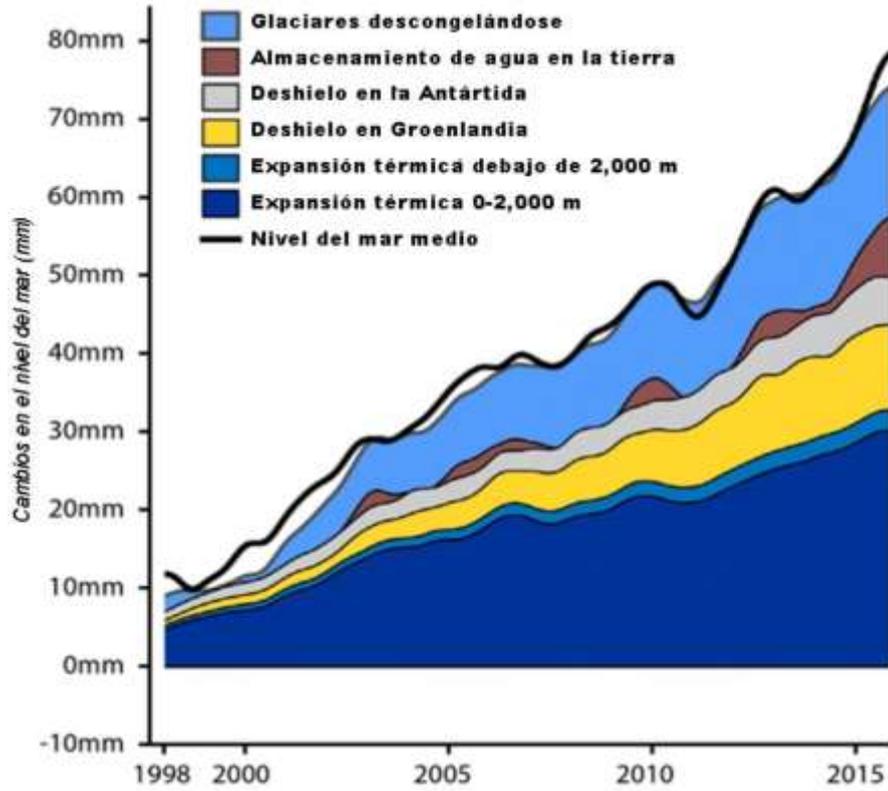


Figura 6.13. Aumento del nivel del mar y causas en escala de milímetros, 1998-presente. Fuente: Lijing Cheng, Instituto de Física Atmosférica, Beijing, China. InsideClimateNews.

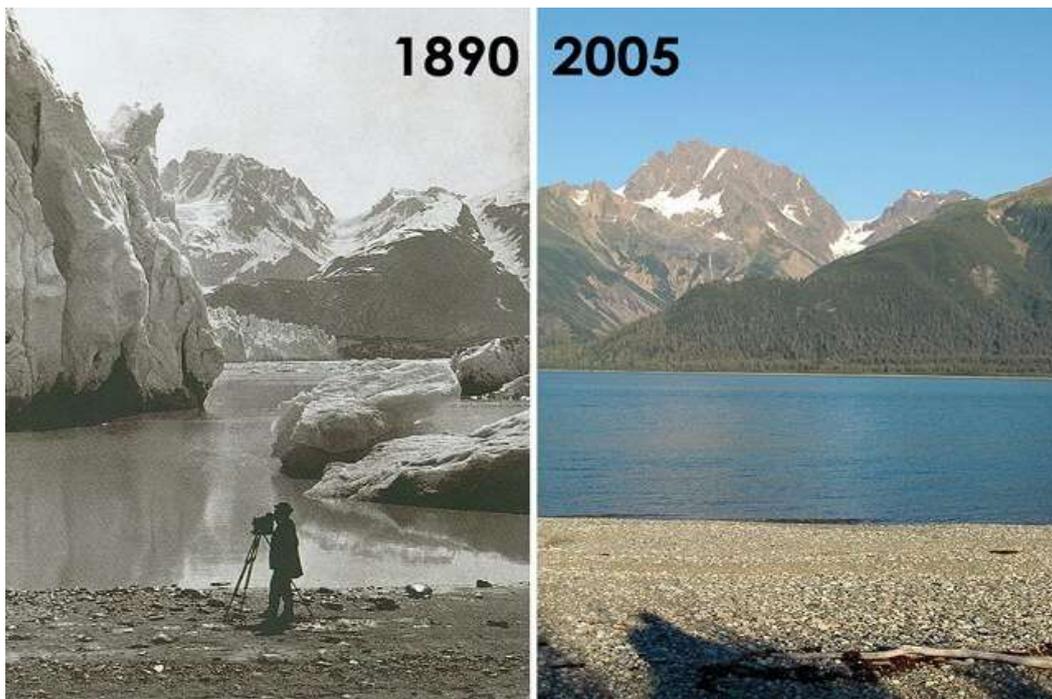


Figura 6.14. Glacier Muir. Fuente: Estados-Uni

6.6.2. Impactos asociados al cambio climático

Respecto a las consecuencias derivadas del cambio climático la tabla 6.2. recoge los efectos más esperados por este fenómeno.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO			
HÍDRICOS	MEDIOAMBIENTALES Y BIOLÓGICOS	SOCIALES Y ECONÓMICOS	
EFFECTOS GENERADOS	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de extensión marina de hielo de los casquetes polares y glaciares, El Ártico, la reducción o pérdida, desde 1979, se ha registrado de 1,07x106 km² de hielo cada diez años. - El deshielo está provocando la expansión de los océanos con el debido ascenso del nivel de mar, de 1901 a 2010 se ha calculado 19cm, lo que conlleva a la pérdida de territorio habitable por inundación. - Aumento de zona áridas tendiendo hacia la desertización debido a la evaporación del agua contenida en los humedales existentes en el planeta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los fenómenos climatológicos tales como precipitaciones, huracanes, tormentas torrenciales, etc. aparecerán con mayor frecuencia e intensidad provocando mayores desastres naturales provocando un deterioro en la calidad de vida. - Las corrientes marinas se verán afectadas lo que podría llegar a comprometer al actual panorama climático mundial. - Habrá un incremento respecto a periodos de sequía provocadas por extremas olas de calor, lo que conlleva a un creciente número de incendios forestales que determinarán la pérdida de la masa vegetal existente sobre la Tierra. - Una pérdida de biodiversidad tanto vegetal como animal debido a la no adaptación al nuevo sistema ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se incrementará el riesgo de pérdida de calidad de la salud por la reaparición de enfermedades virulentas con un mayor impacto debido a la transmisión por la baja calidad del agua - La aridez, sequía provocarán efectos de migración masiva hacia lugares fértiles, teniendo como consecuencia el aglutinamiento o concentración de población en espacios reducidos. - Gran impacto en sectores como la agricultura, energía, silvicultura, turismo, etc.

Tabla 6.2. Impactos por esperar del cambio climático. Fuente: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Elaboración propia.

En abril de 2016, el IPCC durante su 43ª reunión celebrada en Nairobi, acordó finalizar en 2022 el informe de síntesis IE6, coincidente con el primer balance mundial de la Convención Marco de la ONU sobre Cambio Climático (CMNUCC). De esta manera, se podrán examinar aquellos progresos alcanzados en cuanto a calentamiento global, más precisamente al objetivo de mantenerlo por debajo de 2°C. Por otro lado, seguirán los esfuerzos referentes a limitar el aumento de temperatura [23].

Asimismo, el sábado 8 de octubre del 2018, durante la 48ª reunión plenaria del IPCC, presenta y aprueba en Incheon (República de Corea) un Informe especial con un propósito muy claro, limitar el calentamiento global a 1,5°C.

En relación con todo lo citado previamente, la infografía presentada en la figura 6.15, perteneciente a la plataforma WWF, muestra los efectos asociados a un calentamiento global por aumento de temperatura de 2°C frente a uno de 1,5°C.

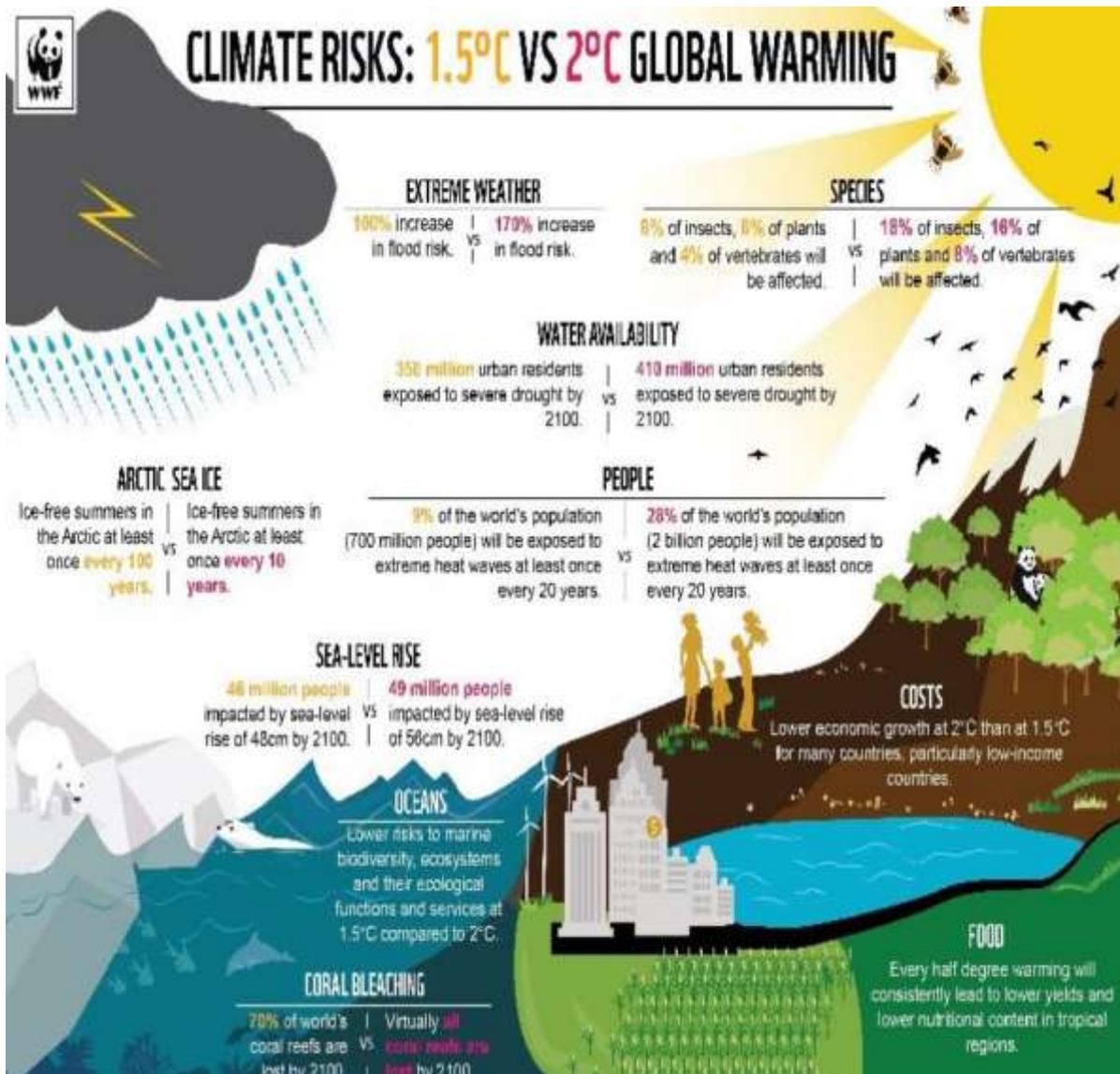


Figura 6.15. Infografía de los riesgos de una subida de 1,5 a 2°C. Fuente: WWF

Alcanzar, como objetivo, la limitación a 1,5°C requiere de la participación de todos los sectores de la sociedad en cuanto a profundos cambios estructurales y de mentalidad. El IPCC afirma que esta beneficiosa limitación conduciría hacia una sociedad más sostenible y equitativa tanto para las personas como para los ecosistemas naturales [24].

6.7. PRINCIPALES HITOS SOBRE MEDIOAMBIENTE, CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS NEGOCIACIONES.

En este apartado se va a tratar de situar cronológicamente aquellos acontecimientos más relevantes en materia de protección medioambiental desde 1860 hasta el presente. De esta manera se puede ver cómo ha ido progresando y avanzando la idea de comportarse sostenible y responsablemente con el entorno natural y frenar la intervención antropogénica, y por tanto el cambio climático.

- 1860 20 noviembre. John Tyndall (1822-1893), físico irlandés propuso que los cambios en concentración de gases en la atmósfera como vapor de agua o dióxido de carbono conllevan efectos climáticos. Es tomado como fundador de la ciencia del clima [25].
- 1896 Svante Arrhenius (1859-1927), científico sueco, proclama que podría darse un efecto de calentamiento de la tierra como efecto del uso de los combustibles fósiles. Asimismo, junto con Thomas Charberlim calcularon la posibilidad de un aumento de la temperatura por adicción de CO₂ debido a una acción antropogénica [26].
- 1920 G. M. Dobson lleva a cabo las primeras mediciones de ozono atmosférico utilizando un espectrógrafo, diseñado por el mismo, con un doble monocromador en el UV [27].
- 1958 Charles David Keeling, usando la tecnología más avanzada en esa época, inicia mediciones de CO₂ atmosférico en la Antártida y Mauna Loa, para obtener curvas de concentración que mostrasen la tendencia de las temperaturas registradas entre los años 1940 y 1970 [28].
- 1968 La Asamblea General de las Naciones Unidas, a través de la Resolución A/RES/2398 (XXIII), expresa la necesidad de intensificar esfuerzos para limitar e intentar, en lo posible, erradicar el deterioro del medio humano, y tener como mira la protección y la mejora del medio natural en pro de la raza humana [29][30].
- 1970 Charles D. Keeling publicó: “Si la raza humana sobrevive al siglo XXI con el enorme incremento de la población que hoy parece inevitable, la gente que entonces viva, entre otros muchos problemas, puede encontrarse con la amenaza del cambio climático ocasionado por un crecimiento descontrolado del CO₂ atmosférico procedente de los combustibles fósiles” [31].

- 1972 Del 5 al 16 de junio, Estocolmo, Conferencia Mundial con asistencia de 113 representantes de diferentes estados, casi la totalidad de organizaciones gubernamentales y más de 400 ONG. Se redacta la “Declaración de Estocolmo” a través del cual se asientan los criterios a aplicar respecto a las cuestiones ambientales en el entorno mundial [32].
- 15 de diciembre, aprobación de dos resoluciones por la Asamblea General de la ONU:
- A/RES/2994 (XXVII) declara el día 5 de junio como “Día Mundial del Medio Ambiente” [33],
 - A/RES/3000 (XXVII) establece el Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (PNUMA), para el desarrollo de programas medioambientales con trascendencia internacional [34].
- 1979 Ginebra, se celebra la **Primera Conferencia Mundial sobre clima**. Se trata principalmente el Calentamiento global y su afección a la actividad antropogénica, siendo reconocido como un problema global.
- Se establece un programa mundial sobre el Clima (PMC) cuyos responsables directos son WMO, el PNUMA y el ICSU [35].
- 1988 El 6 de diciembre, se establece el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC, bajo el mandato de la UNEP y WMO. A partir de ahora, se comienza una etapa de más información sobre el el seguimiento científico del cambio climático [36].
- 1990 Se publica el 1º informe de evaluación por el IPCC sobre el cambio climático. En éste se incluyen evidencias científicas que corroboran el CC. La Asamblea General de las Naciones Unidas comienza las negociaciones para la celebración de una Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, CMNUCC [37].
- 1992 Se celebra la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro. Se redacta un acuerdo que obligará a los firmantes a la adopción de medidas correctivas que conduzcan a una reducción o de las emisiones de GEI que provocan un aceleramiento del CC.
- 1994 El 21 de marzo, el CMNUCC firmado en Rio de Janeiro entra en vigor tras 50 ratificaciones [38].
- 1995 Firma del Protocolo de Montreal. La comunidad Internacional establece compromisos para la prohibición del uso de compuestos Clorofluorocarbonos (CFC) y Halones, utilizados como refrigerantes, disolventes propulsores de aerosoles [48] y poder frenar el adelgazamiento o depleción de la capa de ozono, conocido bajo el nombre de “Agujero de Ozono” [39].

Primera Conferencia de las Partes, **CP1**, celebrada en Berlín por el órgano supremo de la CMNUCC. Finaliza con el Mandato de Berlín, catálogo de compromisos que permite a los países la elección de sus propias iniciativas [38][40].

1996 Antes de la celebración en Ginebra de la **CP2**, el IPCC ultimó su Segundo Informe de Evaluación, en el que se confirma causa antropogénica del cambio climático y recomienda la adopción de medidas en función de los “objetivos cuantitativos vinculantes” que sean compatibles con el desarrollo sostenible y con la seguridad alimentaria, la justicia social, así como también con la riqueza de las naciones [38][40].

1997 11 de diciembre, Kioto, **CP3**. Durante esta 3ª conferencia se adopta el conocido “Protocolo de Kioto” basado en las conclusiones del CP2. Éste vincula jurídicamente a la UE junto con 38 países industrializados a la reducción en un 5% de los GEI, respecto a los niveles de 1990, entre el 2008 y el 2012 [38].

1998 29 de abril, New York, los países de la EU firma el Protocolo de Kioto unilateralmente [38].

Buenos Aires, noviembre, la **CP4** establece un plan bienal denominado Plan de Acción de Buenos Aires [38].

1999 El Plan de Acción de Buenos Aires sirve de modelo para redactar el programa de la **CP5**, que tiene lugar en Bonn [38].

2001 Bonn, finales de Julio, la **CP6** finaliza con los Acuerdos de Bonn, en los que se establece un sistema de intercambio de derechos de emisión, un mecanismo de desarrollo limpio (MDL), la disminución de emisiones, la absorción mediante sumideros y un régimen de cumplimiento [38].

Noviembre, Marrakech durante la **CP7** se establecen y especifican los aspectos jurídicos o normas de aplicación del Protocolo de Kioto, como nuevos instrumentos de financiación y planificación para la adaptación de éste, así como también la creación de un marco para la transferencia de tecnología [38].

2002 Lanzamiento del mayor satélite científico construido en Europa por la ESA el 1 de marzo, ENVISAT. Utiliza 10 instrumentos para un registro continuo en medidas de distintas variables medioambientales entre ellas, cabe destacar los diferentes gases atmosféricos, distribución de masas de agua marina, temperaturas, superficies heladas, etc [38].

Este satélite también cuenta con la instalación de MIPAS, interferómetro de alta resolución espectral [27].

Nueva Delhi, noviembre, la **CP8** se centra en la aplicación de los Acuerdos de Marrakech y en las cuestiones de la Convención [38].

- 2003 Milán, diciembre, la **CP9** adopta varias decisiones en cuanto a la realización de actividades de deforestación y reforestación dentro del marco del MDL [38].
- 2004 Buenos Aires, diciembre, la **CP10** se destaca por cuestiones en relación con la adaptación al CC. Se obtiene el programa de trabajo de Buenos Aires sobre medidas de adaptación y de respuesta [38].
- 2005 24 de enero, La NASA publica que el 2005 ha sido el año más caluroso desde el fin del siglo XX. Éste confirma un calentamiento en los últimos 30 años de 0,6°C y de 0,8°C [38].
- 16 de febrero, entra en vigor el Protocolo de Kioto, se incorpora Rusia. Australia, China, India y USA no adoptan el Protocolo [38].
- Montreal, noviembre y diciembre, se celebra la **CP11**. Se toma la decisión de un inicio de diálogo sobre la cooperación estratégica a largo plazo [38].
- Oslo, primera bolsa mundial para la compraventa de emisiones de dióxido de Carbono, CO₂ [41].
- 2006 Nairobi, celebración de la **CP12**, Programa de Trabajo sobre los efectos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático [41].
- 2007 Valencia, 17 de noviembre, el IPCC presenta un Informe declarando al cambio climático como un fenómeno “inequívoco” y con efectos “irreversibles” [40].
- El IPCC publica ya su Cuarto Informe de Evaluación [41].
- Bali, Indonesia, celebración de la **CP13**, 15 de diciembre, se acuerda la adopción de una Hoja de Ruta respecto al plan de acción de Bali y finalizar con el Protocolo de Kioto [40][41].
- 2008 Poznań, se celebra la **CP14** en la cual se lleva a cabo un programa de transferencia de tecnologías ecológicas para los países en estado de desarrollo [40].
- 2009 7 al 18 dic 2009. Copenhague, durante la **CP15**, se redacta el **Acuerdo de Copenhague**, texto jurídicamente no vinculante, por decisión de USA, China, India, Brasil y Sudáfrica, en el cual se presentan propuestas futuras de reducción o mitigación de emisiones de GEI dada la necesidad de limitar a 2°C el calentamiento global, tomando como referencia la época preindustrial. En sus anexos recogen compromisos voluntarios adoptados por parte de los países. No cambia nada respecto a las disposiciones vigentes, la Convención y el Protocolo de Kioto [40][41].
- 2010 10 de diciembre, Cancún, México, en el marco de la **CP16** se redacta y aprueba el Acuerdo de Cancún, basado en mecanismos no vinculantes y confirma todos aquellos compromisos adoptados por los países en la

conferencia de Copenhague del 2009. Extender el PK más allá de 2012 no conlleva ninguna solución.

Se crea el Fondo Verde para el Clima, como ayuda a países con pocos recursos para afrontar el Cambio Climático [40].

- 2011 28 nov – 9 de dic, Durban, Sudáfrica, celebración de la **CP17**. Se formula y acepta la “Plataforma de Durban” como una Acción Reforzada, en la cual los países implicados adoptan un acuerdo nuevo, universal y legal para hacer frente al problema global del cambio climático que entre en vigor después del 2020. Mediante este acuerdo y hasta que entre en vigor, se extiende el PK [40].

12 de diciembre. Canadá se retira del PK debido a la no posibilidad de cumplir con los compromisos adquiridos y mantener los yacimientos petrolíferos en producción [41].

- 2012 20 – 22 de junio, se celebra la Cumbre de la Tierra, Río de Janeiro. El objetivo es lograr un compromiso con el desarrollo sostenible, se examina el progreso realizado hasta la fecha [42].

Doha. Se lleva a cabo la **CP18**, prorrogando el protocolo de Kioto [40].

- 2013 En Varsovia se celebra la **CP19**. En esta reunión, varios países incluyendo Polonia se oponen al acuerdo en reducir las emisiones GEI. Se concreta una hoja de ruta con vistas a un pacto global y se dejan temas a tratar para la cumbre en Lima [40].

- 2014 Copenhague, noviembre. El IPCC presenta el 5º Informe sobre Cambio climático, AR5 por sus siglas en inglés. En esta ocasión se hace hincapié en la evaluación de aspectos socioeconómicos del CC [43][44].

La **CP20** tiene lugar en Lima, Perú, en diciembre. En esta reunión, tanto Estados Unidos como China declaran su intención de reducción de emisiones de GEI. Para la ONU, su principal objetivo es la reducción entre un 40% y un 70% para 2050 y para finales de siglo llegar a una emisión cero [40][42].

- 2015 Septiembre. La Asamblea General de las Naciones Unidas con una visión hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental, totalmente renovadora, aprueba la **Agenda 2030** sobre Desarrollo Sostenible. Cuenta con 17 objetivos de Desarrollo Sostenible, **ODS**, los cuales sirven de herramienta de planificación a los países tanto a nivel nacional como local. Incluyendo la eliminación de la pobreza, la educación, la igualdad de las mujeres, la lucha contra el cambio climático, la defensa del medio ambiente o el diseño de las ciudades. Objetivos clave de oportunidad histórica para los países latinoamericanos y del Caribe [45].

Se celebra en París la **CP21** [52] que se cierra con un convenio mundial de lucha contra el Cambio Climático, el **Acuerdo de París**, firmado por 197 países. El Acuerdo contempla la limitación al actual aumento de la temperatura en 2°C [40].

- 2016 Del 7 al 18 de noviembre, se celebra en Marrakech la **CP22**, la cual pretende dar voz a los países más vulnerables, como los africanos y los pequeños Estados insulares en Desarrollo, SIDS por sus siglas en inglés, frente al cambio climático.

Los países firmantes se han responsabilizado con el hecho de evitar alcanzar los 2°C respecto a los niveles preindustriales [46].

- 2017 1 de junio de 2017. La administración Trump (USA) abandona el Acuerdo de París sobre cambio climático [47].

Del 6 al 17 de noviembre, bajo la presidencia de Fiji, tiene lugar en Bonn la **CP23**. Los logros obtenidos en esta Conferencia de las Partes de la Cumbre del Clima son por un lado, la implicación política para el continuo apoyo al Acuerdo de París y la responsabilidad tanto civil como empresarial en cuanto a seguir apoyando el ambicioso enfoque en acción climática [48].

- 2018 3 dic al 14 dic, se celebra en Katowice, Poland, la **CP24**. Entre los principales objetivos conseguidos: acuerdo normativo para llevar a cabo la realización del diagnóstico global que tendrá lugar en el 2023, la iniciativa de la aprobación de un objetivo nuevo para el 2025: la financiación climática global, también se aprobaron diferentes medidas en cuanto a mejorar la información y las actuaciones de adaptación al CC, Se acuerda crear un Comité que actúe frente al Cumplimiento del Acuerdo de Paris [49].

El IPCC publica en octubre el reporte especial sobre los impactos del calentamiento global de 1,5°C por encima de los niveles preindustriales y las rutas de emisiones de gases de efecto invernadero.

Julio 2018 presenta una anomalía de +0.78°C, lo que le convierte en el tercer mes más cálido en la historia desde 1880 [50].

- 2019 2 dic al 13 de diciembre, Madrid, España, se celebra la **CP25** bajo la presidencia de Chile. En la clausura de esta cumbre del clima, realizada el 15 de diciembre se concluye bajo el acuerdo denominado “Chile-Madrid Tiempo de Actuar” [40].

6.8. ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

El Cambio Climático, dentro del contexto de Naciones Unidas, representa una apuesta multilateral de todas las partes implicadas con un objetivo claro, combatir este

inminente y creciente problema. Mirando hacia el contexto internacional, el principal acuerdo tomado sobre lucha por el clima es La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, CMNUCC, UNFCCC por sus siglas en inglés.

CMNUCC es ya un acuerdo ratificado por 195 países, entre ellos España, tiene su origen en 1992 durante La Cumbre de la Tierra, reunión que tuvo lugar en Rio de Janeiro y pertenece a uno de los tres convenios que se adoptaron en esta reunión mundial. Representa un medio colaborador de los países para hacer frente a las consecuencias que conllevan, por un lado, el aumento progresivo de la temperatura media global y por otro el Cambio Climático.

De los asuntos pertenecientes a la CMNUCC, el Consejo de la UE maneja dos asuntos importantes:

- El primero, relacionado con los compromisos acordados para el periodo que abarca desde el 2013 al 2020 que conlleva la ratificación de la enmienda de Doha y el Protocolo de Kioto.
- El segundo, el Acuerdo de París, su ratificación, la aplicación y su entrada en vigor para el año 2020.

6.8.1. El Protocolo de Kioto

A mediados de los años 90 y después de tres años de ser aprobada la CMNUCC, la CP2, concluye con la existencia de unas crecientes y descontroladas cantidades de emisiones GEI a la atmósfera, las cuales están provocando un cambio progresivo en el clima. Los países integrantes de la CMNUCC ven como objetivo internacional la reducción de esas altas emisiones GEI bajo una normativa común a todos.

Este es el marco inicial dentro del cual, en 1997 se aprueba por parte de la CMNUCC, un prometedor instrumento jurídico denominado Protocolo de Kioto [51].

El primer periodo de este instrumento jurídico es 2008- 2012, y establece, por primera vez, para los países desarrollados y economías de transición la reducción de sus emisiones GEI en un 5% tomando como referencia los niveles registrados en 1990 [52].

Respecto a este periodo, se presentan las figuras 6.16 y 6.17, obtenidas de la Agencia Europea del Medio Ambiente, en la cuales se muestran las emisiones de CO2 por países y por sectores respectivamente.

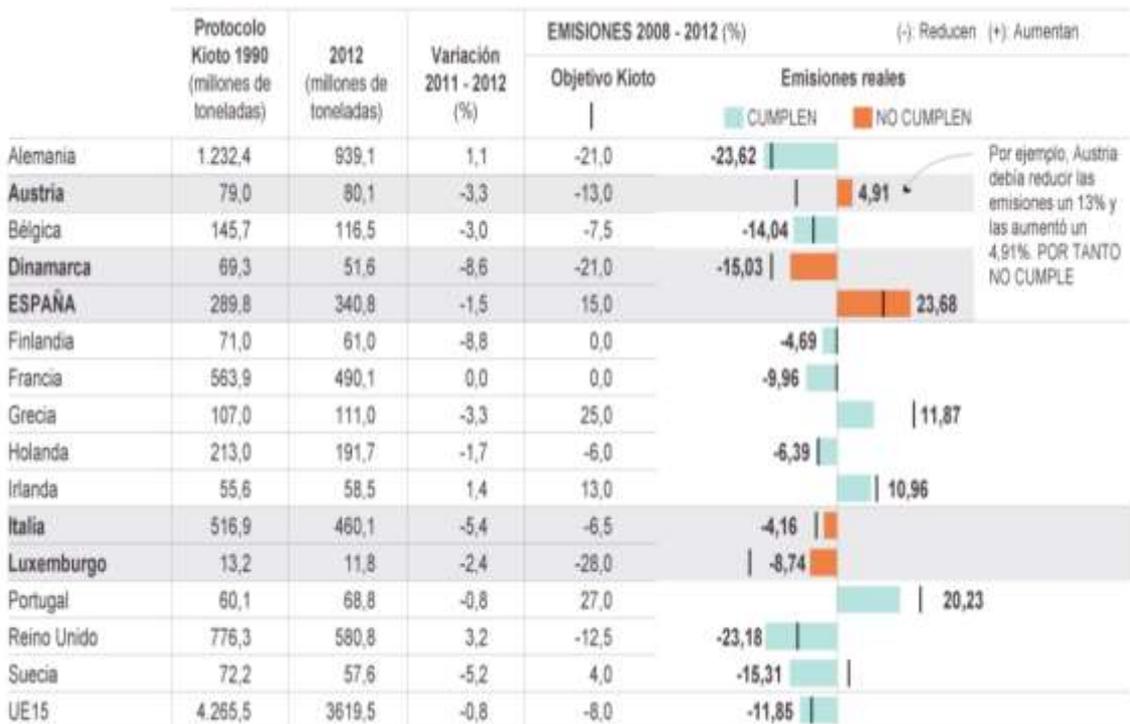


Figura 6.16. Emisiones de CO₂. Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente.

En el segundo periodo, 2013-2020, se aplica la enmienda de Doha al Protocolo de Kioto, coincidente con la cumbre de 2012 con representación de los Estados miembros de la EU junto con otros 38 países desarrollados. Los compromisos tomados en cuanto a reducciones GEI, reflejan un claro convencimiento por parte de los países implicados en frenar el cambio climático. Se determinan nuevos valores de reducción hasta un 18% como mínimo, volviendo a tomar referencias en los datos tomados en 1990, como muestra la figura 6.17 en su primera columna de datos recogidos.

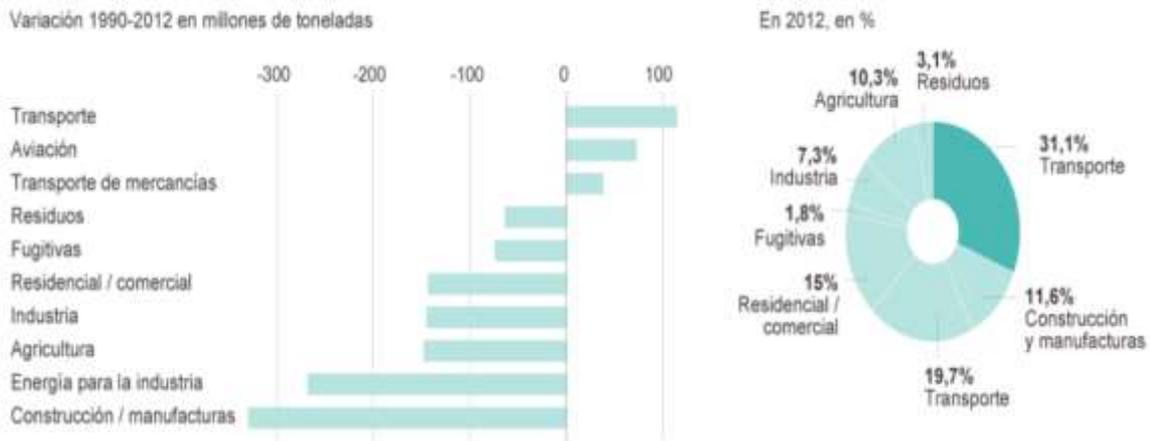


Figura 6.17. Emisiones de CO₂ por sectores. Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente.

En cuanto a limitación o reducción de GEI, los compromisos no vinculantes establecidos en éste son adoptados por más de 70 países desarrollados y en desarrollo, aunque entre éstos, hay países no participantes como Estados Unidos o Canadá, Rusia, Japón o Nueva

Zelanda. Por su parte, la EU, incluyendo España, asume como propio reducir sus emisiones en un 20% para este segundo periodo [51].

Este hecho conduce a que la aplicación de reducción sólo represente un 14% del total en cuanto a emisiones mundiales de GEI.

6.8.2. El Acuerdo de París

En diciembre de 2015, se celebra en París la CP21. Los países participantes llegan a un nuevo acuerdo mundial en la lucha contra el Cambio Climático: el Acuerdo de París.

El objetivo de este acuerdo es que se ratificara por un número de países para alcanzar entre todos un mínimo un 55% de las emisiones mundiales de GEI. Actualmente, los 63 países que han ratificado el Acuerdo representan un 52,11 % del porcentaje total. La figura 6.18. muestra las condiciones de ratificación necesarias para llevar adelante el Acuerdo de París.

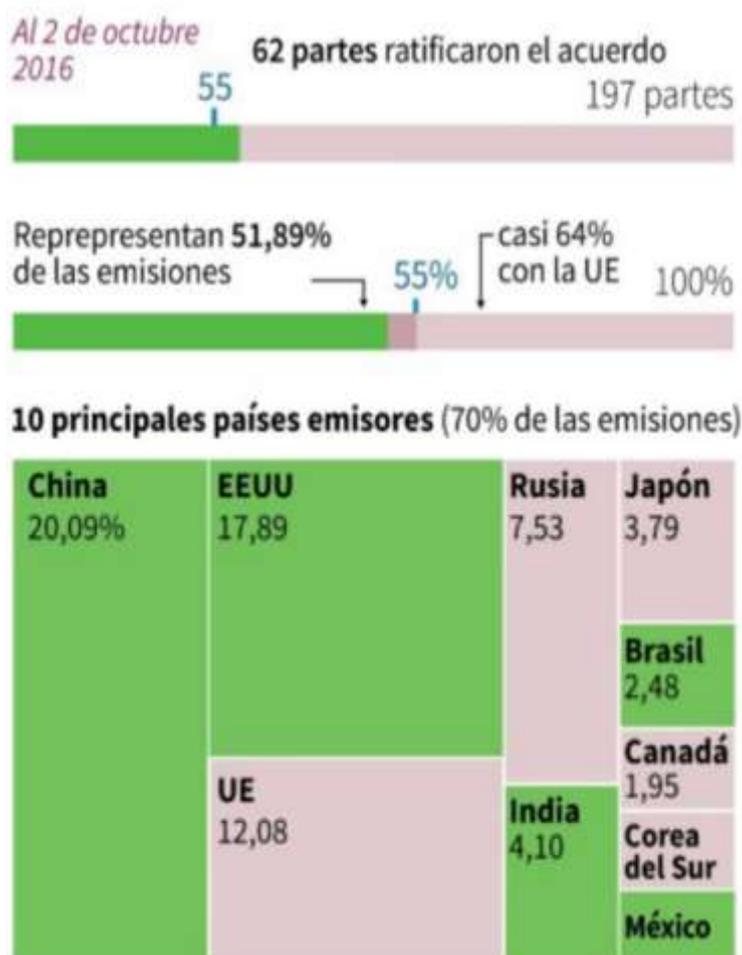


Figura 6.18. Condiciones de ratificación para el Acuerdo de París.

Fuentes: ONU, Climate analytics *180 países lo firmaron.

La cronología perteneciente al Acuerdo queda recogida en la figura 6.19. Asimismo, la figura 6.20 presenta a diferentes colores los países que ratificaron, los que firmaron y los que se retiraron o no firmaron el Acuerdo.



Figura 6.19. Cronología de entrada en vigor del Acuerdo del París. Elaboración propia.

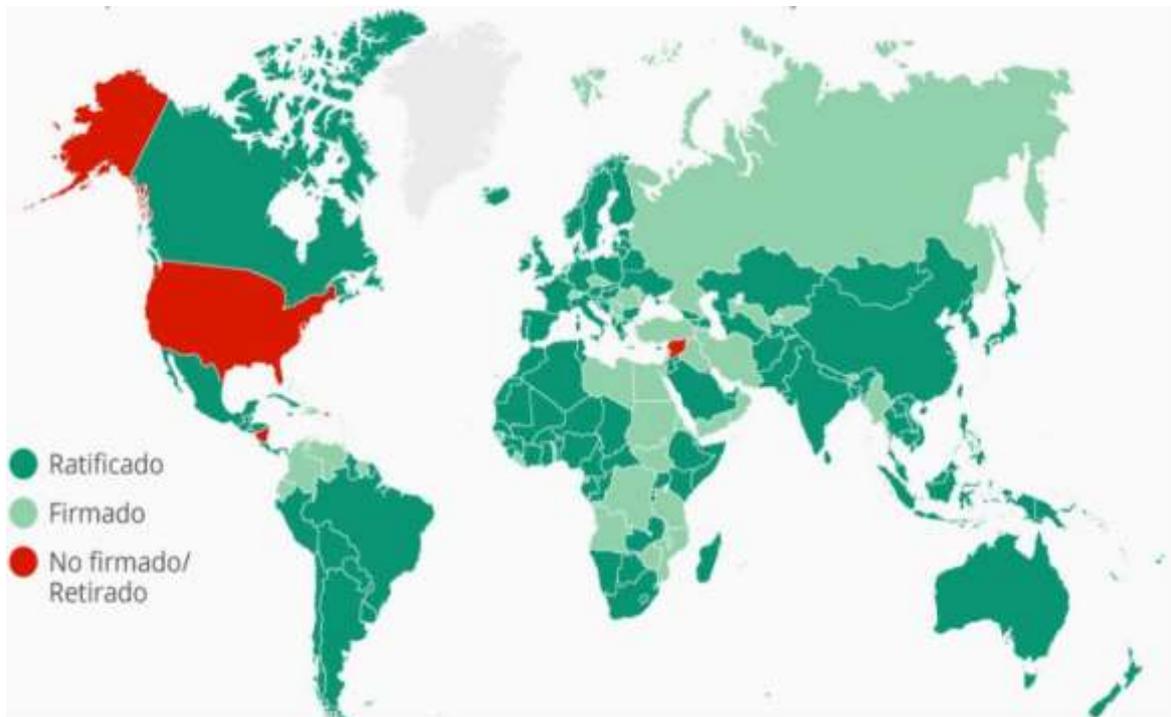


Figura 6.20. Países que han ratificado o firmado el Acuerdo de París a 1 de junio de 2017. Statista. Fuente: UNFCCC, Business Insider.

La tabla 6.3 recoge los acuerdos o puntos más importantes que fueron alcanzados en el Acuerdo de París durante su celebración [53].

	Respecto a los niveles de emisión de la época preindustrial, se acuerda una limitación a largo plazo, 2020, del calentamiento mundial muy por debajo de 2°C, aunque su verdadero objetivo es una reducción hasta los 1.5°C.
	Los países integrantes, tanto antes de la CP21 como durante su celebración, presentan sus planes nacionales de actuación de reducción de emisiones como lucha contra el cambio climático.
	Se acuerda la comunicación de las contribuciones por parte de cada gobierno cada cinco años con el ambicioso propósito de fijar nuevos objetivos.
	Garantizar una total transparencia y supervisión a través de una mutua información y manteniendo informada a la sociedad respecto a que objetivos han sido cumplidos.
	Apoyo por parte de los países desarrollados, a través de financiaciones, a todos aquellos países en vías de desarrollo, no solo para llevar a cabo la disminución de sus emisiones sino también para facilitar su resiliencia en cuanto a efectos medioambientales.

Tabla 6.3. Tabla de los principales acuerdos tomados en el Acuerdo de París. Fuente: European Council. Council of the European Union. Elaboración propia.

6.8.3. El Régimen de comercio de derecho de emisión de la UE, RCDE UE

La política europea, en 2005 introduce un sistema de comercio denominado Régimen de comercio de derecho de emisiones, RCDE EU, EU ETS por sus siglas en inglés. Este régimen se entiende también como un instrumento, económicamente eficiente y rentable, de freno a las emisiones de GEI presentes y futuras.

Entre los 31 países que conforman el comercio de emisiones se encuentran los 28 estados miembros de la EU junto con Islandia, Liechtenstein y Noruega, en Norteamérica, países miembros del RGGI y del WCI y así como Australia, Nueva Zelanda y el Gobierno Metropolitano de Japón.

Permite a estas empresas de gran consumo y compañías aéreas la comercialización, compraventa, de derechos de emisión entre ellas según necesidades. Manteniéndose siempre en un régimen establecido a un límite máximo de emisiones garantizando así el principio de reducción de emisiones de GEI con el coste más reducido.

El RCDE EU ETS representa un sistema de “limitación y comercio”. Instrumento limitante de casi el 50% del volumen total de las emisiones de GEI procedentes tanto de las 11.000 compañías entre y en los países participantes del Régimen.

Además de la compraventa de derechos, las empresas mencionadas tienen capacidad para realizar la compra limitada de créditos internacionales enmarcados en proyectos mundiales cuya finalidad sea la reducción de emisiones. En cuanto al número total de los derechos a disposición, el límite sobre éstos avala su valor.

Todas las empresas implicadas en este sistema, al finalizar el año en curso, entregarán tantos derechos como emisiones propias tengan que cubrir y de esta manera no contraer sanciones. En otro sentido, las empresas pueden reducir sus emisiones pudiendo así conservar los derechos no utilizados, así podrán utilizarlos de nuevo, o bien cubriendo sus propias necesidades futuras o bien las necesidades de otras empresas a través de su venta.

La figura 6.21 muestra las distintas fases de este Mercado que se ve sometido a diferentes ajustes y mejoras. En la actualidad nos encontramos en la recta final de una tercera etapa, la cual abrirá las puertas a una cuarta.

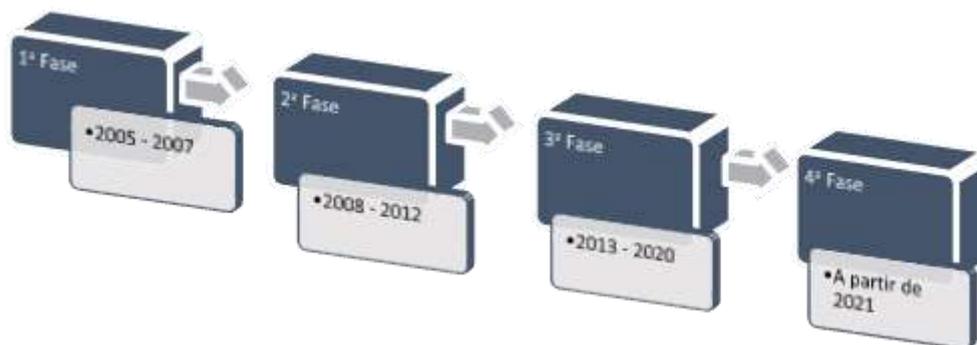


Figura 6.21. División de fases del Régimen de comercio de derecho de emisión de la UE. Fuente: EU ETS Handbook. Elaboración propia.

La nueva fase, 2021-2030, contendrá, como ha pasado en anteriores etapas, nuevos criterios de ampliación y mejora con el fin único de alcanzar objetivos de reducción de emisiones sujetas a los marcos legales existentes. Además, en lugar de la existencia de una asignación gratuita, como venía estableciéndose en las anteriores etapas, el método generalizado de asignación de derechos de emisión pasa a ser la subasta.

El RCDE UE, a nivel mundial, representa el primer régimen internacional de comercio de derechos de emisiones, representando más de tres cuartas partes del comercio internacional de carbono. Las figuras 6.22 y 6.23 muestran países que cuentan con programas de comercio de emisiones, en América como en el resto del mundo, respectivamente [54].

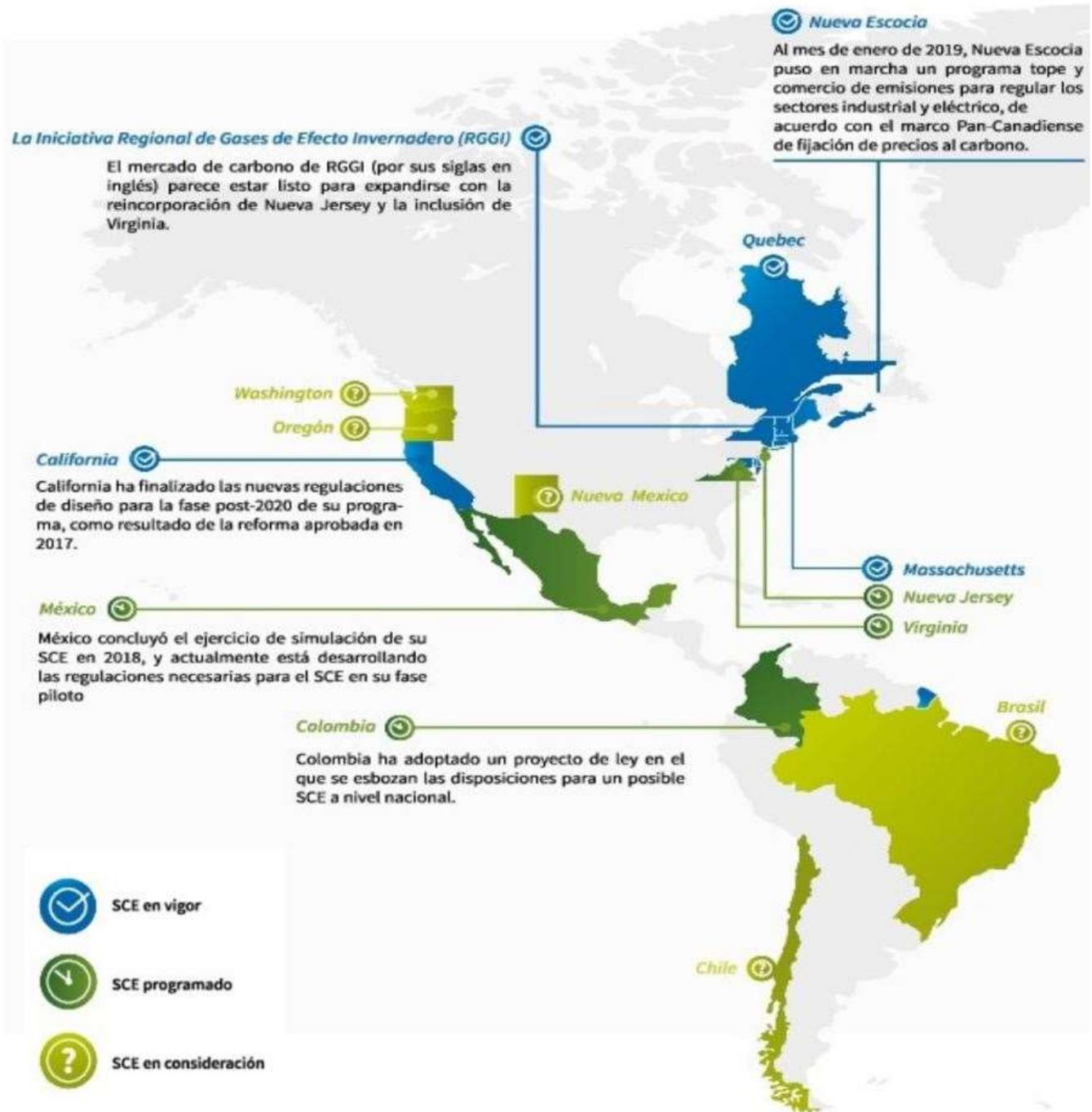


Figura 6.22. Países americanos que cuentan actualmente con programas de comercio de emisiones (tope y comercio) en 2019. Fuente: infografías del Status Reporte 2019 de ICSP

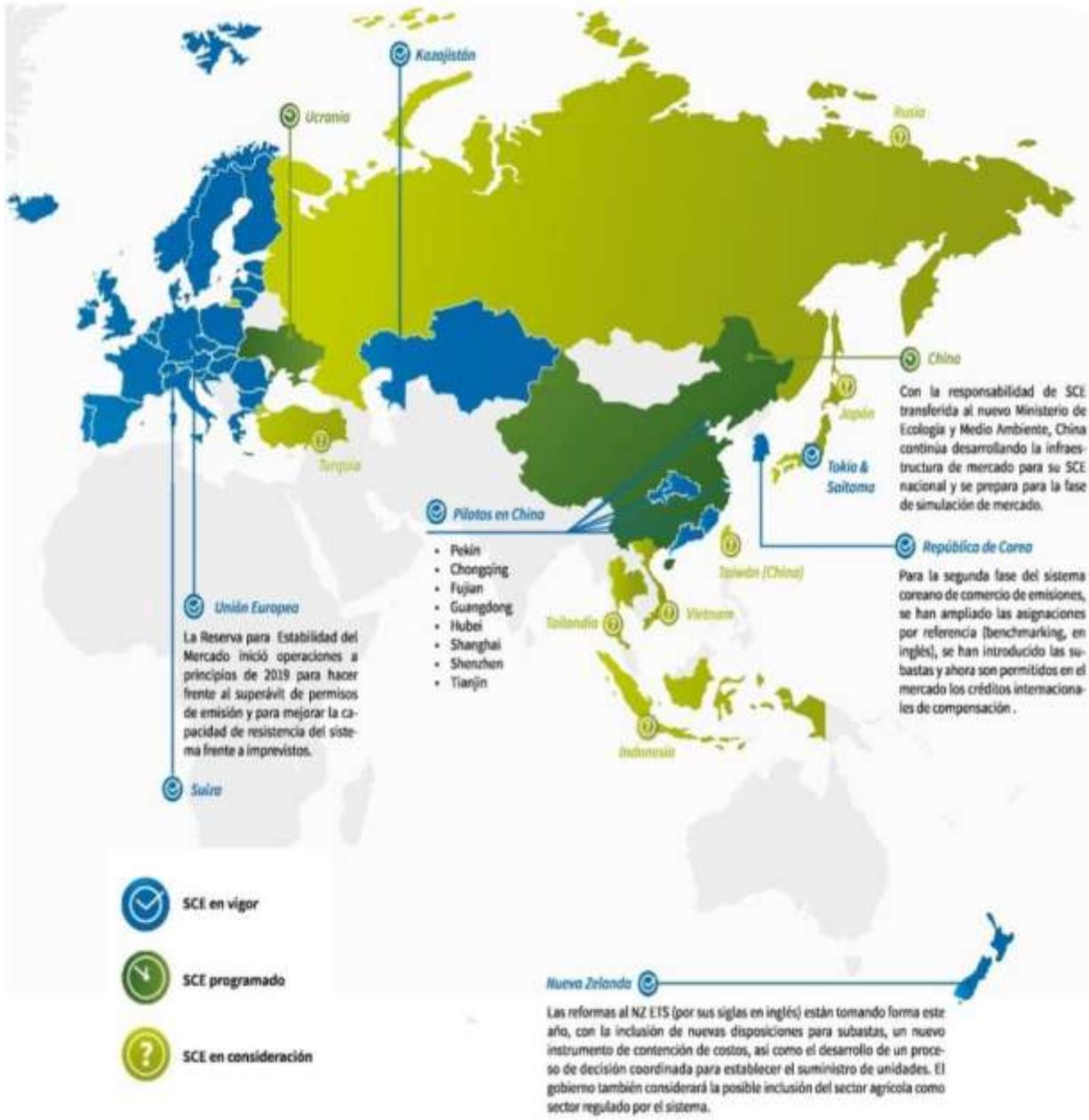


Figura 6.23. Países que cuentan con programas de comercio de emisiones (tope y comercio) en 2019. Fuente: infografía del Status Reporte 2019 de ICAP.

6.9. PRINCIPALES FUENTES DE GEI

Tomando como referencia inicial los niveles de emisión de la época preindustrial es evidente que las emisiones de GEI debidas a la actividad antropogénica han aumentado llegando a superar esos niveles de referencia.

La figura 6.24. ilustra las emisiones registradas en 2015 en la EU por sectores económicos. Se aprecia la necesidad de llevar a cabo actuaciones que conduzcan hacia una reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera, con el enfoque de la

mitigación del cambio climático, realizando, por un lado, actuaciones en los principales focos o fuentes de emisión y potenciando, por otro lado, los sumideros o captadores de CO₂.

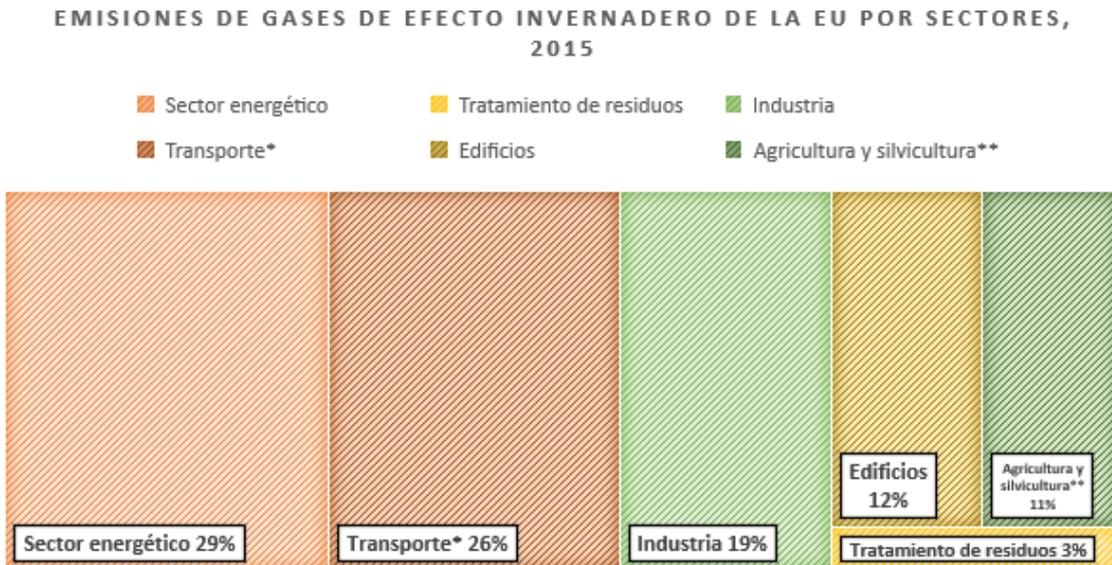


Figura 6.24. Emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea por sectores de emisión, 2015. Fuentes: European Environment Agency. Data viewer, AEMA, 2017. Elaboración propia.

* Incluidas la navegación y la aviación internacionales

** Excluido el sector UTCUTS

Tomando como referencia el Informe de Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en su edición de 2019, los sectores cuyas contribuciones de GEI son mayores serían los siguientes:

- El transporte
- La agricultura, la silvicultura y otros usos de suelo (AFOLU)
- Producción eléctrica y térmica
- Edificios
- La producción industrial
- Otras energías

6.9.1. EL TRANSPORTE

El sector transporte desempeña un papel importante en nuestra sociedad, pero a su vez, está considerado como una de las fuentes de emisión de CO₂ más importante a nivel mundial. El transporte, en sí mismo, conlleva un impacto tridimensional respecto a su contribución al cambio climático, a la contaminación atmosférica y al ruido.

Desde la perspectiva del territorio, el transporte representa una vasta ocupación de éste, tanto en extensión como en localización, lo que contribuye a una fragmentación de hábitats, sellado de superficies y a una descontrolada expansión urbana [55].

El sector transporte, como fuente de emisión y desde el punto de vista de GEI emitidos, genera dos tipos principales de emisión:

- **Las emisiones directas:** Debidas a la utilización directa de combustibles fósiles en los diferentes tipos de vehículo terrestres, incluido el transporte ferroviario, y el marítimo o aéreo, entre otros.
- **Las emisiones indirectas:** Provocadas por la circulación de productos desde el productor hasta el consumidor. Esta distancia tiene tendencia a aumentar debido a la globalización e incrementa de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Para ver la relación en porcentajes diferenciados debidos al transporte, se presenta la figura 6.25., en la cual se pueden ver la influencia de los diferentes tipos de transporte. Remarcar que del total de las emisiones de GEI a la atmósfera, el 26% están asociadas a un transporte nacional e internacional, correspondiendo con un 73% del mismo, al transporte por carretera [56].

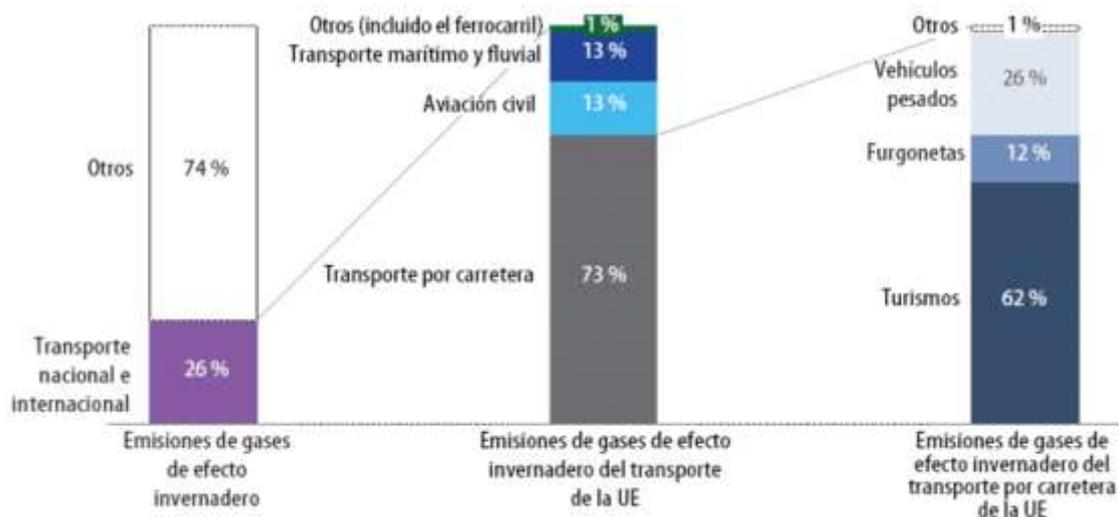


Figura 6.25. Emisiones de GEI en la UE en el sector del transporte en 2015. Fuente EEA Greenhouse gas – Data viewer, AEMA, 2017, análisis del TCE.

6.9.2. LA AGRICULTURA, LA SILVICULTURA Y OTROS USOS DEL SUELO (AFOLU).

Este sector es un gran consumidor de diferentes tipos de recursos naturales, la necesidad de grandes extensiones de suelo y cantidades considerables de agua para irrigación le genera una gran dependencia de éstos. Por lo tanto, está asociado a la generación de impactos directos e indirectos en el territorio dónde se lleva a cabo la actividad.

El uso del suelo genera unos patrones diferentes en cuanto a los terrenos de uso agrícola dentro de la EU, representando el 39% de la ocupación de suelo, los prados y tierras de cultivo [57].

En la figura 6.26. se presentan los porcentajes desglosados al sector agrícola que representa el 11% de los sectores de emisión.

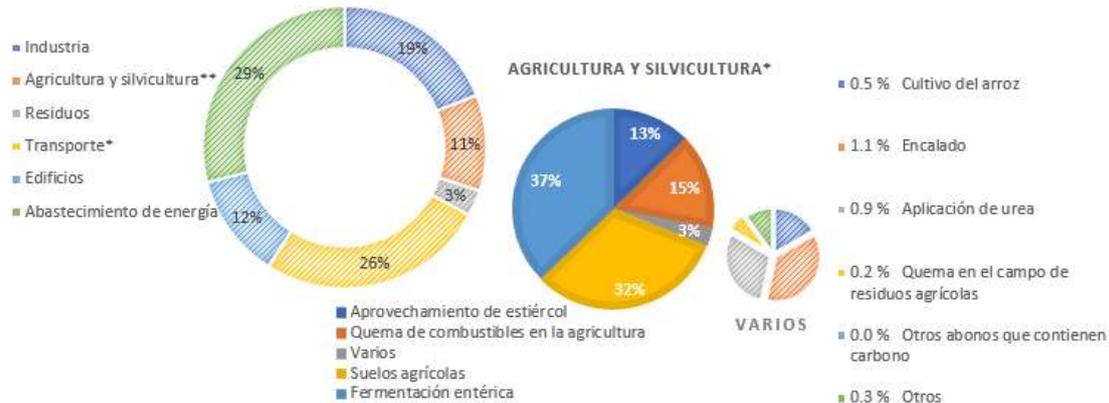


Figura 6.26. Porcentajes pertenecientes a emisiones agrícolas en la Unión Europea 2015. Fuente: EEA GREENHOUSE GAS – Data viewer, AEMA,2017. Elaboración propia.

*Incluidas la navegación y la aviación internacionales.

**Excluido el sector UTCUTS.

Los desafíos a los que se enfrenta el sector agrícola son numerosos, destacando dos importantes:

- el cambio climático; representa la necesidad de una readaptación de las variedades de cultivo a los cambios medioambientales como consecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos que acontecen cada vez con más frecuencia e intensidad disminuyendo el rendimiento de este sector. Como efectos nombrar la necesidad de desarrollar una gestión de recursos hídricos para el riego [58][59].
- En la agricultura, la ocupación o conversión del terreno conlleva pérdida para su utilización en el sector.

A escala europea, la ocupación del terreno por intensificación se ha transformado en factor importante para una progresiva pérdida tanto de tierras agrícolas de alto valor natural como de reducción de hábitats agrícolas para las aves, teniendo como resultado la aparición de nuevos terrenos artificiales para asentamientos industriales o humanos [58].

6.9.3. PRODUCCIÓN ELÉCTRICA Y TÉRMICA

Según la publicación de la Agencia Internacional de Energía, IEA por sus siglas en inglés, en su reporte anual sobre energía y emisiones de CO₂, indica que el consumo energético aumentó a un ritmo dos veces superior en 2018 comparado con el promedio de crecimiento desde el año 2010 como muestra la figura 6.27., donde se puede ver una

comparativa del consumo del 2018 respecto al periodo 2010-2017, materializándose en la consecución de un récord de emisiones, lo que implica un aumento del 1,7% de éstas [59].

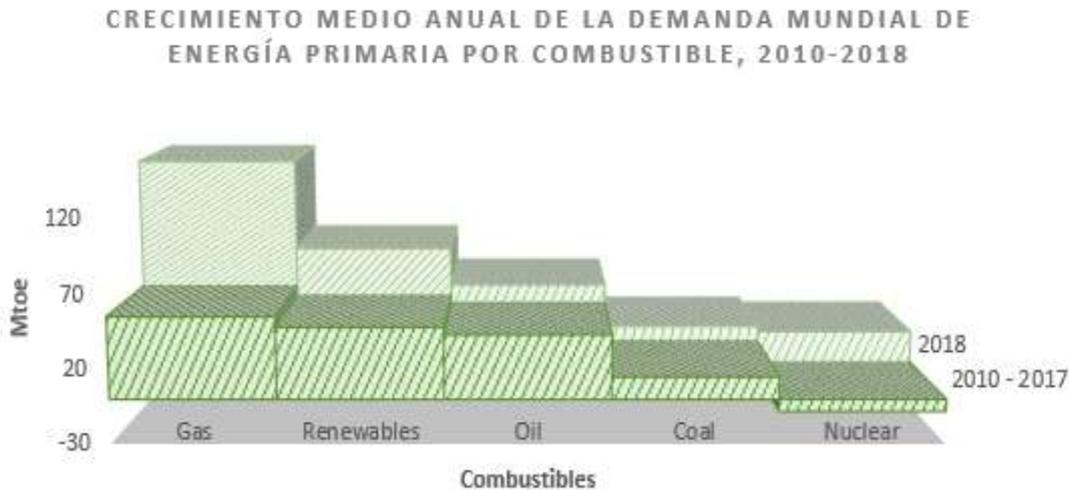


Figura 6.27. Crecimiento medio anual de la demanda mundial de Energía primaria por Combustible, 2010-2018. Fuente: IEA. Elaboración propia.

El constante e imparable ascenso de la demanda energética mundial conduce al aumento de emisiones de CO₂ cuyo nivel en el 2018 ha alcanzado las 560 Mt, cantidad que representa, un 1,7% más respecto al año anterior. Por esta razón, se ha alcanzado un máximo histórico respecto a emisiones de 33,1 Gt. Estos datos vistos en concentración promedio de CO₂ en la atmósfera se traducen en 407,4 ppm en el año 2018, los cuales representan respecto al año 2017, un aumento en 2,4 ppm.

Analizando las emisiones, el sector eléctrico ha sido partícipe del aumento de dos tercios del aumento total. Un tercio de éstas ha sido causado por la extensiva y continuada utilización del carbón como combustible primario, siendo éste un factor directo en cuanto a la aportación de 0,3°C respecto al 1°C que aumentó la temperatura promedio mundial, siempre tomando como referencia los niveles de temperatura de la época preindustrial.

La participación de las energías renovables tales como la energía solar fotovoltaica (PV), la eólica, la hidráulica, etc, alcanza 25% del mix energético en el año 2018, representando un aumento del 4% respecto al 2017.

El objetivo ambiental que persigue la EU en cuanto a llevar a cabo una total descarbonización implica el total abandono de los combustibles fósiles por el aumento en el uso de las energías renovables.

La descarbonización, como instrumento de reducción de la intensidad de uso del carbón en la generación de electricidad, se fija como clave dentro de una estrategia de logro para la estabilización de emisiones de CO₂-eq en todos los sectores. Aunque se ha visto que en comparación con otros sectores tales como la industria, los edificios y el

transporte, el sector de generación de electricidad, la descarbonización ocurre con mayor rapidez.

En un futuro, la energía nuclear podría representar un papel importante en cuanto a recurso de generación y suministro de energía (figura 6.28.), sin embargo, en la actualidad su uso conlleva altos riesgos por lo que se enfrenta a diferentes obstáculos para su supervivencia [60].

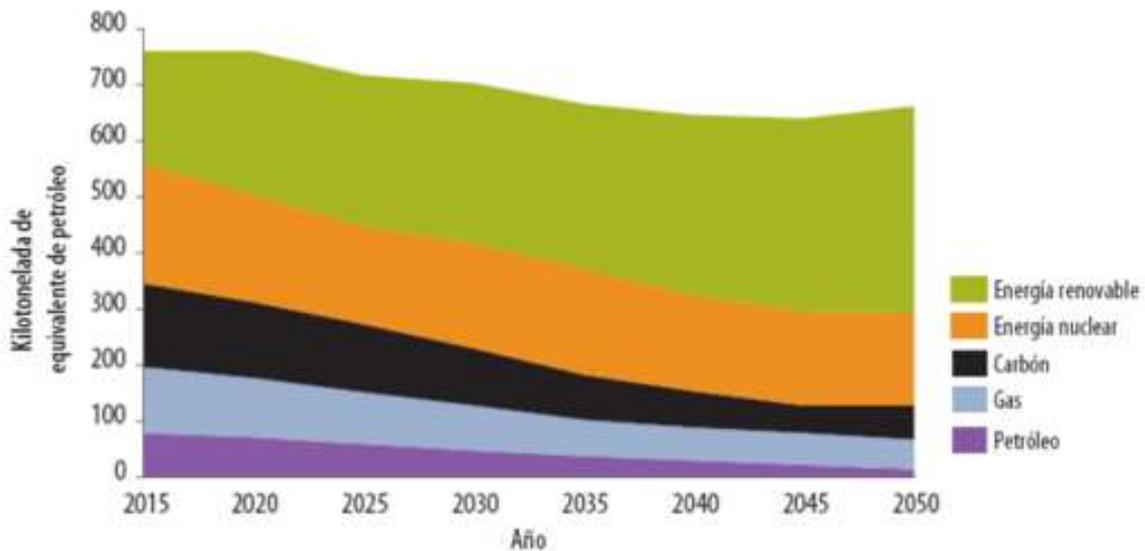


Figura 6.28. Previsión de la producción de energía en la EU por tipo de combustible. Fuente: Comisión Europea, EU Reference Scenario 2016, 2016 (simulación del modelo PRIMES)

Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC), se están posicionando como instrumentos reales de futuro para su implantación en todos los centros de emisiones de GEI para realizar una verdadera reducción de éstos.

El par bioenergía - tecnología CAC se destaca como una buena perspectiva en lo que se refiere a un suministro de energía con tasa negativa de emisiones a gran escala.

6.9.4. EDIFICIOS

La participación en EU de este sector en cuanto a emisiones de GEI a la atmosfera, según la Directiva correspondiente a eficiencia energética 2012/27/EU, es de un 40% en relación con el consumo total de energía. Este hecho hace necesario poner en marcha acciones que ayuden a una disminución progresiva en el consumo energético asociado a los edificios y a un aumento en el uso de nuevas energías limpias o materiales renovables, que ayuden a reducir tanto la dependencia energética de la EU como sus emisiones de GEI [61][62].

Basándonos en los datos publicados por la Comisión Europa en el año 2017, en su análisis panorámico, la participación, en cuanto a emisiones de GEI, del sector Edificios es de un 12% (figura 6.29.) considerando únicamente la combustión de combustible fósil en las instalaciones calefactoras o refrigerantes instaladas en ediciones, comercios, etc.

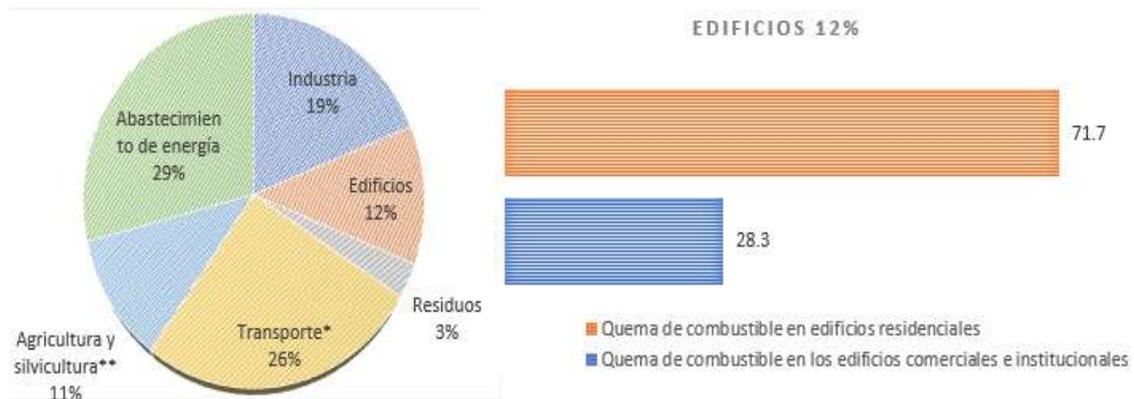


Figura 6.29. Emisiones de gases de efecto invernadero de la EU en 2015 en el sector Edificios. Fuente: Comisión Europea, EU Reference Scenario 2016, 2016 (simulación del modelo PRIMES). Elaboración propia

En la EU la existencia de edificios energéticamente no eficientes es de casi un 75% lo que ha llevado a adoptar y establecer disposiciones con un objetivo: aumentar la eficiencia energética del sector impulsando la rehabilitación de edificios residenciales, lo que ha permitido reducir así las emisiones emitidas.

Entre las medidas adoptadas, exigir una certificación de consumo energético, renovar eficiente y sosteniblemente edificios públicos y el desarrollo de una norma “edificios de consumo de energía casi nulo” cuya obligatoriedad recae en los edificios públicos nuevos a partir de 2019 y para todos aquellos cuya construcción se realice a partir del año 2021.

Respecto a los consumidores y su consumo de energía, la Comisión junto con los Estados miembros han establecido unos requisitos mínimos sobre el uso de productos energéticamente más eficientes como el etiquetado de estos para mantener al consumidor más informado. Esta medida aportará un ahorro energético a la EU y cubrirá para el 2020, el objetivo de alcanzar casi un 20% en eficiencia energética [63].

6.9.5. ELIMINACIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS

En la actualidad, dentro de la Unión Europea, el sector residuos tiene una representación, en cuanto al total de emisiones de GEI, de un 3%. La figura 6.30. nos muestra la subdivisión perteneciente a este porcentaje respecto al año 2015. En éste, se registró una reducción en las emisiones del 43% respecto al año de referencia 1990.

Las medidas europeas legislativas, en cuanto a reducción de emisiones en este sector, se enfocan:

- **Directamente:** Reducción de uso de vertederos, Directiva 1999/31/CE de 26 de abril de 1999 (DO 182 de 16.7.1999, p.1) y Directiva 2000/76/ce del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos (DO L 332 de 28.12.2000)

- **Indirectamente:** A través de la prevención en cuanto a generación y el reciclado de material residual.

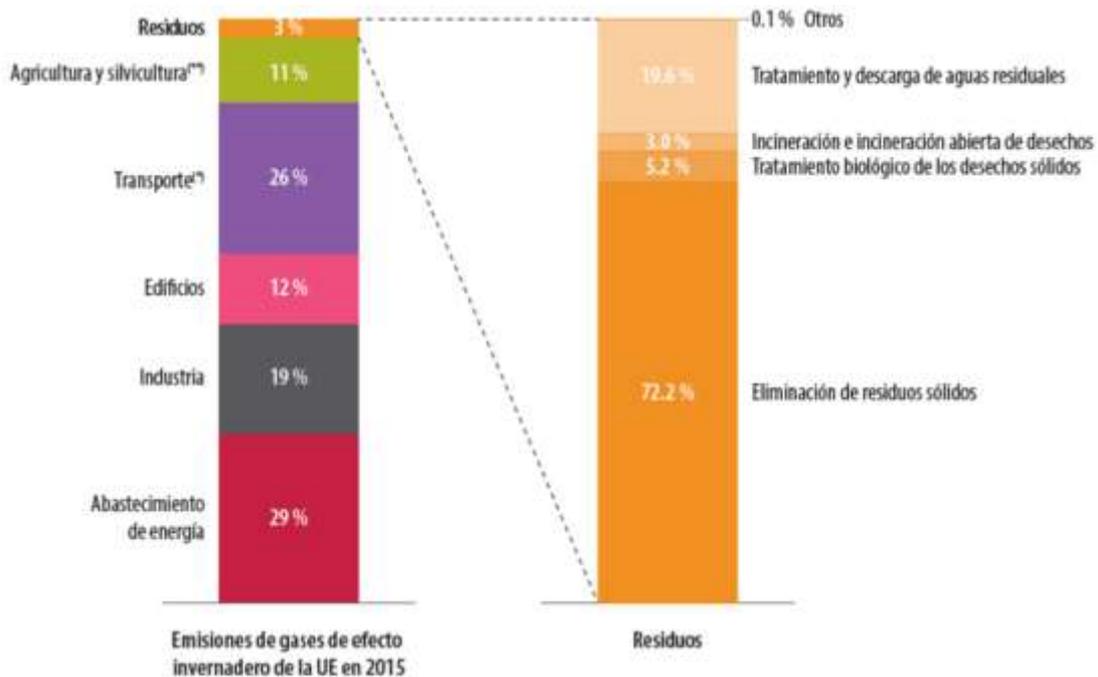


Figura 6.30. Emisiones de gases de efecto invernadero de la EU en 2015 en sector Residuos.
Fuente: Tribunal de Cuentas Europea.

De esta forma llegar a conseguir una mejora de la gestión del material residual en todos los sectores económicos o fuentes de emisión como la producción energética, la agricultura, el transporte, lleva concatenado la reducción en emisiones de GEI a la atmósfera, objetivo final que se está buscando para frenar el cambio climático [63].

6.9.6. LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

La producción industrial, hace referencia a aquellos procesos que se llevan a cabo en las industrias manufactureras, tales como la construcción, papel, petróleo, alimentación, minería, químicas, incluyendo las producciones de hierro, acero y cemento, todas ellas en sí mismas fuentes importantes de emisión de dióxido de carbono.

El correspondiente en emisiones directas de GEI a la atmósfera de este sector, dentro de la EU, durante el 2015 originadas principalmente por la combustión de combustibles fósiles, significó un 19 %, como puede verse en la figura 6.31. En ésta se realiza un desglose de este porcentaje por sectores en la Industria.

En el sector industrial se utiliza como órgano instrumental y de regulación el Mercado de emisiones RCDE UE, con el objeto de reducción de emisiones, dentro del marco legal europeo. en éste, se marca el precio del CO₂, el cual, servirá para incentivar a las

diferentes empresas a una participación más activa en cuanto a reducción de sus propias emisiones de GEI.

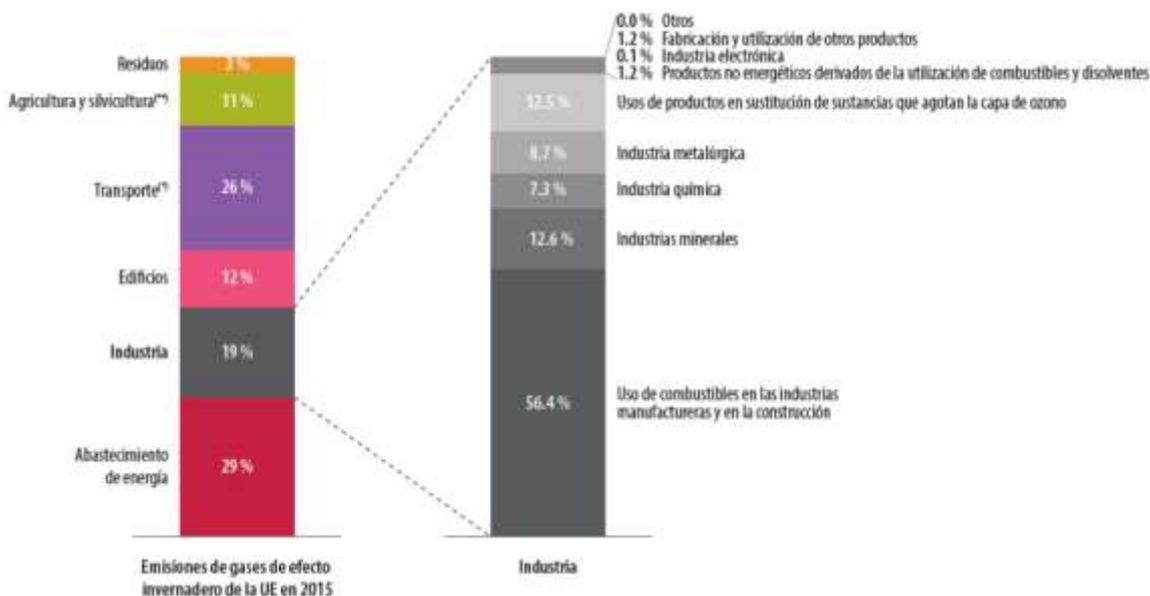


Figura 6.31. Emisiones de gas en el sector Industria. Fuente: EEA Greenhouse gas – Data viewer, AEMA, 2017

*Incluidas la navegación y la aviación internacional

**Excluido el sector UTCUTS

La siguiente figura, figura 6.32., muestra un registro temporal de emisiones verificadas por el RCDE EU por sectores y por ámbito geográfico. Se ve que en el periodo 2012-2017, en el límite máximo aparece incluido el sector aviación.

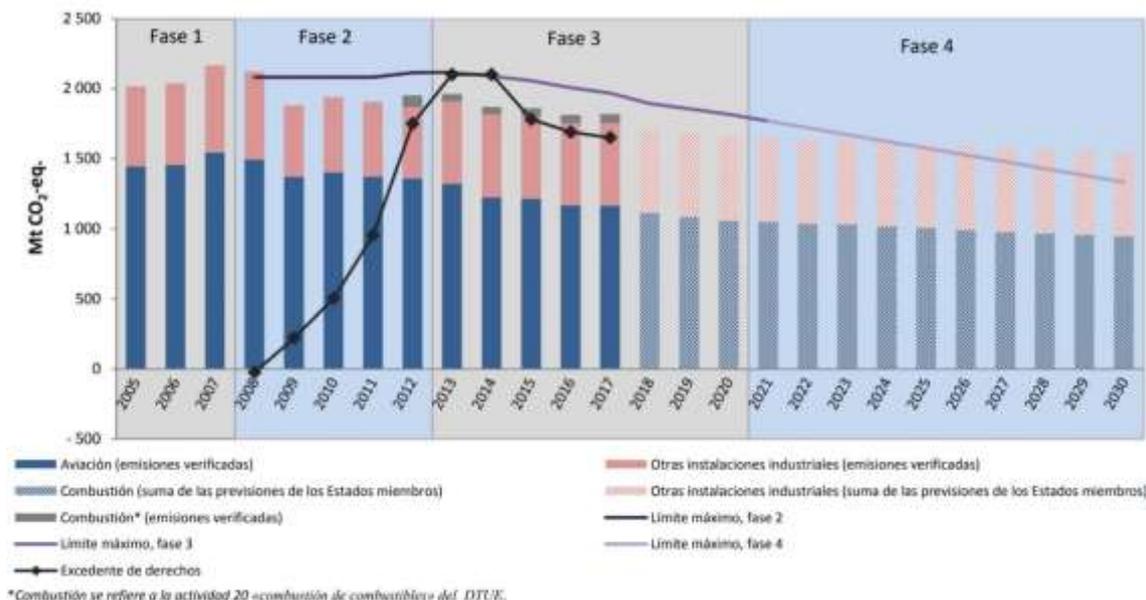


Figura 6.32. Emisiones verificadas del RCDE en el periodo 2005-2017, emisiones previstas del RCDE en el periodo 2018-2030, límites máximos del RCDE en las fases 2, 3 y 4 y excedente acumulado de derechos del RCDE en el periodo 2008-2017 (Mt equiv. CO2). Fuente: Comisión Europea

Existen sectores que se enfrentan a una gran competitividad en el mercado internacional y que sufren efectos adversos o negativos con respecto a otras empresas ubicadas fuera de la EU, las cuales no están sujetas a los precios marcados por el RCDE EU. Dichos sectores dentro de la UE tienen una concesión de derechos de emisión gratuitos. En un futuro, estas concesiones gratuitas se irán recortando cuando exista una verdadera acción global a favor del cambio climático reduciendo el fenómeno denominado “fuga de carbono” hacia otras economías.

Bajo el preámbulo “quien contamina paga”, encuadramos el hecho que lleva implícito la subasta de los derechos de emisión del RCDE EU.

Hay que tener en cuenta también los gases fluorados, que sustituyen a los gases clorofluorocarbonos, cuyo origen se encuentra en los gases de aplicación industrial en máquinas frigoríficas o de aire acondicionado, los cuales llevan a un agotamiento de la capa de ozono.

La presencia de estos gases, en porcentaje, en cuanto a emisiones totales de GEI en la EU es de 2,7%, lo que implica un aumento en 25 años, entre el año 1990 y 2025, de un 66%. La EU ha fijado ya un objetivo, la reducción de emisiones de este tipo de gases de efecto invernadero hasta dos tercios en el 2030, tomando como referencia los niveles alcanzados en el 2014 [63].

6.10. LA ECONOMÍA CIRCULAR

Una vez presentados, a modo general, los principales sectores o fuentes de emisión de GEI nos lleva a introducir un nuevo actor en este escenario: la denominada economía circular. De esta manera, éste se postula como posible instrumento con suficientes capacidades como para poder remitir considerablemente las emisiones antropogénicas de GEI por utilización de recursos finitos, así como también para conducirnos hacia un sistema más autosuficiente y sostenible que el modelo actual.

Este sistema evitaría un consumismo excesivo de los recursos finitos mediante la recuperación, reparación, reutilización y regeneración de recursos no finitos.

Este mecanismo circular evidencia la posibilidad de combinación conjunta y alternativa de un ciclo técnico, por intervención humana, con un ciclo biológico, procesos regenerativos de los productos desechados.

La figura 6.33. presenta los tres principios que constituyen la economía circular[64], los cuales pueden ser enunciados como:

- Preservación y mejora del capital natural.
- Optimización del uso de los recursos.
- Promover la eficacia del sistema.

armonizados. El número representa el número de escenarios que están considerados en cada uno de estos grupos[65].

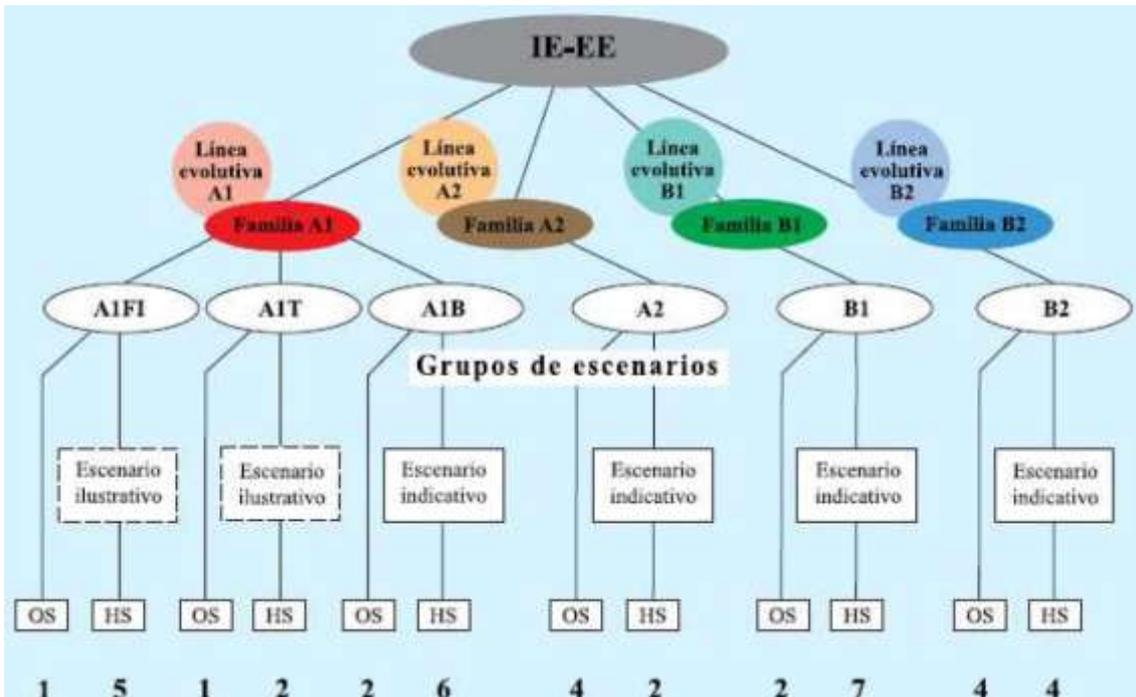


Figura 6.34. Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE. Fuente: IDEAM-METEO/008-2007

Estos Escenarios de Emisiones incluidos en el TIE bajo aprobación previa por parte del IPCC, están divididos en cuatro familias diferentes. Cada familia comprende un escenario distinto, dependiendo de las características que definen a cada una de ellas. Entre estas características, primeramente, las emisiones de GEI y junto a éstas, se añaden otras fuerzas causantes como las demográficas, las económicas y las tecnológicas.

Por parte del IPCC, estos escenarios sirven de una mera evaluación, pero no son definitivos en cuanto a su mayor probabilidad de ocurrencia. Así, quedan definidos en:

- **La familia A1** muestra un escenario cuyas líneas evolutivas describen un mundo cuyo futuro presenta un crecimiento económico rápido, alcanzando un valor máximo de población mundial a mediados de siglo sufriendo posteriormente una disminución y teniendo una introducción de tecnologías nuevas y más eficientes de una manera rápida. Entre sus características presenta una convergencia entre regiones y una creación de capacidades e interacciones culturales y sociales acompañada ésta de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

En esta familia aparecen tres grupos de alternativas de cambio tecnológico en el sistema de energía diferencias por su orientación tecnológica, de esta manera aparecen:

- **A1F1.** Grupo que conlleva una utilización intensiva de combustible de origen fósil.
- **A1T.** Grupo que presenta una utilización de energía de origen no fósil.

- **A1B.** Grupo definido por tener una utilización equilibrada de todo tipo de fuentes.
- **La familia A2** incluye la heterogeneidad del mundo presentando unas características distintivas como son la autosuficiencia, la conservación en cuanto a identidad local. Respecto al conjunto de las regiones, las pautas de fertilidad presentan una convergencia muy lenta lo que conlleva a un continuo crecimiento de la población mundial.
- **La familia B1** implica la convergencia con una misma población mundial creciendo hasta su máximo que lo alcanzará hacia mediados de siglo. Independientemente, las estructuras económicas presentan cambios rápidos con una orientación claramente hacia economías de servicio e información, los cuales van unidos a una utilización de los materiales de una manera menos agresiva y el aprovechamiento de los recursos eficazmente mediante la introducción de tecnologías limpias.

Esta línea evolutiva prepondera, dentro del orden mundial, aquellas soluciones que estén alineadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a la igualdad no incluyendo iniciativas adicionales respecto al clima.

- **La familia B2** presenta un mundo cuyo escenario principal respecto a la sostenibilidad económica, social y medioambiental es una solución local. La población tiene un crecimiento progresivo, aunque no tan rápido como en líneas evolutivas como la A2. Asimismo, a diferencia de familias como la A1 y la B1, su desarrollo económico muestra un nivel más intermedio y el cambio tecnológico es menos rápido y más diverso. La línea evolutiva B2 tiene una clara orientación hacia la protección del medio ambiente, así como también hacia la igualdad social, centrándose en los niveles locales y regionales [66].

La figura 6.35. muestra la evolución desde el año 2000 hasta el 2100, en el eje horizontal, de los diferentes escenarios de emisiones GEI, líneas coloreadas, nombrados con anterioridad sin aplicación de cualquier política climática adicional, respecto a emisiones mundiales de GEI, eje vertical, en Gt CO₂-eq/año.

La zona sombreada en gris muestra el percentil 80 de escenarios recientes desde el IE-EE. Las líneas a trazos representan los valores máx. y min, abanico posterior a IE-EE. Las emisiones GEI incluidas comprenden especies como son el CO₂, CH₄ y N₂O y gases-F.

La figura 6.36. muestra el desglose de estas especies tanto por escenarios como por los diferentes percentiles post IE-EE para esta serie histórica de las distintas líneas evolutivas vistas.

De estas dos figuras podemos hacer un análisis en el que se puede decir claramente como el escenario A2 es el que presenta una clara evolución creciente respecto a los otros escenarios, llegando a su máximo de emisiones en el 2100 y viendo como el gas GEI que más relevancia tiene es el CO₂ cuya presencia en el 2100 se acentúa frente a las otras especies estudiadas [67].

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

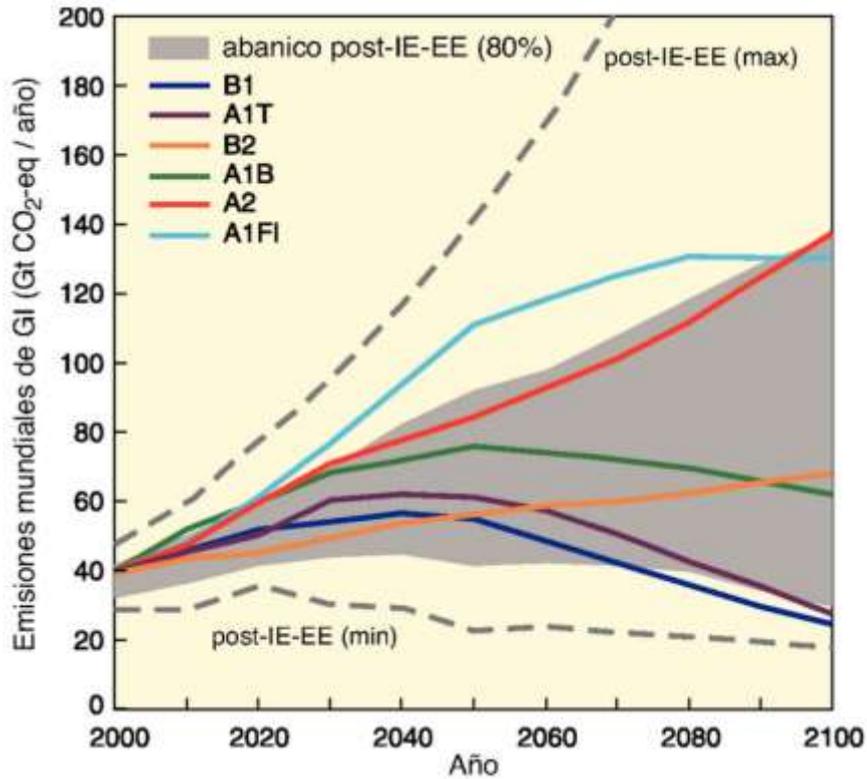


Figura 6.35. Emisiones mundiales de GEI (en Gt CO₂-eq anuales) en ausencia de políticas climáticas adicionales. Fuente: IPCC

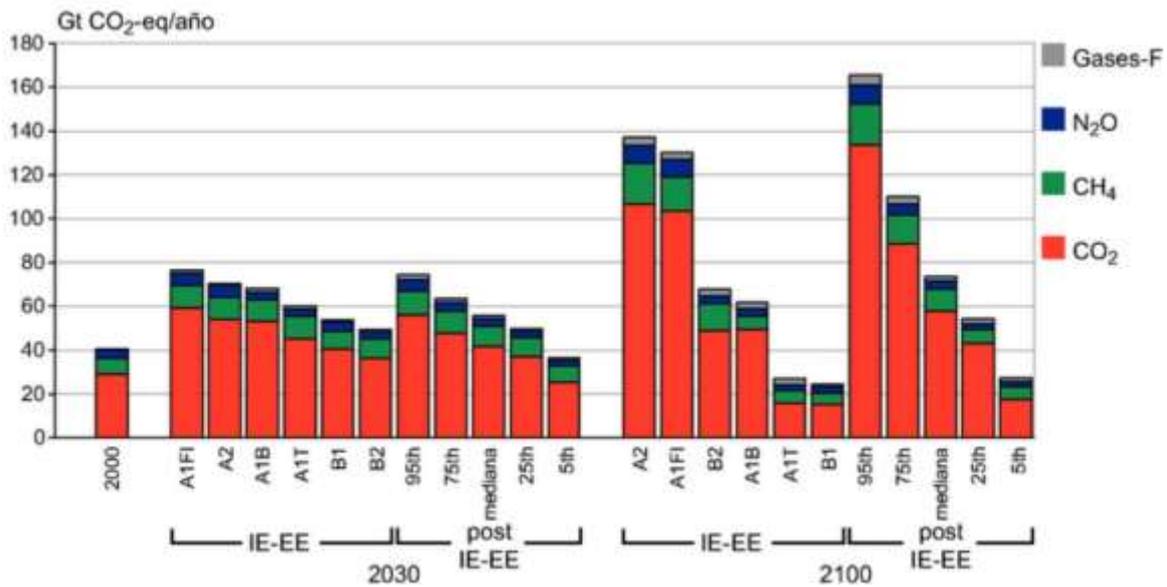


Figura 6.36. Emisiones de los seis escenarios IE-EE, así como también la distribución de la frecuencia de las emisiones de los escenarios post IE-EE (percentil 5, 25, mediana, 75, 95). Fuente: Capítulo 3 del IPCC

Una vez citados y comentados someramente estos diferentes escenarios, independientemente de su probabilidad de suceso, hay un hecho en común, el aumento de emisiones GEI, por lo tanto, podemos enunciar unas primeras premisas o alternativas, como pueden ser:

- La reducción en cuanto a consumo de energía primaria.

- Respecto a fuentes de energía, realizar un uso de éstas eficiente y responsable.
- La utilización de energías libres de carbono, lo que se denomina, energías renovables.

Aún con una inmediata implantación de ellas no lograríamos un umbral que presentase un freno real y adecuado a las emisiones por lo que, tendríamos que apoyarnos en otras tecnologías que se sumen a las anteriores y de una manera conjunta alcanzar un posible y deseado escenario de emisiones cero. A estas otras tecnologías se las denomina tecnologías CAC, CCS por sus siglas en inglés.

Estas tecnologías CAC, sujetas ya a directivas europeas, como la Directiva 2009/31/EC que se toma como marco legal para los Estados miembros en cuanto al desarrollo de proyectos para la captura y almacenamiento de Carbono y, definida dentro de un espacio de seguridad hacia el medio ambiente y la salud.

7. ESTADO DEL ARTE DE LAS TEGNOLOGÍAS CAC, CAPTURA y ALMACENAMIENTO DE CO₂

7.1. Tecnologías CAC

Las tecnologías CAC se fundamentan en tres procesos consecutivos: la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂.

- La **captura**, respecto a los gases de combustión de estos, como proceso, consiste en la separación del CO₂ contenido en ellos y la consecuente concentración de estos.
- El **transporte** de la corriente de CO₂. Con el objetivo de realizar un transporte eficiente y óptimo, la corriente es tratada bajo ciertas condiciones con el propósito de obtener un fluido con ciertas características gaseosas y líquidas como la viscosidad y el nivel de densidad, respectivamente. De esta manera se realiza el traslado hacia los almacenamientos geológicos. Como consecuencia de las economías de escala, económicamente el transporte es viable a través de CO-ductos o bien a través de barcos.
- El **almacenamiento** aparece como la última fase de estas tecnologías. Para llevar a cabo esta etapa se realiza la búsqueda de localizaciones geológicas con unas ciertas características geológicas como son el espesor, la extensión y su capacidad, las cuales puedan garantizar tanto el aislamiento como la estanqueidad del CO₂ atrapado. Entre estas formaciones podemos citar las reservas abandonadas de gas y petróleo por su agotamiento, acuíferos salinos o capas de carbón profundas para producción de metano, etc.

La Agencia Internacional de Energía, en cuanto a CCS, ya preparó hacia el 2013, un documento orientador hacia aquellos órganos o actores interesados en la implantación de este tipo de tecnologías.

En el documento de la IEA se incluían siete acciones diferentes [68]:

- La introducción de mecanismos financieros como apoyo a todos aquellos proyectos que demuestren la implicación de CCS.
- Estimular estas tecnologías con políticas de apoyo hacia las mismas.
- El desarrollo de reglamentación y leyes nacionales respecto a las CAC.
- En aquellos sectores donde no se han probado la eficiencia de las CAC, llevar a cabo pruebas para ver resultados al respecto.
- Llevar a cabo programas de información para llegar a todos los sectores de población y aumentar el conocimiento de estas tecnologías y su importancia.
- La mejora de costes de electricidad mediante la instalación en centrales que ya son altamente eficientes de CAC.

- Fomentar las infraestructuras, en cuanto a desarrollo eficiente, de transporte de CO₂

En referencia a lo anterior, en la figura 7.1. se analiza la evolución temporal de los proyectos CAC a gran escala desde 1996 hasta 2018 frente a las emisiones provocadas por estos sectores medidas en MtCO₂. Analizando la figura en detalle, se aprecia la existencia de una tendencia más o menos constante hasta el 2009 en los sectores de la refinería y la producción de gas, teniendo mayor presencia el gas procesado. A partir de este momento, se observa un crecimiento exponencial en dichos sectores.

Respecto a la reducción de emisiones, utilizando esta figura, se ve como el uso o implementación de este tipo de Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂, CAC, en los distintos sectores productivos conlleva una reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

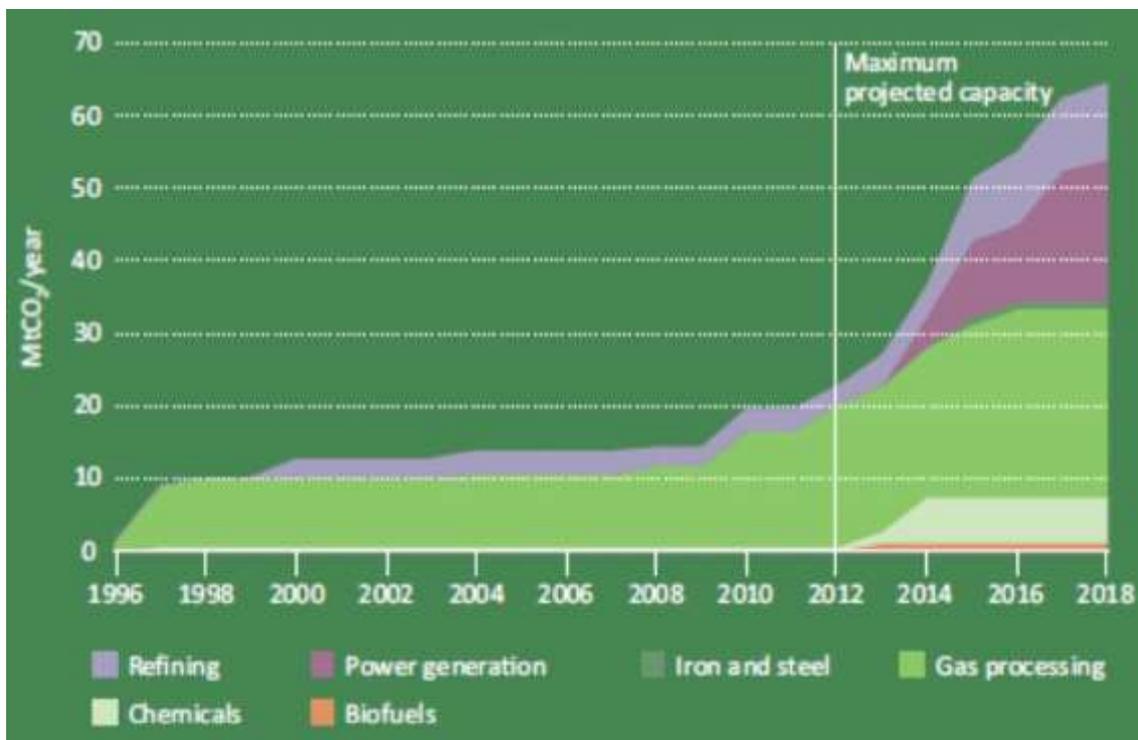


Figura 7.1. Gráfica de proyectos CAC a gran escala respecto a su aporte a la atmósfera en MtCO₂ por año.
Fuente: TCEP (2013)

De esta forma, las Tecnologías CAC permiten realizar un uso sostenible y responsable de los combustibles fósiles, cuyo fin es la captura, transporte y almacenamiento o confinamiento de los gases emitidos por su utilización.

7.2. Proceso de Captura de CO₂

La aplicación de la captura de gases GEI está enfocada a realizarse en centros de gran emisión como plantas térmicas, centrales siderúrgicas, refinерías, plantas cementeras y otras industrias, utilizando diferentes técnicas que se diferencian respecto al momento o punto en que se produce la captación de la corriente rica que se produce durante el proceso industrial.

Los tres tipos principales de CAC se distinguen en el momento en el que se realiza la captación de CO₂: la postcombustión, la precombustión y la oxicomcombustión, cuyas características principales están resumidas en la figura 7.2. En ésta, puede verse, de modo esquemático, el proceso de y momento en el que se lleva a cabo la captura de CO₂ hasta su almacenaje para ser más tarde transportado hasta su destino final.

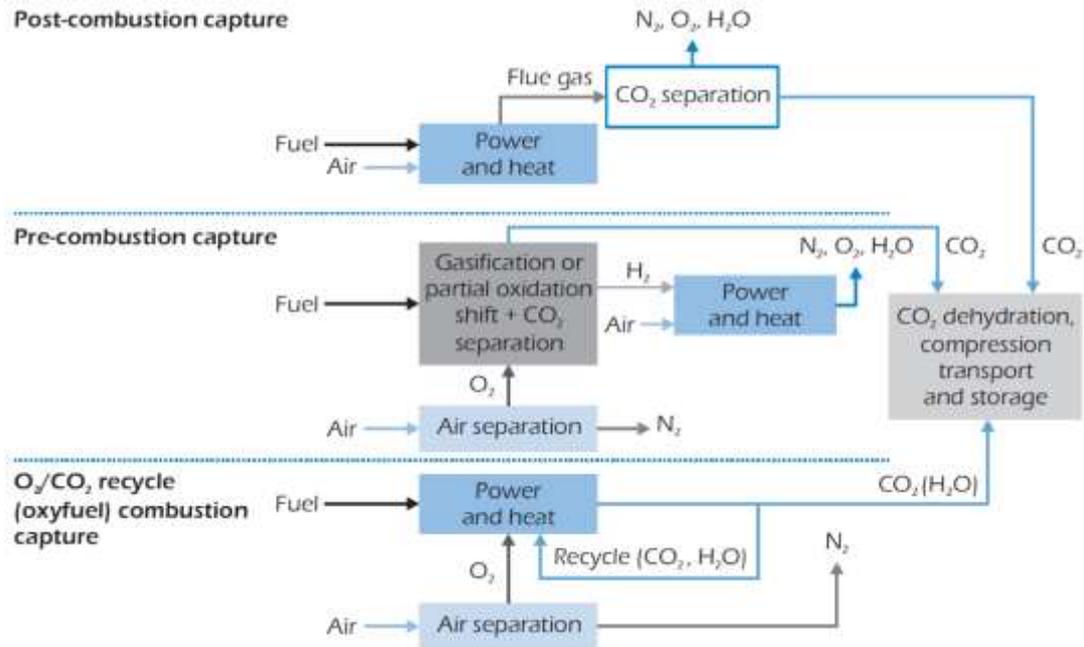


Figura 7.2. Presentación de las diferentes configuraciones correspondientes a las tecnologías CAC. Fuente IPCC, 2005

Visto los tres tipos de configuraciones para la captación y separación de CO₂, se añade la tabla 7.1. en la que se recogen los principales procesos que conllevan estas tecnologías.

OXICOMBUSTIÓN			PRECOMBUSTIÓN	POST-COMBUSTIÓN		
Separación de oxígeno			Separación de oxígeno			
Preparación del combustible. Secado del lignito			Manejo del combustible (Lignito / biomasa)	Preparación del combustible. Secado del lignito		
Oxicombustión parcial o total			Gasificación y reformado (Gas natural, carbón lignito y biomasa)	Combustión (Lecho fluidificado, carbón pulverizado, lignito, coque de petróleo)		
Combustión industrial	Turbina de gas	Caldera	Eliminación del polvo	Combustión industrial	Turbina de gas	Caldera
Ciclo de gases				Intercambio de CO	Ciclo de gases	
		700 °C				700 °C
Recirculación de gases y mezcla con O ₂			Desulfuración	Enriquecimiento en CO ₂ de los gases efluentes		
Tratamiento y enfriado de los gases efluentes			Captura de CO ₂ / Separación de H ₂	Tratamiento de los gases efluentes con recuperación de calor		
			Turbina de gas H ₂	Captura de CO ₂		
Purificación del CO ₂			Purificación del CO ₂	Purificación del CO ₂		
Compresión del CO ₂			Compresión del CO ₂	Compresión del CO ₂		

Tabla 7. 7.1. Procesos que incluyen las distintas tecnologías CAC. Fuente: ZEP. Elaboración propia.

7.2.1. Procesos de Postcombustión

La postcombustión es la más conocida y utilizadas entre las tecnologías de captura, , dada la experiencia existente respecto a la separación de gases en diferentes procesos industriales que ya se llevan a cabo en plantas de producción.

En la postcombustión, como indica su nombre, la captura de CO₂ diluido en la corriente rica de gases efluentes se realiza una vez finalizado el proceso de combustión del carburante de origen fósil, según paso 1 en la figura 7.3. La corriente rica es impulsada por el comburente, que en este caso es el aire, hacia el módulo de depuración de gases, paso 2 de la figura 7.4., donde se lleva a cabo la captación del CO₂. A partir de aquí, el CO₂ atrapado se prepara para realizar su transporte, paso 3 como presenta en la figura

7.3., hacia el entrapamiento geológico en dónde será almacenado el volumen captado.

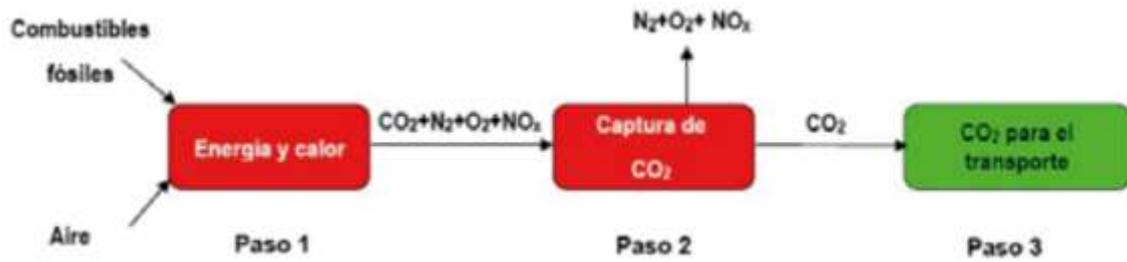


Figura 7.3. Esquema general del proceso de captura de CO₂ posterior a la combustión. Fuente: Citi Investment Research Analysis.

El siguiente esquema, incluido en la figura 7.4. representa una central térmica con tecnología CAC mediante postcombustión. Se puede observar los diferentes módulos donde se lleva a cabo la captación del CO₂ en el absorbedor donde es separado y conducido hacia el siguiente módulo donde se separará definitivamente para su posterior transporte y final almacenamiento.

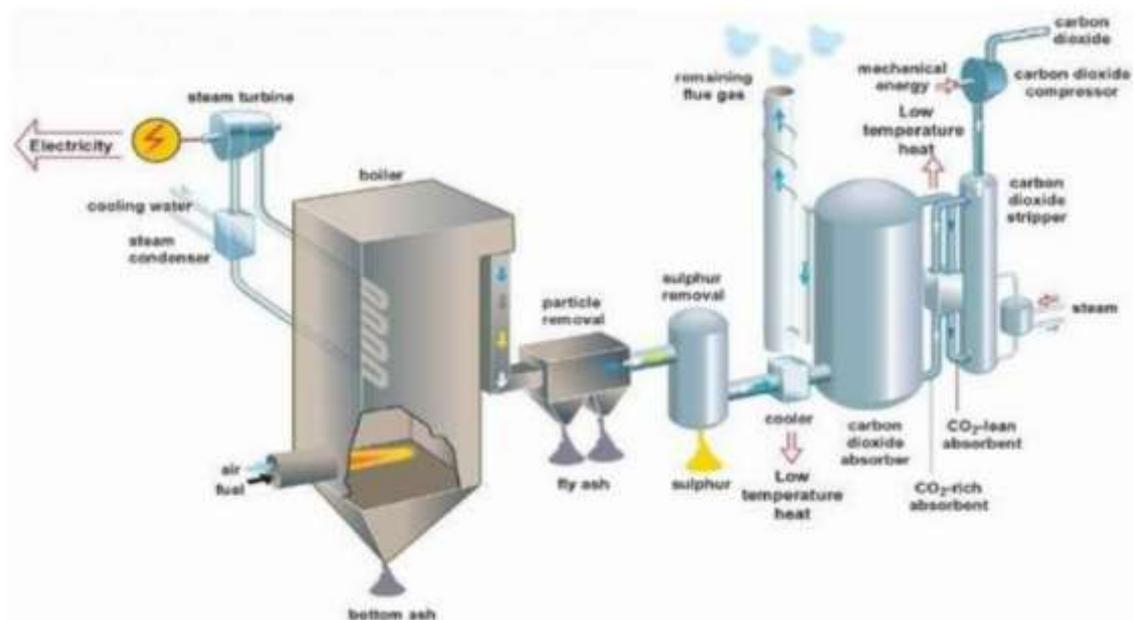


Figura 7.4. Esquema de captura por postcombustión en una Central térmica. Fuente: Vattenfall.

Respecto a los inconvenientes a los que se enfrenta esta tecnología para su implantación en grandes centros de potencia son:

- El caudal de gases efluentes a tratar es muy elevado respecto a la concentración de CO₂ existente en éste. Esto conlleva que, tanto la presión parcial como la fuerza impulsora para poder realizar la separación del CO₂ sean muy bajas.
- La acción de captura de CO₂ requiere de sorbentes de alto requerimiento energético ya que necesitan realizar no solo su regeneración sino también la desorción del CO₂ captado.

- Los costes frente a tecnologías ya implantadas en las instalaciones de producción pueden ser muy elevados tanto en los de inversión como en los de operación.

La tecnología postcombustión incluye diferentes alternativas, pudiendo hacer una división de éstas en cinco grandes grupos:

- Absorción: tanto química como física,
- Adsorción
- Criogenia
- Membranas
- Biológicas

7.2.1.1. Absorción química

Este proceso ya ha sido muy utilizado con anterioridad para llevar a cabo la separación del CO₂ contenido en la corriente de efluyentes. Esta acción se puede realizar a través de la utilización de algún tipo de absorbente químico con base alcalina como por ejemplo las aminas (MEA) o amoniaco enfriado. Este proceso aparece descrito esquemáticamente en la figura 7.5. De esta manera, pueden verse las diferentes etapas en la captura de CO₂. La primera etapa comienza con la puesta en contacto del absorbente líquido con el volumen de gas. Ya en contacto, el absorbente reaccionará selectivamente, mediante fenómenos químico-físicos para captar aquellas moléculas de CO₂ contenidas en la corriente.

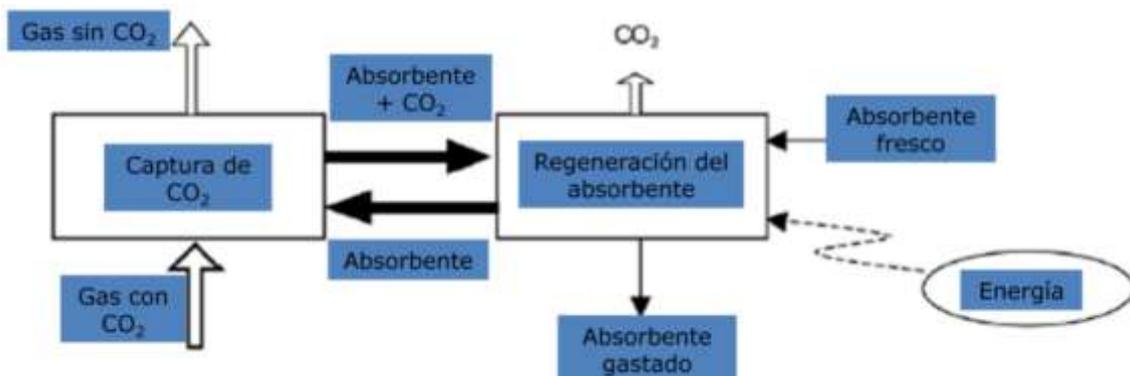


Figura 7.5. Esquema representativo del proceso de absorción química del CO₂. Fuente: Inyección del CO₂ como método de recuperación mejorada. Jose Luis Botella Rivas

Así, seguidamente el gas es transportado hacia la torre donde se llevará a cabo la labor de regeneración mediante cambios de temperatura que van a favorecer la liberación del contenido de CO₂. En este punto se recupera un porcentaje de absorbente que va a ser devuelto al proceso de captación y el resto se desecha, lo que constituye una desventaja medioambiental y económica, ya que en esta etapa siempre vamos a tener que introducir absorbente nuevo para cubrir esa pérdida.

Por último, se puede apreciar en la figura, el aporte extra de energía necesario, el cual se traduce en gasto energético por calentamiento del absorbente para poder realizar la liberación del volumen de CO₂ atrapado. Este gasto también representa una reducción en eficiencia de la planta. Los procesos de absorción son los que han tenido un desarrollo más completo hasta hoy, existiendo plantas operacionales cuya eficiencia en la captura de CO₂ se sitúa en torno al 90%.

Además de aminas y amoniaco, en la actualidad, se están realizando estudios para poder ampliar el uso de adsorbentes con base en carbonatos potásicos, sales orgánicas, líquidos iónicos, las cuales llegan a unos puntos de fusión cercanos a la temperatura ambiente.

7.2.1.2. Absorción física

Esta tecnología utiliza los principios de la ley de Henry para llevar a cabo el secuestro del CO₂. En esta tarea, como principales vectores aparecen las características del absorbente utilizado y la presión parcial del CO₂, condicionando la capacidad de transferencia del CO₂ entre fases.

Ley de Henry enuncia que la cantidad de gas disuelta en un líquido, a temperatura constante, es proporcional a la presión parcial del gas sobre el líquido, esta proposición queda reflejada según figura 7.6.

- Ecuación: $p = k_H \cdot c$,
 donde: p : presión parcial del gas, aquella que ejerce individualmente una especie del resto de la mezcla gaseosa total.
 c : concentración del gas
 k_H : constante de Henry

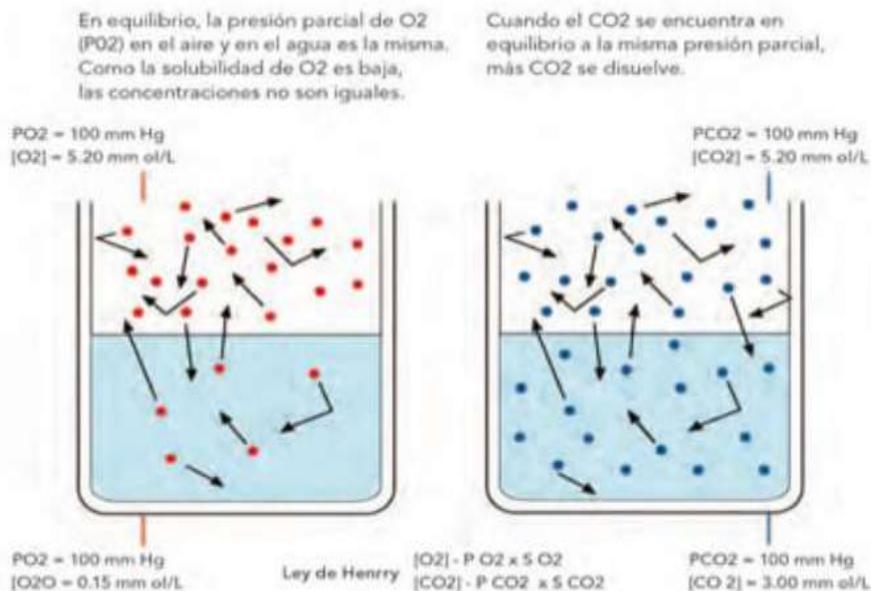


Figura 7.6. Ley de Henry.

Como condicionante a esta tecnología postcombustión se encuentra las bajas presiones de la corriente de efluentes, las cuales limitan considerablemente su aplicación.

Existen ya, a escala comercial, absorbentes físicos utilizados en plantas de gasificación de ciclo combinado o también de producción de NH_3 para la separación de los compuestos del azufre.

Esta tecnología agrupa cuatro procesos selectivos de diferentes especies químicas, entre ellas CO_2 :

- **Proceso Rectisol**, proceso utilizado en la producción de metanol y amoníaco, consistente en la eliminación de especies contenidas en las corrientes de postcombustión del carbón, tales como H_2S y CO_2 . Se caracteriza por la utilización de metanol enfriado en condiciones de 60 bar de presión y -40°C .
- **Proceso Selexol**, en este caso, su aplicación más relevante es la eliminación de especies como H_2S_2 , COS y CO_2 en la industria del refino, en centros de producción de fertilizantes y en ciclos combinados. A nivel operativo, se usa mucho el absorbente dimetil éter de polietilenglicol funciona a presiones desde 20 hasta las 136 atm., y a una temperatura, de hasta 300°C , de entrada.

La figura 7.7. muestra un esquema simplificado del proceso Selexol: el gas de alimentación se mezcla con el solvente, se enfría y se separa, y luego ingresa a la torre de absorción. El disolvente separado se regenera en varias etapas flash y se devuelve a la torre de absorción. El CO_2 se recupera como gas de escape de los tambores de evaporación, la recuperación total de CO_2 y la pureza del producto aumentan con las etapas de evaporación posteriores.

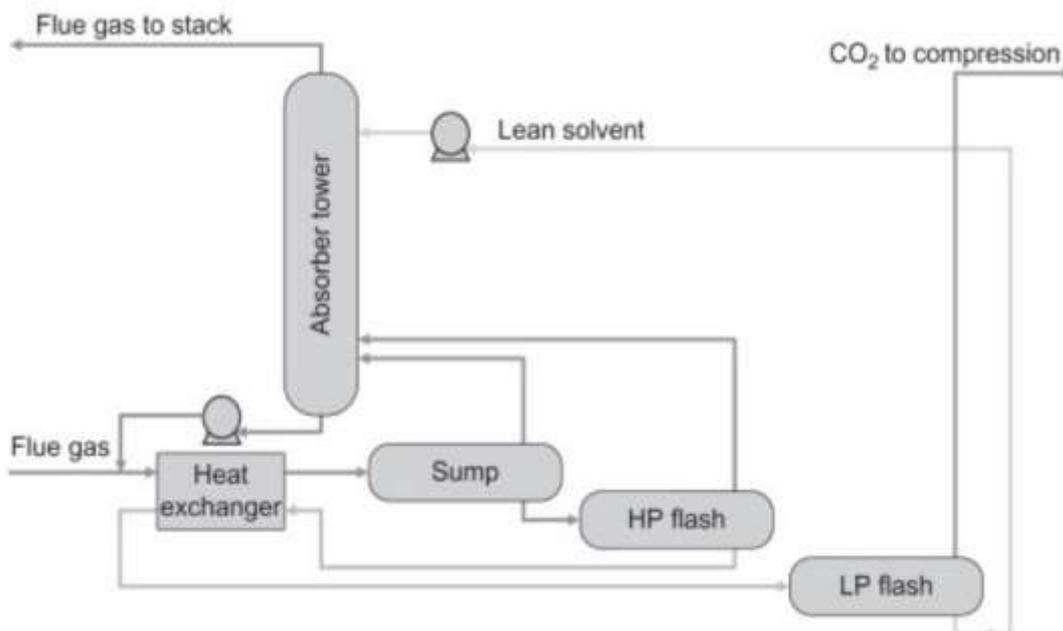


Figura 7.7. Esquema simplificado del proceso Selexol. Fuente: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/selexol-process>

- **Proceso Purisol**, este proceso, utiliza como absorbente N-metil pirrolidona, y se encarga de eliminar especies como H₂S, y CO₂ contenidos en la masa de gases. La presión de trabajo durante la captación puede alcanzar 50 bar.
- **Proceso Sulfinol**, consta de una absorción física y química. Los absorbentes utilizados para realizar la eliminación son tetrahidródioxido de tiofeno (Sulfolane), mezclas de Di-isopropanol amina (DIPA) o metildietanolamina (MDEA) así como también el agua en diferentes proporciones. La aplicación de este proceso se enfoca en la purificación de corrientes de gas natural, gases de síntesis y gases de refinería con contenido de compuestos azufrados.

7.2.1.3. Adsorción

El proceso de adsorción está orientado hacia la retención de CO₂ en materiales carbonosos o zeolitas, compuestos de alta porosidad no reactivos. La metodología que se lleva a cabo son los sistemas tipo *batch* mediante columnas en paralelo operando en adsorción y en regeneración indistintamente.

Energéticamente, esta tecnología se presenta como prometedora para el caso de utilización de óxidos de calcio y litio como absorbentes. Estos óxidos, como absorbentes, pueden formar compuestos carbonados cuando se unen al CO₂ adsorbido pudiendo ser tratados a temperaturas de hasta 850°C consiguiendo la regeneración por calcinación.

Dentro de las desventajas que podemos citar sobre esta tecnología está que las captaciones son de baja pureza en CO₂ debido a la baja selectividad CO₂/N₂. Se necesitarían absorbentes más potentes con relación a capacidad y selectividad y que presenten a su vez una menor sensibilidad a especies como el vapor de agua y partículas.

Otra desventaja respecto a esta tecnología es la degradación que requiere grandes caudales de absorbente fresco lo que provoca un encarecimiento del proceso.

7.2.1.4. Criogenia

Esta tecnología se enfoca hacia el tratamiento de corrientes de alto contenido en CO₂, superiores a 90%. En la figura 7.8., de manera esquemática, se presenta una planta de tratamiento para la captación y separación de CO₂. En el caso de corrientes diluidas, sería necesario un consumo energético muy alto para poder realizar la refrigeración en el proceso. En cuanto a evitar solidificaciones en los equipos y conducciones, se debe separar el agua y otros componentes.

Una vez que se tiene el gas licuado, preparado para su transporte y posterior almacenamiento, conseguir una optimización del proceso requiere realizar esta última etapa bajo condiciones supercríticas. Se deben alcanzar presiones alrededor de los 15 Mpa en los sistemas de compresión y enfriamiento del CO₂.

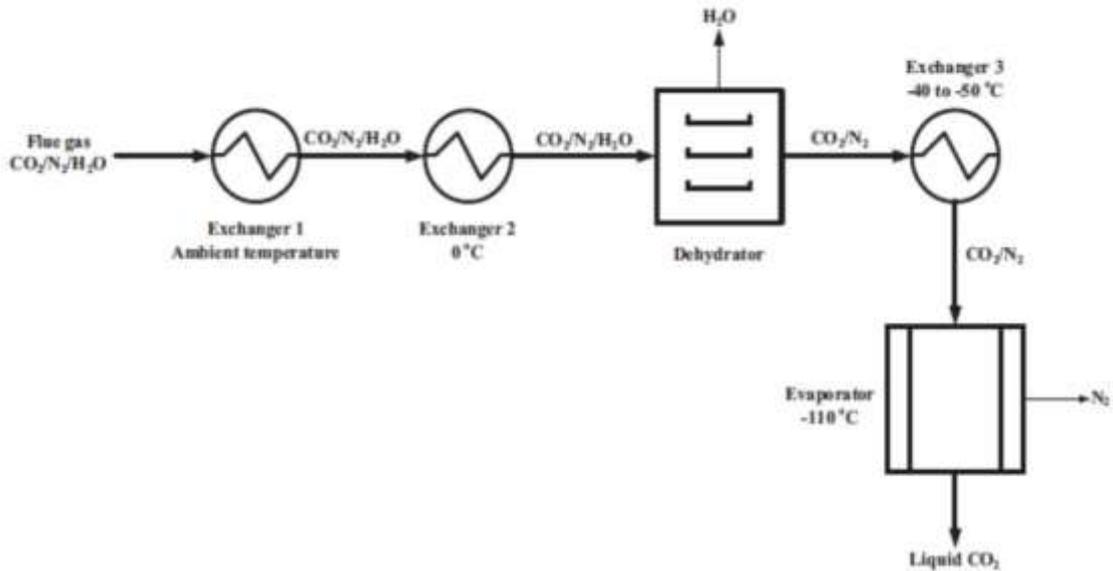


Figura 7.8. Esquema de absorción de CO₂ con destilación criogénica. Fuente: Irene Ortiz Molina

7.2.1.5. Membranas

La utilización de membranas en este proceso permite realizar una separación por diferencia en cuanto a la velocidad de permeación. Ésta depende de la presión diferencial o velocidad impulsora con relación a los lados opuestos de la membrana, espesor de ésta, su tamaño y solubilidad característica, así como también de la difusión respecto a todas las moléculas que van atravesando las mismas.

La figura 7.9. muestra la reacción de las moléculas de CO₂ cuando se encuentran atravesando una membrana FSC por permeabilidad, obteniendo la separación de éstas del resto de las especies. Estas membranas se basan en la combinación de mecanismos S-D, donde S es el parámetro termodinámico de solubilidad o penetración y D es un parámetro cinético perteneciente al transporte de cada especie a través de la membrana y FT es la facilidad de transporte.

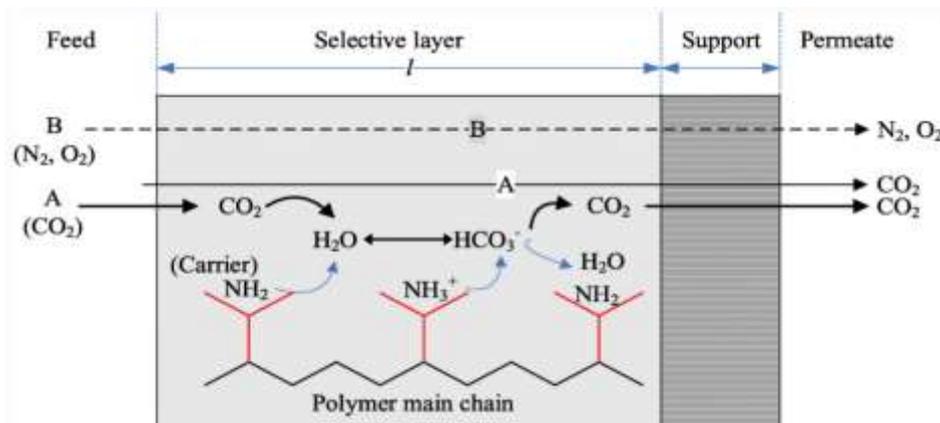


Figura 7.9 Ilustración del transporte de un volumen de gas a través de una membrana PVAm basado en FSC de una membrana Fuente: <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0177-9>

De esta figura, se puede ver que el flujo permeado de CO₂, respecto al reactivo A, puede obtenerse mediante la suma de dos términos obtenidos por difusión: el primero por solución y el segundo por medición de los portadores, obteniendo así la siguiente expresión:

$$J_A = \frac{D_A}{l} (c_{A,0} - c_{A,1}) + \frac{D_{AC}}{l} (c_{AC,0} - c_{AC,1})$$

donde:

1 término	$\frac{D_A}{l} (c_{A,0} - c_{A,1})$	Difusión por solución Coeficiente de Fickian
2 término	$\frac{D_{AC}}{l} (c_{AC,0} - c_{AC,1})$	Difusión por medición de los portadores
	l	Espesor de membrana

La fabricación de membranas, en cuanto a costos de operación y consumo energético, requiere de la utilización de sistemas multietapa o de recirculación del gas permeado para poder conseguir altos grados de separación.

Una alternativa que se presenta viable tecnológicamente, que capacitaría a operar con equipos de tamaño más reducido, es la separación híbrida. De esta manera, el CO₂ atrapado se filtra a través de una membrana microporosa, construida de politetrafluoroetileno. Ésta va a servir de superficie de contacto, manteniéndose en contacto con el líquido que realiza la operación de eliminar el CO₂.

7.2.1.6. Captura Biológica.

Esta tecnología se encuentra aún en fase de estudio a nivel de laboratorio con vistas a su posible implementación para llevar a cabo la captación de CO₂ a través del uso de algas. El atrapamiento se realiza mediante procesos que utilizan estas plantas acuáticas como es la fotosíntesis o utilizando catalizadores enzimáticos que permiten, en ambientes acuosos, un aumento de la absorción de CO₂.

La figura 7.10. muestra, secuencialmente, las reacciones lumínicas que se llevan a cabo en los fotosistemas I y II, denominados PSI y PSII, las cuales van a posibilitar el traspaso de electrones hacia el NADPH, desde el agua, por la actuación simultánea de dos fotones y, de esta manera se produzca la fijación del CO₂. Una vez los fotones cargados de energía lumínica son atrapados por los pigmentos antena, ésta es transformada en ATP y NADPH, energía química.

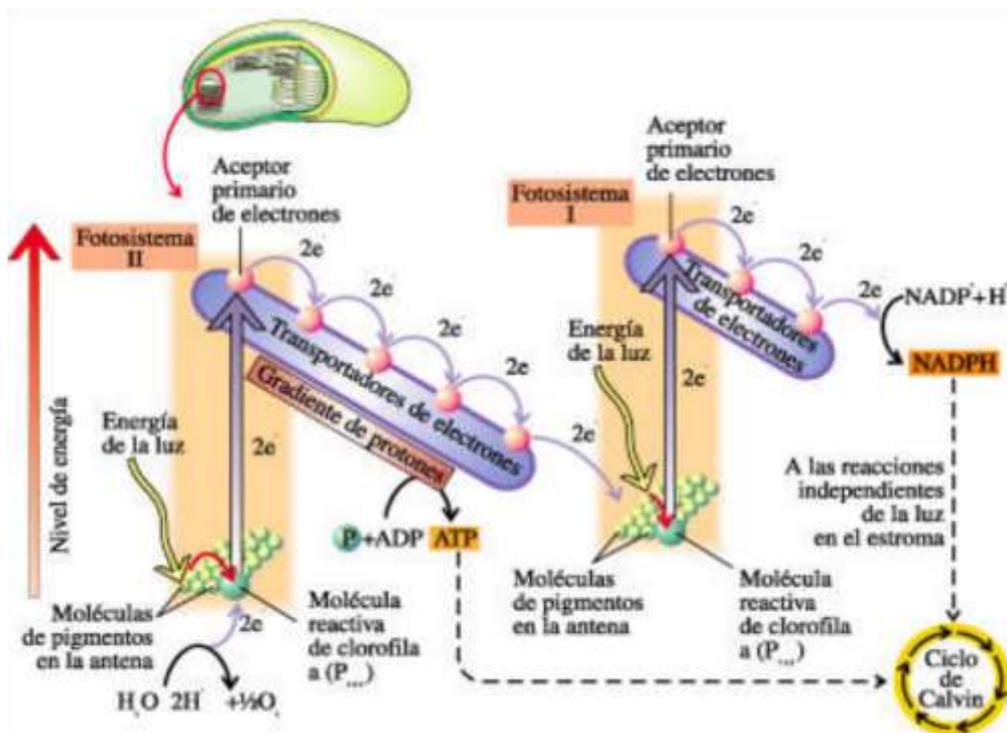


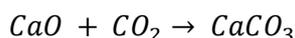
Figura 7.10. Diagrama de flujo del proceso de compresión y purificación de CO₂. Fuente DOE

El uso de especies acuáticas captadoras de CO₂ en la captura biológica, plantea unos requisitos especiales asociados a la preservación de estas especies como la necesidad tanto de grandes masas de agua como de grandes superficies de interfase gas-líquido. Asimismo, ante la presencia de especies químicas como son el Vanadio, Níquel u otras impurezas, las algas muestran una sensibilidad muy alta mostrando cambios a ésta.

En cuanto a ventajas, la captura biológica obviaría etapas tan complejas, en este tipo de procesos, como son la compresión y el almacenamiento.

7.2.1.7. Carbonatación – Calcinación

El sorbente sólido utilizado en este proceso de atrapamiento de CO₂ a altas temperaturas es el CaO. La ventaja que presenta, frente a las anteriores tecnologías, la captura de CO₂ a altas temperaturas es una considerable reducción en el gasto energético. Es en el reactor, donde se ponen en contacto el CaO con los gases de combustión lo que va a provocar la reacción deseada de carbonatación:



La figura 7.11. ilustra conjuntamente la tecnología carbonatación-calcinación y su flujo de energía y circulación hasta la separación del CO₂.

En relación con el CaO, éste debe contar con unas buenas propiedades como sorbente para poder realizar satisfactoriamente su función: una buena capacidad de absorción de

CO₂ y debe presentar una buena estabilidad tanto mecánica como química ante la repetición cíclica de los largos periodos que lleva la operación.

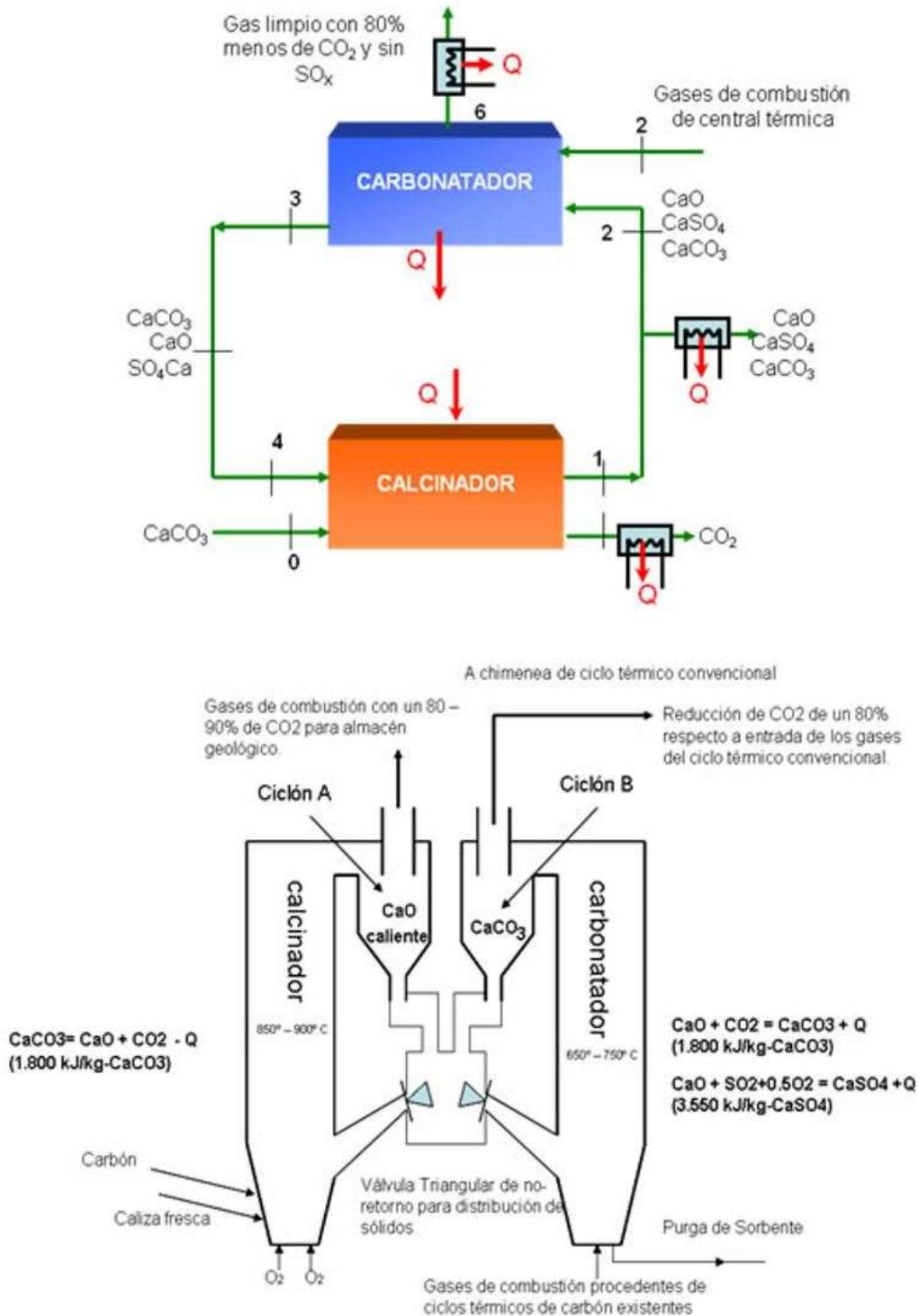


Figura 7.11. Ilustración conjunta del proceso de Carbonatación-Calcinación. Fuente: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/home.html>

Como características que presenta este tipo de metodología se encuentra la rapidez en llevar a cabo la reacción de carbonatación de CaO para la separación de CO₂, la cual se

efectúa a temperaturas mayores de 600°C y también la regeneración del CaO a través de la calcinación del CaCO₃, favorecida por temperaturas de 900°C, obteniendo el CaO puro junto con CO₂.

El bajo consumo que presenta esta tecnología se obtiene gracias a la recuperación de casi un 40% de la energía que por recirculación de las partículas sólidas entran en la unidad de calcinación.

Frente a esta ventaja, la necesidad de tener que lavar los gases de combustión para no reducir la reactividad de los sorbentes se sitúa como una gran desventaja.

7.2.2. Procesos de Precombustión

Como su nombre indica, esta tecnología se desarrolla con anterioridad a la combustión del combustible fósil como muestra la figura 7.12. Ésta representa una planta de precombustión. Utilizando compuestos como el aire o el vapor de agua, el combustible fósil reacciona produciéndose una corriente de gases conteniendo grandes concentraciones de especies como el CO₂ y el H₂.

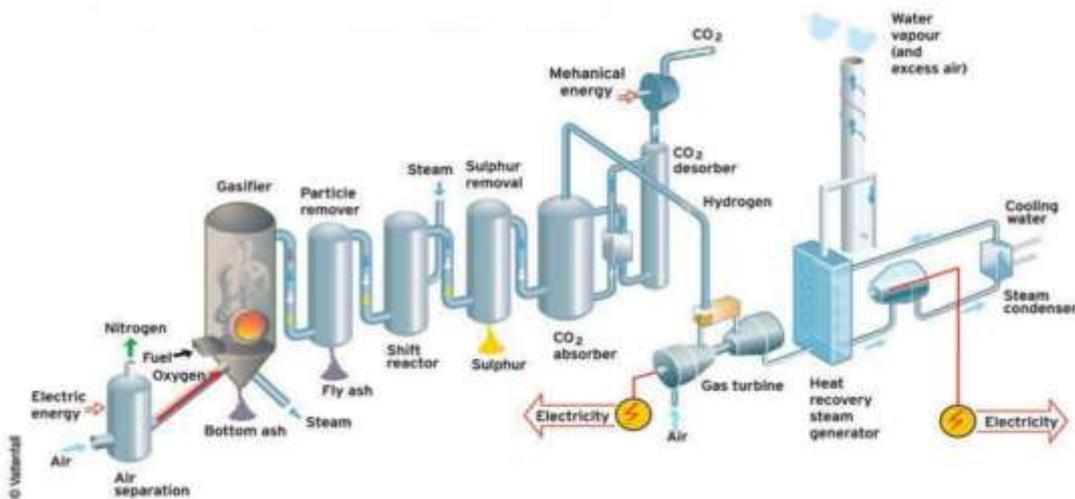


Figura 7.12. Representación del diseño de una planta de precombustión. Fuente: Vattenfall.

El volumen de gases pasa a través de un reactor catalítico (shift-CO), utilizado para obtener CO₂ y H₂ por reacción con el vapor de agua y con la finalidad de poder ser separados fácilmente tanto el CO₂ como el H₂, al final del proceso, del gas de síntesis.

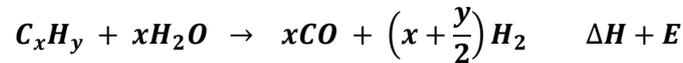
Respecto a la obtención de concentraciones y presiones parciales de CO₂ se puede decir que las tecnologías de precombustión en comparación con las de postcombustión consiguen mejores resultados. Este hecho hace que se pueda obtener una reducción en el número de equipos a utilizar lo que conlleva una menor demanda energética.

El atrapamiento de CO₂ mediante precombustión se efectúa en diferentes etapas:

1. Reacción de producción de gas de síntesis, consiste en la transformación del hidrocarburo de alimentación en un volumen de gases en cuya composición exista una riqueza en CO y H₂.

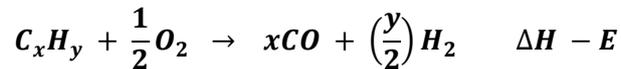
La reacción para que se produzca este gas de síntesis, se puede obtener tras diferentes métodos:

- a. Reformado con vapor de agua:



El hecho de que esta reacción conlleve un consumo de energía, reacción endotérmica, hace necesario la disposición de un aporte extra de energía a través de un combustible secundario. Junto a esta circunstancia y en favor de la mejoría de la cinemática de la reacción es necesario también el uso de un catalizador.

- b. Reacción con Oxígeno



En este método, la oxidación del comburente para convertirlo en gas de síntesis se lleva a cabo con una cantidad reducida de O₂.

Dependiendo del tipo de combustible primaria que se utilice, esta metodología recibe diferentes denominaciones:

- i. Oxidación parcial de combustibles gaseosos y algunos líquidos.

A diferencia del reformado, la producción por unidad de combustible de H₂ es menor y hay una reducción en cuanto a tiempos de reacción. Otras diferencias son:

- ◆ la en el tamaño de los reactores
- ◆ no se requiere un uso de catalizador reducción
- ◆ no es necesario un aporte extra de energía
- ◆ en cuanto al tipo de combustible a utilizar, el rango es mayor.

- ii. Gasificación de combustibles sólidos u otros líquidos.

2. Reacción shift-CO:



Claramente, puede verse como en la reacción con catalizador, optimizando tanto la cinética y la temperatura de trabajo, el CO contenido en el gas de síntesis es transformado a CO₂, consiguiendo conjuntamente H₂.

3. Separación del CO₂, esta etapa final tiene como finalidad la separación del CO₂ y el H₂ contenido en el gas de síntesis para su almacenamiento. Respecto

al CO₂, podemos encontrar concentraciones que oscilan desde un 15 a un 60% en base seca en corrientes con una presión entre 2 y 7 MPa.

7.2.2.1. Tipos de Tecnologías de precombustión

Entre otras se pueden encontrar:

- Reformado con vapor de gas natural o hidrocarburos ligeros (SMR)
- Oxidación parcial de gas natural e hidrocarburos (POX)
- Reformado autotérmico de gas e hidrocarburos ligeros (ATR)
- Gasificación de carbón, biomasa, residuos de petróleo y otros residuos.

7.2.3. Procesos de Oxidación

Proceso que se implementa durante la etapa de combustión, y se fundamenta en la utilización, como combustible primario, oxígeno de alta pureza. La figura 7.13. muestra un esquema general de la tecnología de oxidación junto con las opciones que se pueden tener en cuanto a la eliminación de impurezas.

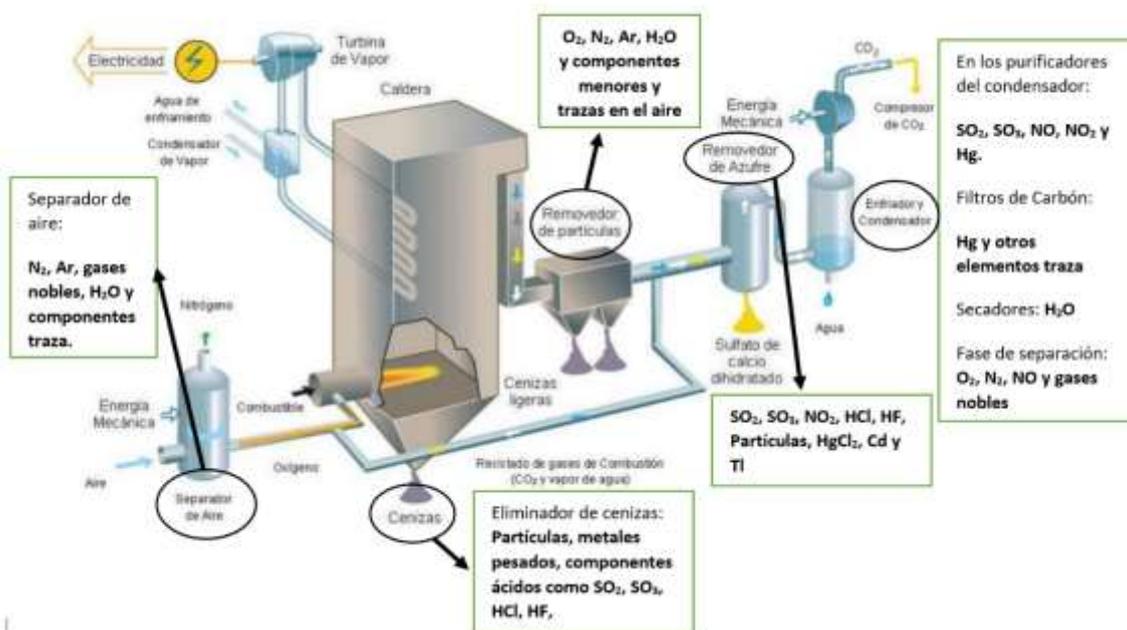


Figura 7.13. Representación de un esquema general de una planta por oxidación junto con las posibles impurezas a eliminar en los principales componentes. Fuente: Vattenfall y elaboración propia.

La combustión de oxígeno puro conlleva un efecto de aumento considerable de las temperaturas adiabáticas de llama, las cuales pueden llegar a alcanzar el orden de 3000 grados Kelvin, K. Debido a este efecto, parte de la corriente de gases creada se recircula y el CO₂, sustituyendo al N₂ inerte en combustión, funciona como regulador de

la temperatura. Esta recirculación puede ser llevada a cabo o bien por vía seca o bien por vía húmeda, estas dos configuraciones de moderación se muestran en la figura 7.14.

Por otro lado, se podrá mejorar no solo la transferencia calorífica sino también la protección de los materiales de la zona de combustión.

Bajo estas circunstancias, el CO₂ no puede ser separado del propio compuesto por lo que, previamente a la combustión se suministra al O₂. De esta manera, una ventaja que se observa es la obtención de una corriente cuya composición tenga una predominancia el CO₂ que podría alcanzar hasta el 95% frente al resto de especies que podrían aparecer en la masa como son el H₂O, SO_x, NO_x, trazas de gases nobles junto con cenizas. La realización de una sola condensación permitiría alcanzar corrientes con un 99% de su composición de CO₂.

La oxicomustión, en la actualidad, está siendo utilizada en la industria del aluminio, del vidrio e incluso la del acero, aunque su implementación a nivel comercial aún está en desarrollo[69].

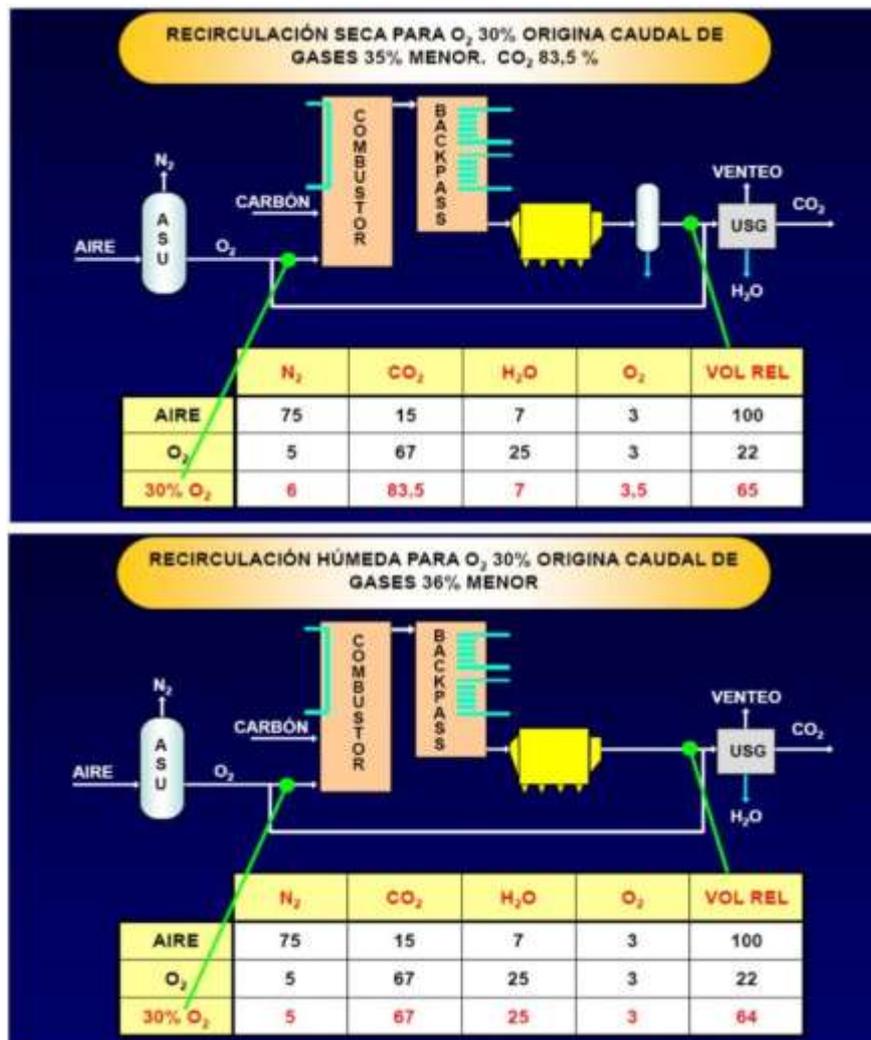


Figura 7.14. Representación de la configuración de oxicomustión por recirculación en vía seca y vía húmeda viendo como existe una reducción del volumen total y la predominancia del CO₂ en éste. Fuente: Vattenfall.

Descritas las tecnologías de Captura y Almacenaje de CO₂ con sus respectivas y principales características se muestra la tabla 7.2. en la que se incluyen las ventajas y desventajas que presentan estas [70].

TECNOLOGIAS de CAPTACIÓN de CO ₂			
	POST-COMBUSTIÓN	PRECOMBUSTIÓN	OXICOMBUSTIÓN
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología aplicable a la mayoría de las plantas eléctricas de carbón. - Opción de tecnología de reacondicionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene aplicación en centrales térmicas de carbón. - tiene una comercialización de producción de H₂ a gran escala. - Presenta una alta eficiencia. - Las penalizaciones de captura de energía son bajas (aprox. 10 – 15 %) - La producción de gas de síntesis concentrado en CO₂ se realiza a alta presión. - Conlleva más tecnologías disponibles para realizar la separación de CO₂. - Tiene potencial de reducción de los costos/cargas de compresión. - Mayor fuerza motriz para la separación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presenta una concentración muy alta de CO₂ en los gases de combustión. - Representa una simplificación respecto a la tecnología de postcombustión. - Se obtiene una eficiencia alta. - da opción a un reacondicionamiento tecnológico.
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> - El gas de combustión se presenta diluido en CO₂. - La presión a la que se encuentra el gas de combustión es la de ambiente. - El CO₂ presenta una baja presión. - El rendimiento o volumen de circulación superior al requerido para altos niveles de captura. - El CO₂ se produce a baja presión en comparación con las premisas que se solicitan para su secuestro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requieren nuevos materiales para soportar las altas temperaturas de captura del CO₂. - Se necesita una alta inversión de capital debido al alto costo de los equipos necesarios. - La experiencia es insuficiente en plantas térmicas de H₂ a gran escala. - Tiene aplicación para plantas de nueva creación debido al bajo número de plantas de gasificación en activo en la actualidad. - Los requisitos en cuanto a sistemas de soporte son extensivos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se necesita un requerimiento muy alto de producción criogénica de O₂ que se traduce en costos de energía no permitidos para cierto tipo de industrias. -El mantenimiento de las temperaturas dentro de los límites que presentan los materiales requiere del enfriamiento del CO₂. -El proceso presenta un decrecimiento en su eficiencia.

Tabla 7.2. Tabla conteniendo las ventajas y desventajas principales de las tres tecnologías CAC comentadas. Fuente: Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias, septiembre 2017 Vol.4 No,12, 22-34, Elaboración propia.

7.2.4. Transporte de CO₂

Por lo general, las fuentes de emisión de CO₂ se encuentran a una distancia considerable de una formación geológica adecuada para su utilización como lugar de almacenamiento de la cantidad de CO₂ atrapada. Por lo cual, el volumen de CO₂ captado deberá ser transportando desde el punto origen hasta el sumidero seleccionado por su idoneidad.

7.2.4.1. Métodos de transporte de CO₂

En referencia a los métodos de transporte debemos hacer un primer apunte en cuanto al estado en que se encuentre el CO₂ para la realización de su transporte, por lo que tendremos:

- **estado gaseoso**; con la finalidad de evitar regímenes de flujo de dos fases y poder aumentar la densidad del CO₂, éste es tratado a presiones superiores a 8Mpa, de esta manera el transporte de este no solo resulta más sencillo, sino que también abarata el coste. El transporte en este estado es el más extendido y común, realizándose a través de los gasoductos.

Respecto a la impulsión del volumen de CO₂, los gasoductos realizan este empuje mediante compresores situados en el extremo inicial, aunque también puede existir enclavamientos impulsores intermedios (estaciones de compresión).

- **estado líquido**; en este caso, el CO₂ es transportado en cisternas isotérmicas, cuyas condiciones de presión y temperatura, respecto a las ambientales, son muy inferiores. Estas cisternas son transportadas por camiones, buques o vagones cisterna.

En la actualidad, el transporte marítimo, utilizado a una escala reducida, resulta más económico cuando el CO₂ debe ser transportado a grandes distancias o a ultramar. Por otro lado, la utilización de los vagones cisterna y camiones aun siendo una opción viable de transporte, en comparación con buques y gasoductos, resulta más costoso excepto cuando se realiza a escalas muy pequeñas.

Por estimación, y teniendo en cuenta la gran dependencia de los costos respecto de la distancia y volumen de CO₂ a transportar, la figura 7.15 muestra una comparativa de los costos asociados al transporte para una distancia nominal de 250 km, para gasoductos terrestres y marítimos respecto al flujo másico a impulsar.

De esta gráfica, se puede observar la relación indirecta que existe entre precio, que oscila entre 1 y 7 \$ por tonelada de CO₂, y volumen a transportar en MtCO₂/año. Debido a esto, se obtiene una curva logarítmica con tendencia descendente debido a que al aumentar el volumen de CO₂ a transportar el costo desciende. Otro aspecto por comentar es lo poco atractivo económicamente que resulta el transporte marítimo frente al transporte terrestre como muestra su gráfica, ésta siempre posicionada superior a la gráfica perteneciente al transporte terrestre.

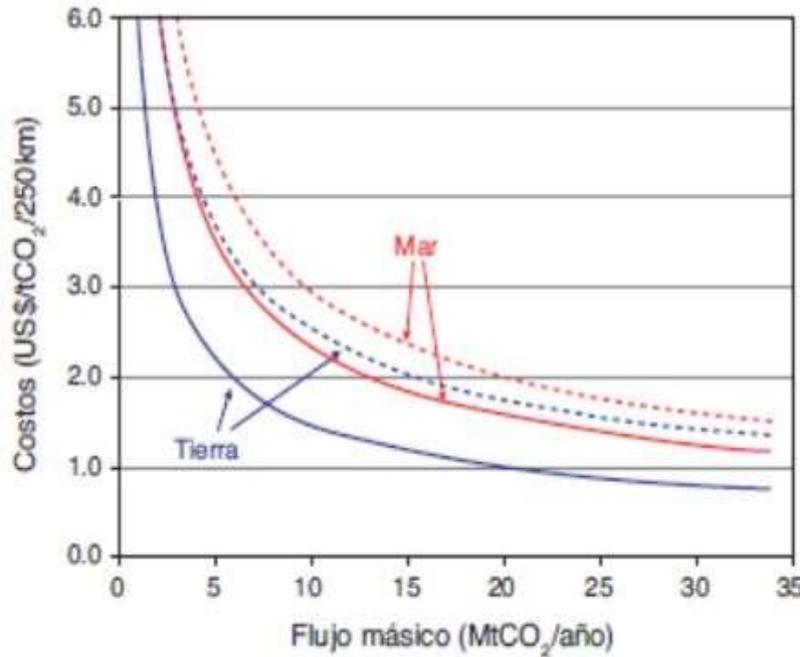


Figura 7.15. Gráfica de costos para transporte marítimo y terrestre con estimaciones a la baja (línea continua, y estimaciones al alta (línea a puntos). Estos están expresados en \$ por tonelada de CO₂ por cada 250 km en función del flujo másico de CO₂ expresado en MtCO₂/año. Fuente: IPCC,2005

Esta lectura resulta de las líneas continuas que representan estimaciones a la baja. Este hecho también es observable en las estimaciones al alza que aparecen como líneas punteadas.

Los costos de los gaseoductos se van a ver afectados en gran medida por la localización geográfica. Las características geográficas que el trazado de éstos tenga que atravesar desde el punto origen hacia el punto de almacenamiento. Factores como tipo de terrenos, corrientes fluviales, zonas de montaña o bosque. Todos estos factores van a tener también un impacto directo en cuanto a un incremento en los costos de éstos.

La 7.16., muestra una comparativa de costos de gaseoductos marítimos y terrestres contra el transporte marítimo realizado por buques. De nuevo, tras un análisis de la figura, el transporte que presenta menos económico es el gaseoducto marítimo. Asimismo, se aprecia que el transporte marítimo por buque es el más rentable en cuanto a distancia a transportar, especialmente cuando ésta supera los 2000 km.

Los inconvenientes que se pueden presentar en el transporte son relativos a la aparición en la corriente de CO₂ de trazas de H₂, N₂, CO, H₂O, SO₂, o NO₂, las cuales puedan modificar las propiedades termofísicas de ésta, en cuanto a densidad, caída de presión específica o punto crítico. Por este motivo, los costos en cuanto a transporte de la corriente de CO₂ hacia su almacenamiento pueden presentar un aumento considerable respecto a los originales [74].

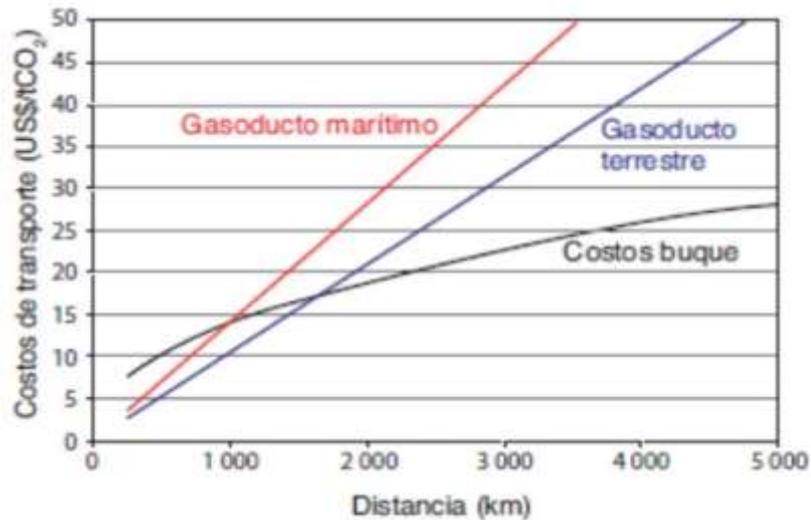


Figura 7.16. Gráfica comparativa de los costos asociados al transporte por buque, frente a los gaseoductos tanto terrestres como marítimos, éstos están expresados en dólares estadounidenses por tonelada de CO₂ respecto a la distancia en km para su transporte. Fuente: IPCC 2005

7.2.5. Almacenamiento de CO₂

El objetivo por alcanzar en cuanto al almacenamiento del CO₂ es la permanencia de éste de una manera segura en el emplazamiento seleccionado. Estos emplazamientos, depresiones naturales o formaciones geológicas subterráneas profundas de almacenamiento pueden aparecer tanto en cuencas sedimentarias terrestres como marítimas. De este modo podemos distinguir entre almacenamiento geológico u oceánico.

La figura 7.17. representa los distintos tipos u opciones de almacenamiento en formaciones geológicas subterráneas profundas tanto terrestre como marítimo y las profundidades a las cuales se realiza.

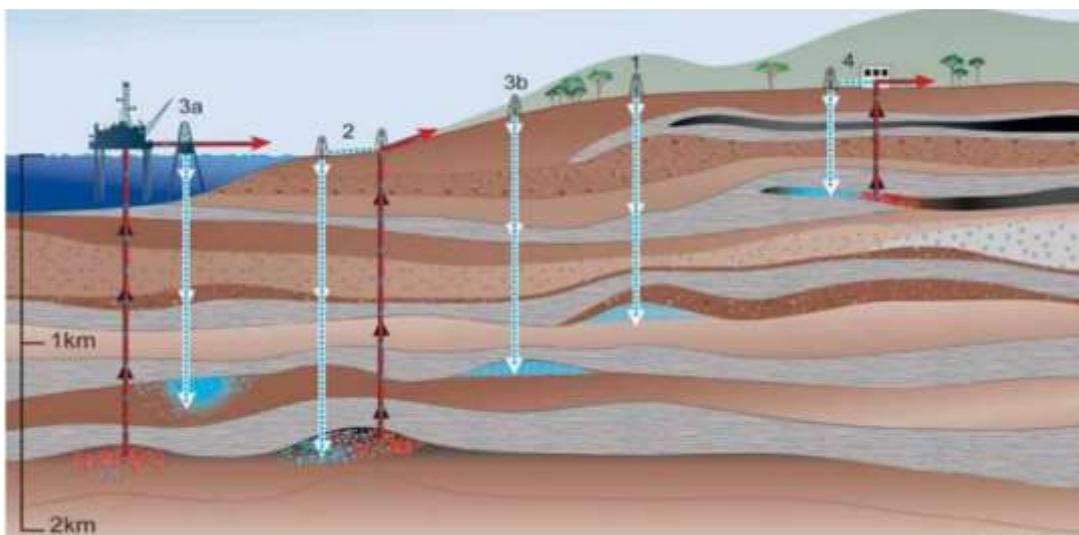


Figura 7.17. Ilustración mostrando los diferentes métodos de almacenamiento de CO₂ respecto a las distintas formaciones geológicas subterráneas profundas. Fuente: IPCC.

7.2.5.1. Almacenamiento geológico.

Dentro de los lugares de depósito geológico de CO₂ vamos a diferenciar tres grandes tipos como son los yacimientos de petróleo y gas, las formaciones salinas profundas y las capas de carbón inexplotables.

El CO₂, mediante inyección en forma condensada, es introducido en los depósitos subterráneos, rocosos y porosos. Éstos presentan muy baja permeabilidad y por lo general, se encuentran a profundidades mayores de los 800 metros. Las condiciones de presión y temperatura van a ocasionar que el CO₂ se encuentre en estado líquido o hiper crítico, lo que ocasiona que su densidad variará, respecto a la densidad del agua, entre el 50 y 80%. Estas condiciones dan lugar a que puedan surgir fuerzas de impulsión ascendentes. Es por esto, por lo que, una condición importante en cuanto a la selección de un emplazamiento que sirva de depósito debe ser que sobre este debe existir roca de cubierta estanca que asegure la permanencia del CO₂ almacenado sin escapes.

La tabla 7.3. presenta una estimación en GtCO₂, respecto a la capacidad de almacenamiento para depósitos como yacimientos de petróleo y gas, los filones de hulla inexplotables (ECBM) y las formaciones salinas profundas.

		TIPOS DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO		
		YACIMIENTO DE PETRÓLEO Y GAS	FILONES de HULLA INEXPLORABLES (ECBM)	FORMACIONES SALINAS PROFUNDAS
ESTIMACION de la CAPACIDAD de ALMACENAMIENTO (GtCO ₂)	SUPERIOR	900*	200	No es segura, pero posiblemente 10 ⁴
	INFERIOR	675*	3-15	1000

* Estas cifras aumentarían hasta un 25% si se incluyesen, para esta evaluación, los yacimientos de petróleo y gas que aún no han sido 'descubiertos'.

Tabla 7.3. Estimación de la capacidad de almacenamiento que presentan los distintos tipos de almacenamiento geológico nombrados en GtCO₂. La capacidad de almacenamiento no incluye costos económicos. Fuente: IPCC.

En relación con los riesgos que contrae el almacenamiento de CO₂, se pueden agrupar en dos escalas diferenciadas:

- **Riesgos mundiales:** representan la proporción de CO₂ que pueda fugarse de la trampa geológica en la que se encuentra atrapado.
- **Riesgos locales:** son aquellos que pueden generar riesgos a los seres humanos, ecosistemas y aguas subterráneas cuando se produce un escape o fuga de CO₂ del atrapamiento.

En este caso, se presentan dos escenarios diferenciados:

1. Cuando la liberación de CO₂ se produce de una manera rápida y repentina por fallos en los pozos de inyección o por fugas ascendentes en pozos abandonados. La fuga es detectable rápidamente y en su solución pueden ser aplicables técnicas de contención de explosiones en pozo. Afecta a todos aquellos trabajadores que se localicen próximos al lugar del suceso o a los que atiendan este escape.
2. Existencia de fracturas naturales no detectadas en el terreno o por filtración gradual. Este tipo de escape presenta un riesgo inminente para los acuíferos subterráneos de agua potable cercanos, así como una acidificación de los suelos afectados.

La figura 7.18. a través de un corte geológico muestra, esquemáticamente, los diferentes caminos que pueden presentarse para la ocurrencia de una fuga de CO₂ atrapado en formaciones salinas, y sus medidas de saneamiento.

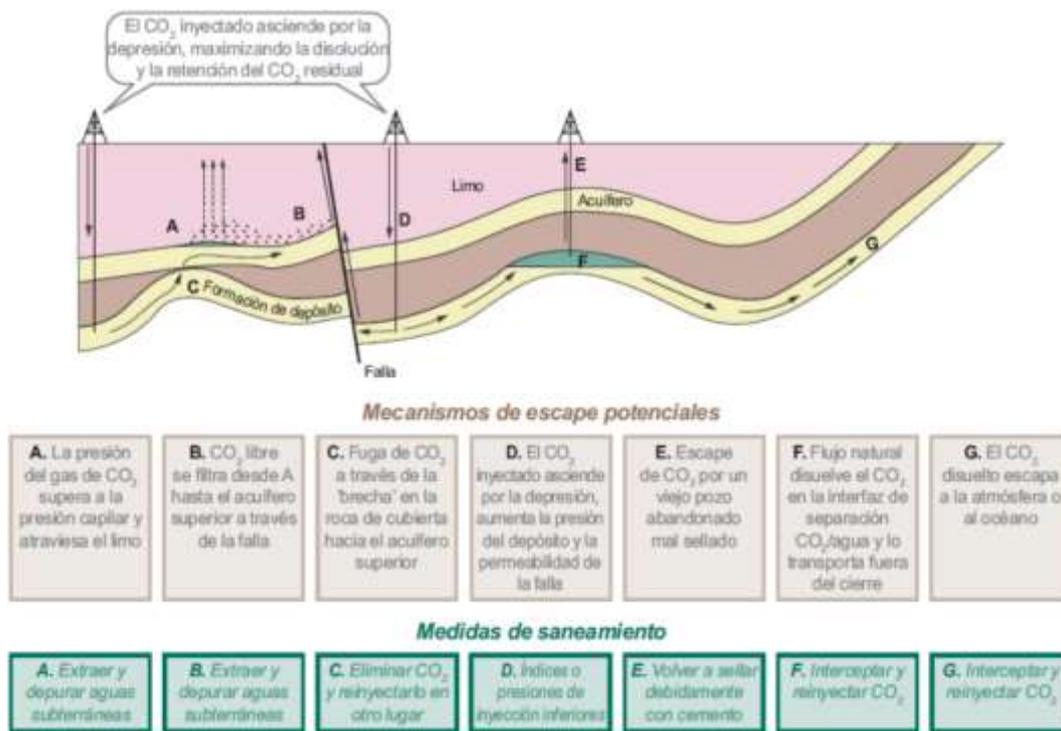


Figura 7.18. Corte esquemático mostrando los diferentes mecanismos de escape que pueden presentarse en una formación salina junto con las medidas de saneamiento más favorables para contrarrestar este escape.

Fuente: IPCC.

7.2.5.2. Almacenamiento oceánico.

Este tipo de almacenamiento consiste en la inyección directa a más de 1000 metros de profundidad quedando aislada gran parte del CO₂ atrapado de la atmósfera. Según los análisis y modelos oceánicos realizados, respecto al comportamiento de estos fondos oceánicos, el aislamiento del CO₂ podría durar varios cientos de años y a mayor profundidad la cantidad retenida aumenta. Respecto a la fracción disuelta y en suspensión, ésta pasaría a formar parte del ciclo global del carbono.

El transporte para este tipo de almacenamiento se realizaría mediante gasoductos o buques.

En la actualidad, este tipo de almacenamiento sigue en una fase de investigación y no se ha podido demostrar a escala experimental [89].

7.3. Costos asociados a las CAC

En la actualidad y dado que las tecnologías de captura y almacenamiento están en procesos de análisis y experimentación, su implementación en los centros de gran potencia incurre en un aumento de los costos de producción, de explotación, así como de mantenimiento.

En cuanto a costos de transporte, como ya se ha visto con anterioridad en este apartado, presentan una alta variabilidad debido a la dependencia de esta fase a la manera de su realización. Es decir, si el transporte se realiza por tierra o de lo contrario se llevaría a cabo por mar.

El precio del gasoducto queda expuesto a factores como el geológico, aumentando proporcionalmente al aumentar la dificultad geológica, y la naturaleza política (área urbana, rural, etc.) del terreno a atravesar.

Con relación a los costos de almacenamiento, éstos también son fluctuantes dado la heterogeneidad que presentan las trampas geológicas utilizadas como depósito. De esta forma, queda implícito tanto el tipo de depósito ya sea marítimo o terrestre, una formación salina frente a un depósito agotado, como características del propio yacimiento como pueden ser la porosidad, permeabilidad, profundidad.

8. PLANTA CEMENTERA

8.1. Fuente de emisión de CO₂

La contribución de emisiones antropogénicas de CO₂ que representa la industria cementera tiene un gran impacto. De este modo, nos encontramos que en la totalidad del mix de emisiones de las principales industrias emisoras, ésta aporta 1.306 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, lo que equivale a un 27%. Así, este porcentaje, pasado a cantidad de toneladas de CO₂ emitidas por tonelada de CO₂ de cemento producido le corresponden valores entre un 0.6 y 1.0 t.

Si tomamos esta cantidad como el 100%, entonces podemos hacer un reparto, no equitativo de esta, durante la producción de cemento, lo que se correspondería a la siguiente:

- Un 40 % de las emisiones, se generan en los procesos de combustión, de los combustibles fósiles utilizados para los procesos que se llevan a cabo en los hornos de las plantas cementeras.
- Un 50 % de las emisiones, son debidas al proceso que lleva a cabo la transformación de la caliza (CaCO₃) en óxido cálcico (CaO).
- El restante 10 %, está relacionado con la manipulación y transporte del material [91].

De este modo y apoyando lo anterior citado, la figura 8.1. muestra una proyección hasta el 2050 en la cual se observa como la producción de cemento, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, va a aumentar considerablemente. Esta consideración puede ser traducida también en demanda, lo que indica un aumento más

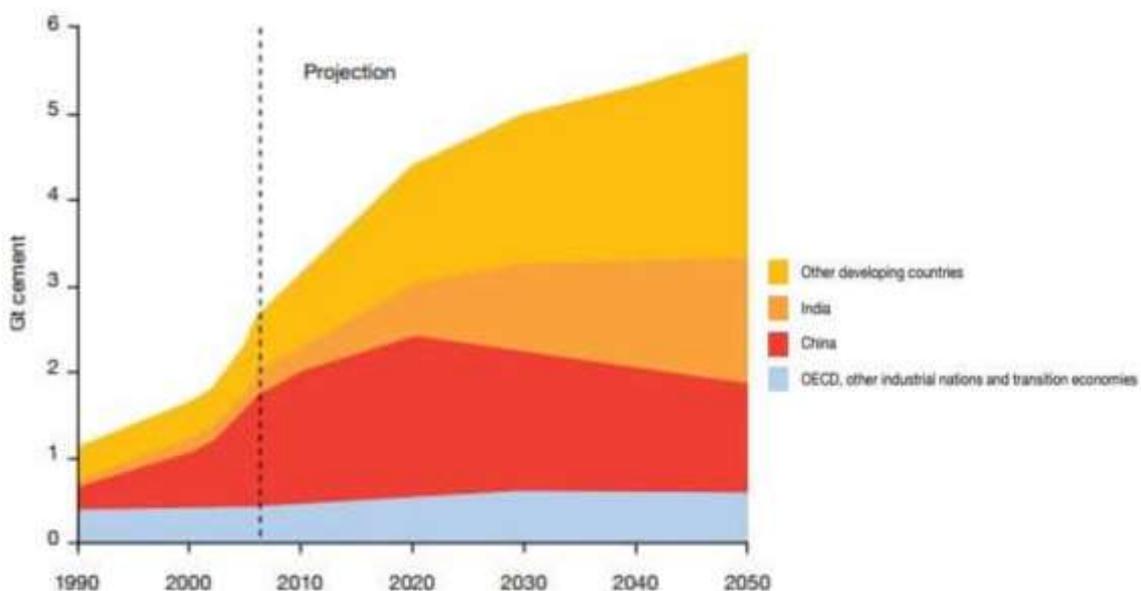


Figura 8.1. Gráfica de producción de cemento en países industrializados y en vías de desarrollo.

que considerable de ésta respecto al uso de cemento en las próximas décadas, que podría situarse en una horquilla del 60 al 110% [71].

En este escenario de emisiones, de nuevo, la actuación más urgente a tomar es una concienciación social en cuanto a la problemática en sí misma y

Es necesario adoptar nuevas tecnologías de aplicación directa en las grandes fuentes de emisión reconocidas, en este caso concreto en las plantas cementeras y elegir implementar las tecnologías CAC.

8.2. Estado del arte de la producción del cemento

El cemento es un material aglomerante hidráulico, inorgánico y no metálico, que se encuentra finamente molido y en cuya composición podemos distinguir diferentes componentes como cal, alúmina, hierro y sílice. Cuando este conglomerante es amasado con agua y diferentes áridos fragua, formando un hormigón o mortero, conservando por un tiempo propiedades tales como la trabajabilidad y la capacidad de moldeo antes de fraguar por mediación de las reacciones internas que se dan en la pasta. Una vez que ocurre el endurecimiento, se mantienen tanto sus niveles preestablecidos de resistencia como su estabilidad de volumen, incluso bajo el agua, a largo plazo.

El proceso de endurecimiento que sufre el cemento se debe principalmente a la hidratación de los compuestos químicos que podemos encontrar en éste como son los silicatos de calcio principalmente, aunque también puedan encontrarse trazas de aluminatos [74] [75].

El principal constituyente de los cementos es el Clinker, proceso que se obtiene por calcinación de materias primas calcáreas y silicoaluminosas. Es este proceso el que genera CO₂ en la reacción de descarbonatación de los carbonatos cálcicos y magnésicos que contienen dichas materias primas.

8.2.1. Obtención y preparación de materias primas

En este primer paso hay que tener en cuenta la obtención del clínker como componente principal para la elaboración del cemento y cuya constitución se basa o bien en materias primas naturales como la caliza y pizarra, o bien con materiales como arcillas o margas.

En algunos casos, para conseguir un clínker óptimo, se recurre a la utilización de otros elementos secundarios, materias primas que pueden ser naturales como la bauxita, o bien subproductos o residuos provenientes de procesos de fabricación como son las escorias de siderurgia o las arenas de fundición, cuyo aporte a la fabricación del cemento recae en el aporte de elementos necesarios como el calcio, el silicio, aluminio y hierro. Respecto a materiales, la tabla 8.1 presenta las distintas materias no incluyentes de elementos menores o elementos traza. [88]

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

		CATEGORÍA del MATERIAL			
		Materias primas (principales)	Materiales correctivos	Controladores de cura	Componentes minerales
ORIGEN	NATURAL	Caliza, cal margosa, marga calcárea arcilla, cenizas de carbón	Cal de alto grado, arena de cuarzo, buaxita, mineral de hierro	Yeso	Puzolana
	ALTERNATIVO	Cal/lodo industrial, cenizas volantes, etc.	Arena de fundición, ceniza de pirita, etc.	Yeso de desulfuración	Escoria de arenado de hornos, cenizas volantes, etc.

Tabla 8.1. Tabla de las diferentes materias primas no incluyentes de elementos menores o elementos traza. Fuente: Elaboración propia.

Sirva la figura 8.2. como presentación de una planta procesadora del cemento, mostrando las diferentes partes que componen la misma y a partir de ésta describir el proceso de producción del cemento paso a paso comenzando una vez ha llegado el material utilizado, descrito en párrafos previos, procedente de la cantera a la planta procesadora.

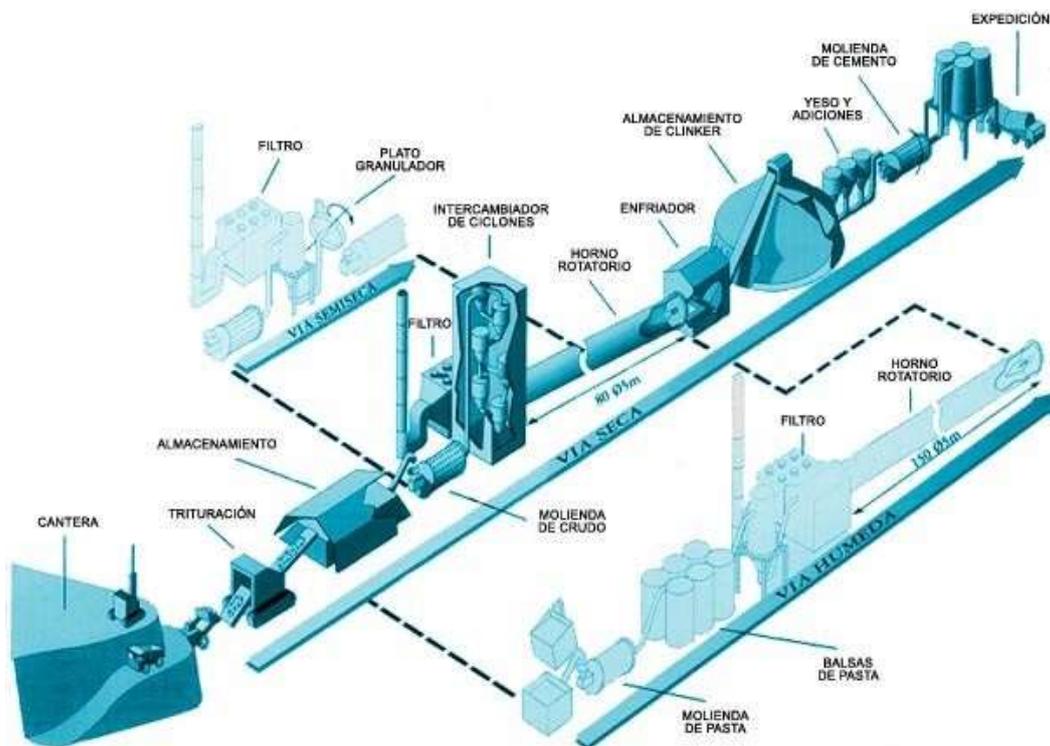


Figura 8.2. Planta procesadora de cemento. Fuente: Cillo Rouge / Roger Rivert

8.2.2. Trituración y prehomogeneización

La trituración, como proceso, se realiza normalmente en dos etapas; una primera etapa, donde una machacadora primaria reduce la roca hasta un primer tamaño de 25-30 cm desde 1.5 m. Este primer material reducido es almacenado, en espera de la siguiente etapa, la molienda, en la cual el tamaño será reducido hasta los 2 mm aproximadamente.

Finalizada a etapa de trituración, el material es llevado a la planta mediante cintas transportadoras, dónde es almacenado por capas uniformes en el parque de materias primas para poder ser tratadas en la siguiente etapa [76].

El material es almacenado uniformemente facilitando el proceso de prehomogeneización ya que se extrae rascando en planos diferentes a los de apilado, lo que va a permitir la preparación de una dosificación adecuada de los distintos componentes, lo que va a reducir considerablemente la variabilidad de éstos.

Una vez que se ha realizado esta operación y antes del comienzo de la siguiente etapa el material se almacena en un silo o pila junto a otros, los cuales contienen los materiales correctivos minoritarios como son los minerales de hierro, sílice, bauxita, etc. [76].

8.2.3. Molienda de crudo

Una vez que se tiene la mezcla óptima de las materias primas se tiene el material crudo que va a entrar al molino de harina o crudo para su procesado posterior en el horno y así formar el clínker asegurando las reacciones químicas más adecuadas en el horno.

Para la molienda del crudo, que es un material de gran finura, se utilizan molinos de bolas, verticales o prensas de rodillos.

Las partículas provenientes de la prehomogeneización llegan a reducirse a un tamaño medio de 0,05 mm. Esta harina o crudo obtenida es almacenada en un silo, de esta manera se vuelve a incrementar la homogeneidad química de la mezcla [76][77].

8.2.4. Fabricación del Clinker: Horno

El Clinker, por definición, es el producto intermedio de elaboración del cemento que se obtiene por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, los cuales contienen en su composición óxido de calcio, silicio, aluminio y hierro en proporciones adecuadamente calculadas.

La harina o crudo obtenido en la etapa anterior se introduce en la parte superior del precalentador de ciclones que es un intercambiador de calor por suspensión de gases de varias etapas. El material va a ir descendiendo hacia el horno situado en la base de esta torre, calentándose lo que va a facilitar la cocción.

En su descenso, el crudo es precalentado a contracorriente por los gases ascendentes del horno aumentando su temperatura hasta los 1000°C antes de alcanzar el horno [76].

Durante el avance de la harina, en el interior del horno, cuya llama principal arde a 2000°C, se alcanzan temperaturas de hasta 1500°C, suficientes para calcinar la harina mediante las adecuadas reacciones físicas y químicas que van a facilitar la obtención del clínker.

En el horno de fabricación del clínker se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación, éstos son: vía seca, vía semi-seca, vía semi-húmeda y vía húmeda.

De estos procesos, el más común utilizado en Europa, en la actualidad, es el de vía seca. Esto se debe a que resulta ser el más económico de los cuatro en cuanto a consumo energético requerido [76] [77].

En la figura 8.3. se pueden ver las diferentes partes del “horno rotativo”. En los hornos modernos nos encontramos con un precalcinador, localizado entre la penúltima y la última etapa del ciclón, cuyo trabajo consiste en decarbonatar el carbonato cálcico (caliza) antes de entrar en el horno rotatorio.

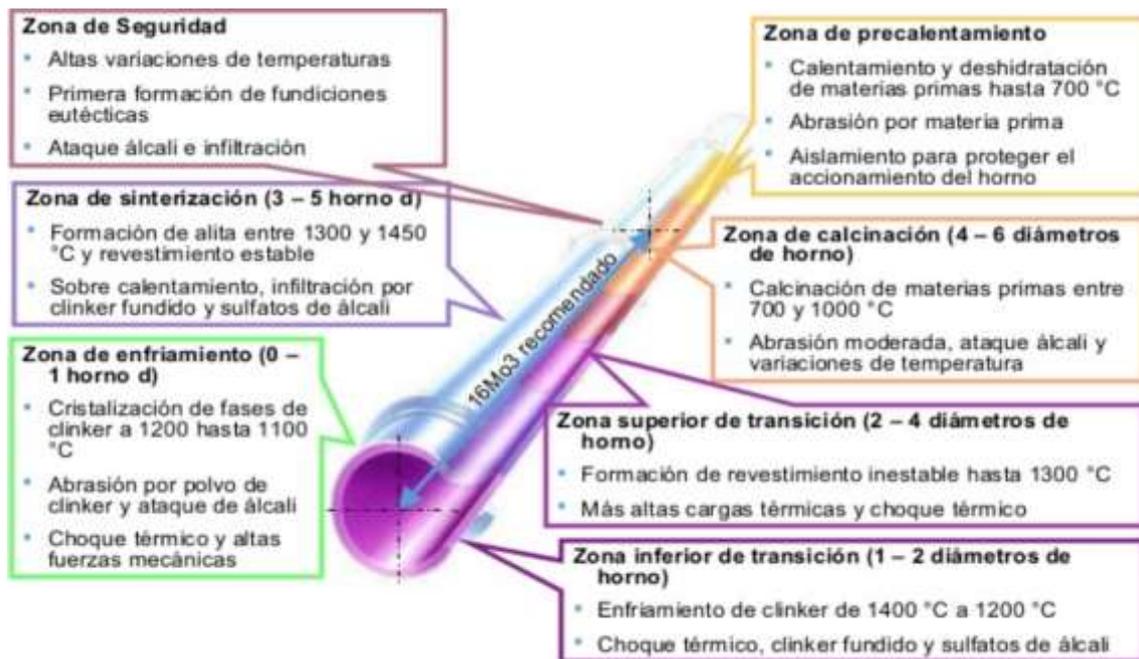
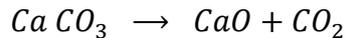


Figura 8.3. Ilustración de las diferentes zonas de un Horno Rotativo junto con sus principales características. Fuente “Fundamentos sobre Hornos”. Ingenio

En el horno se produce la calcinación de la caliza, transformación en la cual ésta llega a alcanzar los 900°C y posibilita la disgregación de la caliza en dos productos, uno el óxido de calcio, más tarde material transformable a clínker, y CO₂, gas GEI que va a ser emitido al exterior, convirtiendo este otro punto del proceso en un nuevo foco de emisión [78] [80].

Respecto a la reacción que se produce mencionada en el párrafo anterior, es la siguiente:



Desde el punto de vista químico no hay posibilidad alguna de crear Óxido de Calcio sin que no aparezca, junto con éste como producto también de la calcinación, el dióxido de carbono.

En el calentamiento del horno se utilizan combustibles fósiles que conlleva una segunda fuente de emisión, por un lado, cerca del 60%, utilizado en el precalcinador y el 40% restante se quema para calentar el horno que alcanzará temperaturas de hasta 2000°C, rango necesario para que se produzca la calcinación de la caliza.

8.2.5. Fabricación del Clinker: El Enfriador.

El enfriador de parrilla es el utilizado normalmente por una planta cementera para llevar a cabo el proceso de enfriamiento del clínker por inyección de aire frío desde el exterior. De esta manera, el clínker egresado en el enfriador reduce su temperatura desde los 1400°C hasta los 100°C [76].

El aire cálido o exceso de calor que se obtiene en el enfriador más tarde es utilizado, como aire de combustión ya precalentado, tanto por el horno rotatorio como por el precalcinador [71].

8.3. Datos de producción de cemento y emisiones de CO₂

El cemento, como material de construcción, a nivel global, constituye uno de los materiales más utilizados dentro de las actividades industriales antropogénicas. En la actualidad, se considera, que la demanda asociada a este material vaya en aumento respecto a las últimas décadas.

En la figura 8.4., se puede hacer una lectura comparativa, por una parte, al consumo respecto a la producción de cemento y, por otra parte, una comparativa de la anterior frente al producto interior bruto mundial. De esta manera, se observa el cambio en el comportamiento a partir del 2013 como tanto producción como consumo se sitúan por encima del PIB mundial llegando a un pico máximo en el 2014.

A partir de este año, incluso habiendo una recesión en cuanto a producción y consumo, su situación sigue por encima del PIB, así como la previsión que se muestra para los años consecutivos. Situándonos en el 2015, año en que la producción de cemento casi alcanzó la espectacular cifra de los 4.000 Mt, si contamos con un crecimiento de la demanda anual entre los valores del 0,8 - 1,2 % esta cifra, pasada a unidades de masa, pasaría a ser del orden de 3700 a más de 5.000 Mt hacia el año 2050 [78][79], aunque estas estimaciones pueden ir a la baja por la presente crisis de la pandemia del coronavirus.

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

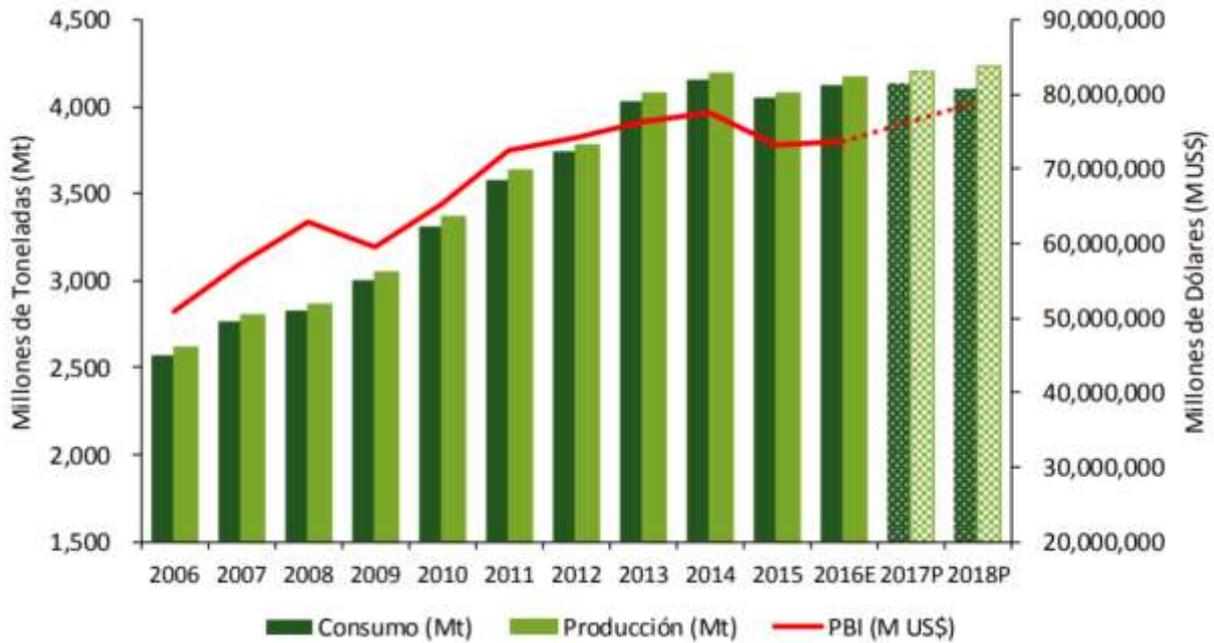


Figura 8.4. Consumo y Producción de Cemento junto al PIB del Mundo (2006-2008P). Fuente: International Cement Review, Banco Mundial y FMI. Elaboración ASOCEM.

En la figura 8.5. se presenta, para el periodo 2010 -2017, de una manera paralela la relación existente entre producción de cemento y emisiones producidas.

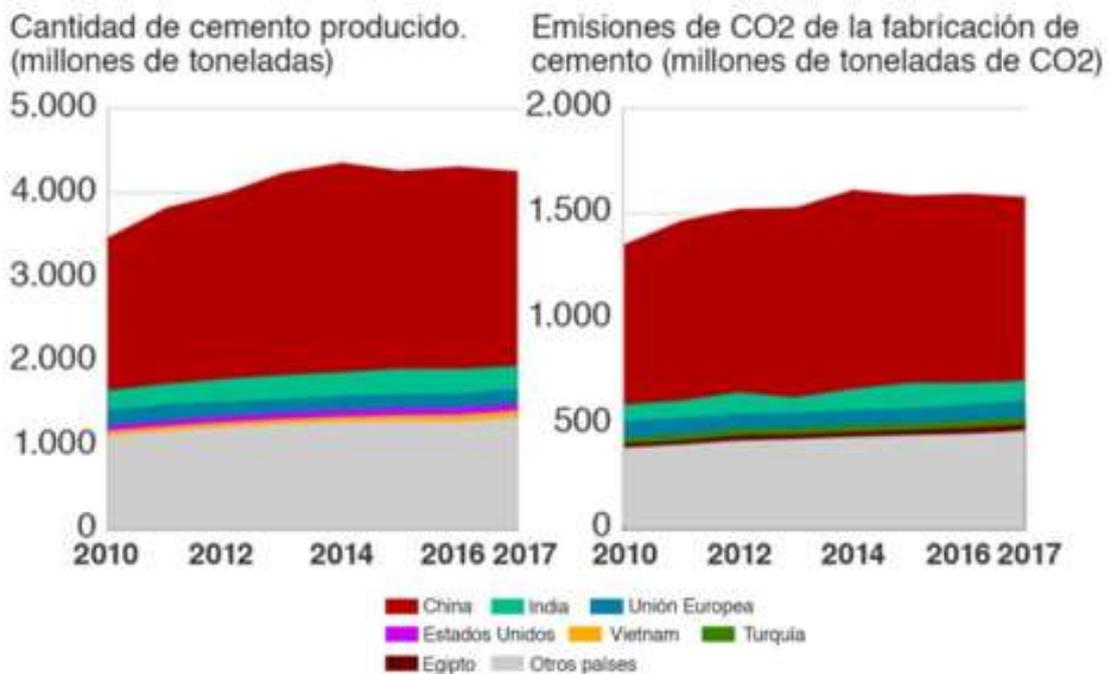


Figura 8.5. Figura representativa y de relación entre fabricación del cemento y emisión de CO₂ por país productor. Fuente: PBL Agencia de evaluación ambiental de los Países Bajos. BBC

Se observa claramente como, de los países productores de cemento destacar China, el cual, por sí solo, representa más del 50% de la producción mundial de cemento junto con India, cuya producción mundial se sitúa en el 8%.

Teniendo ya una visión generalizada del escenario de emisiones mundial se muestra la figura 8.6. En ésta se puede ver un esquema más particular y referente al proceso de producción del cemento en una planta cementera sin tener lugar captura de CO₂ y así aparecen los momentos o focos en los que se realiza una emisión de CO₂.

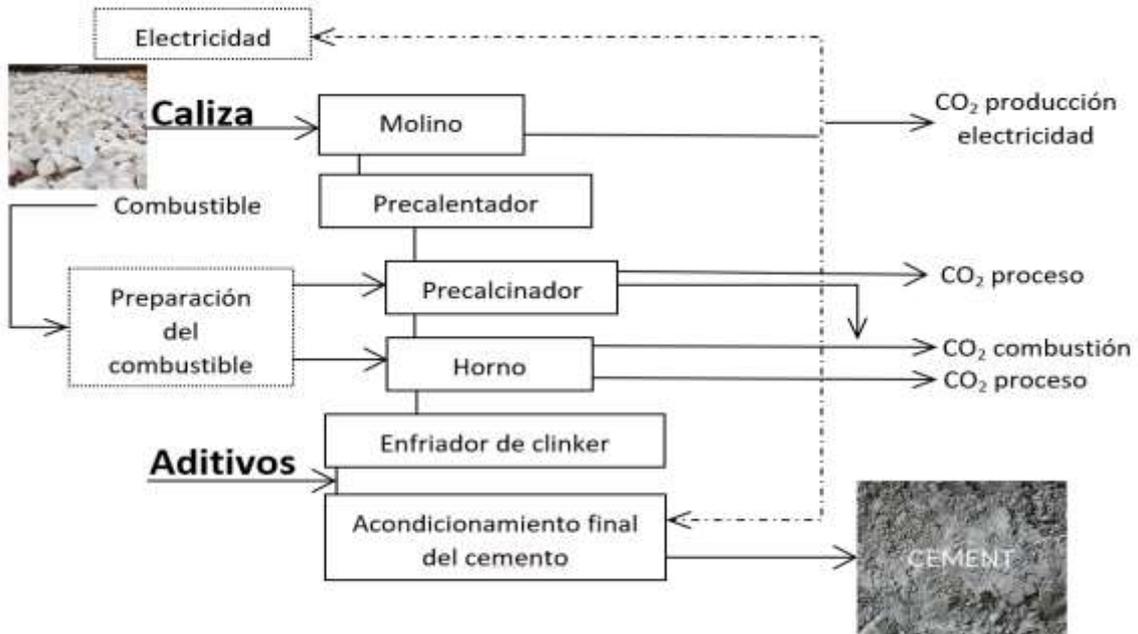


Figura 8.6. Figura representativa de los puntos de emisión de CO₂ en una planta cementera sin captura de CO₂. Fuente: Revista Técnica CEMENT HORMIGÓN. Elaboración propia.

Continuando con emisión de CO₂ en la producción del cemento se presenta la tabla 8.2. y tabla 8.3.. En la primera, se incluyen las concentraciones o porcentajes pertenecientes a las principales constituyentes de las emisiones atmosféricas que se dan en una planta cementera y ya en la segunda tabla, se presentan las emisiones medias de CO₂ por tonelada de cemento que se produce en cada uno de los focos emisores durante la producción del producto.

		COMPONENTE				
		CO ₂	NO ₂	NO _x	SO ₂	O ₂
CONCENTRACIÓN		14 - 33 %	5 - 10 %	< 200 - 3000	< 10 - 3500	8 - 14 %
		(w /w)	de NO _x	mg / Nm ³	mg / Nm ³	(v / v)

Tabla 8.2. Tabla de concentraciones de los principales gases de emisión en una planta cementera. Fuente: Udara S.P.R. Arachchige, Dinesh Kawan, Lars-André Tokheim and Morten C. Melaaen. Intenational Journal or Modeling and Optimization, Vol. 3, No 6, December 2013. Elaboración propia.

Refiriéndonos a la Tabla 8.2. y tomando como referencia, para poder comparar con otro tipo de plantas industriales, el valor 14-33%, nivel de concentración de la especie CO₂ que aparece en las corrientes de gases de salida, resulta superior tanto para una planta convencional de combustión por carbón, cuyo índice se sitúa entre un 12% y un 14%, aumentando esta diferencia en cuanto a una planta de gas natural, cuyo valor representa solo un 4% en cuanto a concentración total. Desde esta perspectiva, la industria del cemento resulta, en cuanto a emisiones GEI, un foco contaminante sensible a la aplicación de diferentes tecnologías que ayuden a esta industria a la consecución de una reducción considerable en cuanto a sus emisiones.

E M I S I O N E S	
CO ₂ procedente de la calcinación	535 kg CO ₂ / t. clínker
	330 kg CO ₂ / t. clínker
CO ₂ emitido por el clínker	865 kg CO ₂ / t. clínker
	680 kg CO ₂ / t. cemento

CO₂ procedente de la combustión

Emisiones directas de CO₂ en producción de cemento.

Tabla 8.3 Tabla de emisiones medias de CO₂ por tonelada de cemento producido (para un contenido medio de clínker del 78%). Fuente: Udara S. P.R. Arachchige, Dinesh Kawan, Lars-André Tokheim, and Morten C Melaaen. International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 6, December 2013. Elaboración propia.

Las cantidades dadas en la tabla 8.3. se corresponden con la emisión media de CO₂ que se produce por cada tonelada de cemento producido. En éstas no aparecen emisiones derivadas, por una parte, las producidas por el transporte y por otra, aquellas que están asociadas a la cantidad de energía eléctrica utilizada en las diferentes operaciones que se llevan a cabo en la planta cementera.

Como resumen, en cuanto a emisiones directas a lo largo del proceso de producción del cemento, se correspondería un porcentaje del 5% para el transporte, entre un 5% y un 10% a la electricidad consumida y en cuanto al porcentaje en combustible utilizado, tomando el carbón como recurso, éste se movería dentro de un intervalo entre el 60% y el 70%.

En relación con la aplicación de medidas en plantas cementeras que promuevan una notable merma en cuanto a emisiones de CO₂ a la atmósfera durante el proceso de producción del cemento, nombrar aquellas que ya han sido adoptadas hasta el momento:

- Suplir el uso de combustibles fósiles utilizados en aquellos procesos o transformaciones que conlleven emisiones como queda reflejado en la figura 6.6, por fuentes combustibles alternativas, AF por sus siglas en inglés.
- Mejorar la *eficiencia energética* de la planta.

- Utilizar materiales cuyas propiedades sean muy similares al clínker, pero el contenido de carbono es mucho menor que éste.

Se está observando que, pasado ya un tiempo desde que se instaurasen las medidas arriba citadas frente a la creciente demanda mundial a la que se está enfrentando la industria cementera, la efectividad de éstas, respecto a representar un verdadero freno al impacto ambiental producido por el sector, no es del todo suficiente.

Por el motivo citado arriba, es de urgente necesidad el desarrollo de nuevas tecnologías de apoyo, para su instauración, y así provocar una enérgica actuación frente al aumento de emisiones GEI dentro del sector cementero [80].

La hoja de ruta de la tecnología del cemento en el 2009 planteaba o presentaba posibles tecnologías o medidas que podrían contribuir positivamente a una debida reducción de las emisiones de CO₂ emitidas por la industria cementera. Éstas se muestran en la figura 8.7. junto con su correspondiente porcentaje de reducción para su participación en esa mitigación.

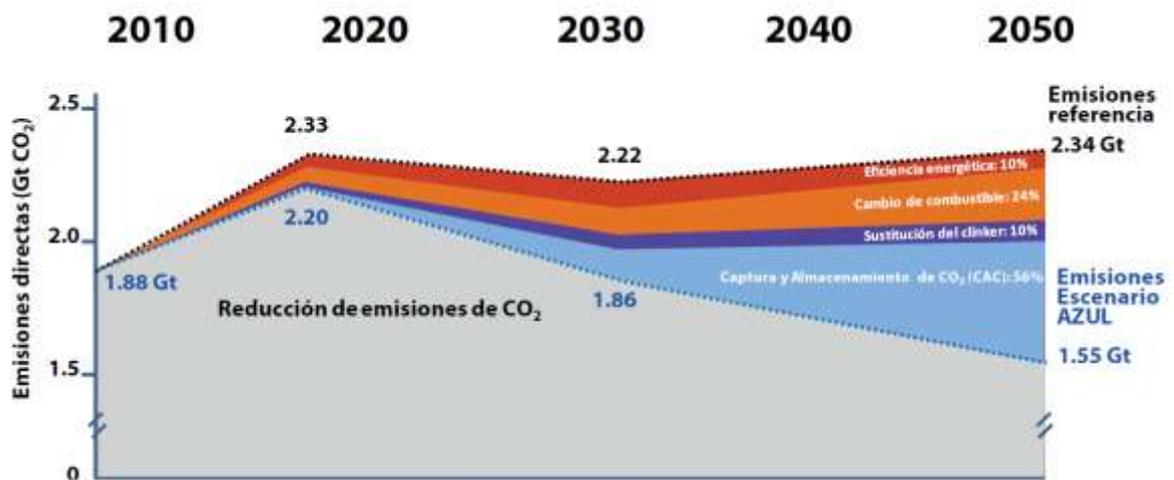


Figura 8.7. Gráfico histórico con pronóstico hasta el 2050 partiendo desde el año 2010 respecto a emisiones directas en GtCO₂. Los diferentes colores se corresponden con la disminución de emisiones que se corresponden con las diferentes medidas a poder adaptar a las cementeras para una mitigación relativa de emisiones GEI. Fuente: Revista CEMENTO HORMIGÓN.

La tabla 8.4. recoge los porcentajes que se corresponden con cada tecnología incluida en ésta. En la misma, la fila resaltada muestra como la tecnología de Captura y Almacenamiento de CO₂, resulta la más apropiada en cuanto a reducción de emisiones GEI con una participación algo por encima del 50%.

Se puede decir, que la puesta en marcha de ambas tecnologías, en conjunto, tanto las ya aplicadas como las de nueva aplicación, favorecería llegar a una reducción de emisiones directas hacia el año 2050, desde 2.34 Gt, cifra referencia que se obtendría bajo el actual ritmo de producción y sin la introducción en la cadena de producción de tecnologías de nueva aplicación, hasta el valor de 1.55 Gt [78].

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

APLICACIÓN	TECNOLOGIAS PROPUESTAS	REDUCCIÓN EMISIONES (%)
APLICADAS	Eficiencia Energética	10
	Cambio de Combustible	24
	Sustitución del Clíinker	10
De nueva aplicación	Captura y Almacenamiento de CO ₂	56

Tabla 8.4. Tabla mostrando la participación en %, en cuanto a reducción en emisiones GEI, de aquellas tecnologías incluidas en la figura 8.7.. Fuente: Revista CEMENTO HORMIGÓN.

9. Aplicación de tecnología de captura de CO₂ en planta cementera

De entre las diferentes tecnologías CAC descritas se elige la captura de CO₂ mediante postcombustión debido, principalmente porque se encuentra entre una de las opciones más desarrollada en la actualidad a nivel industrial.

Asimismo, de entre las tecnologías de postcombustión se puede decir que la absorción química o captura por absorción de CO₂ de corrientes gaseosas se encuentra en un estado muy avanzado de madurez o desarrollo en cuanto a la captación de CO₂.

Sirva de resumen que la absorción química se basa en un equilibrio químico de una reacción reversible ácido débil/base débil, la cual puede conllevar o no cambio de fase. De este modo, incluidas en esta tecnología de captación de CO₂ se tienen diversas opciones como la utilización de Alcanoaminas, Amoniaco o Salmueras Alcalinizadas.

De las arriba citadas, el Amoniaco se presenta como una alternativa prometedora ya que muestra unas características un poco más ventajosas frente a las demás:

- Descomposición térmica o química: en este aspecto las aminas presentan una pérdida, en Kg/ton CO₂ recuperado, que podría oscilar entre un 0.2 y un 1, a diferencia del amoniaco cuyas pérdidas son muy inferiores a éstas, y que se deben por fuga de gases en chimeneas.
- La temperatura a la que se realiza la absorción del CO₂, entre 0 y 5°C, rango que permite, por un lado, minimizar las emisiones de amoniaco y por otro, maximizar la formación de bicarbonato de amonio.

Así, la implementación del proceso de amoniaco enfriado, CAP por sus siglas en inglés, en una planta cementera como tecnología de postcombustión, para llevar a cabo una reducción de emisiones de CO₂ parece bastante prometedor. Esta idea viene apoyada por el objetivo de proyectos como CEMCAP que intentan que este tipo de tecnologías se implementen a gran escala en la industria cementera europea [72][73].

El presente TFG únicamente analizará la tecnología de separación del CO₂ de los gases emitidos, pero hay que tener en cuenta que no contempla:

- La etapa de compresión para obtener calidad de “almacenamiento”.
- El transporte hasta el lugar de almacenamiento final o intermedio.
- Inyección y almacenamiento al depósito final.

Finalmente, CCS tiene un costo. Implementar la técnica en una sola planta de cemento aumentaría el costo de producción del cemento y dificultaría la competencia con el cemento producido con emisiones de CO₂.

9.1. CAP, Proceso de Amoniaco refrigerado

El CAP, comprende la absorción del CO₂ del volumen de efluentes procedentes de la combustión mediante un absorbente, en este caso el amoniaco enfriado o refrigerado (ver Figura 7.5).

La figura 9.1. presenta un esquema de la instalación de esta tecnología en un horno, localizándola al final de tubería una vez pasado el horno. De esta manera, el gas de combustión, procedente del horno, es enviado al CAP donde se llevará a cabo el atrapamiento mediante la utilización de calor para poder realizar la regeneración de los disolventes y obtener potencia para las labores de enfriamiento, bombeo y compresión que se necesitan.

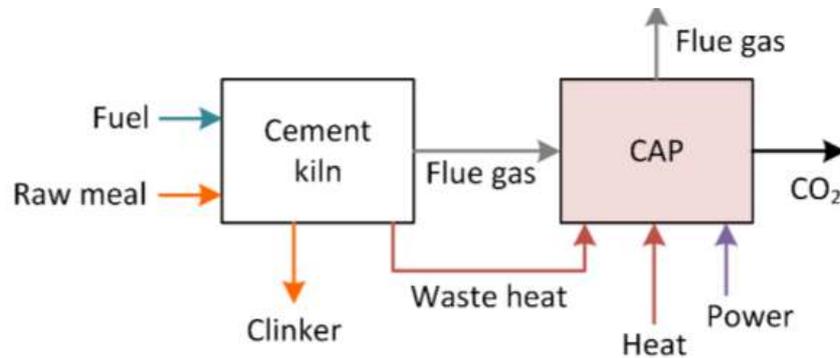


Figura 9.1. Esquema de la integración del CAP en el horno de una cementera. Fuente: D4.6 CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants.

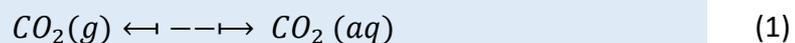
Una de las ventajas que presenta este proceso es que el calor que obtenemos residualmente del horno de clínker de cemento puede ser utilizado de nuevo para cubrir un porcentaje de la demanda de calor que se requiere en este proceso [82].

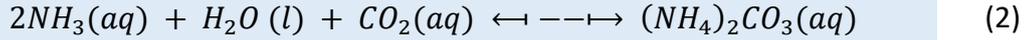
Químicamente el CAP se basa en el sistema que relaciona tres especies principales: NH₃-CO₂-H₂O. Junto a este sistema, el CAP se apoya en dos principios o capacidades que presenta la solución absorbente de amoniaco:

- la capacidad de absorción del dióxido de carbono a unas condiciones de baja temperatura.
- La capacidad de emitir el CO₂ atrapado bajo condiciones moderadas de alta temperatura.

9.1.1. Reacciones químicas del proceso

Las reacciones que se producen en cuanto a la captura de CO₂ son las que abajo se presentan:

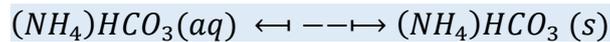




Estas cuatro primeras reacciones pertenecen a la etapa de absorción de CO_2 . Proceso que se realiza en un intervalo de temperaturas entre $0 - 5^\circ C$, el cual permite minimizar sus emisiones respecto al NH_3 . Como puede apreciarse a través de ellas, la combinación de estas tres especies va a dar lugar a la formación de carbonato de amonio (PM 96.04) (2), bicarbonato de amonio (PM 79.05) y (3) carbamato de amonio (PM 78.07).

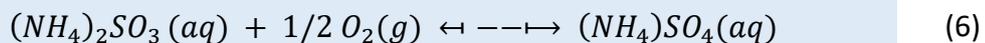
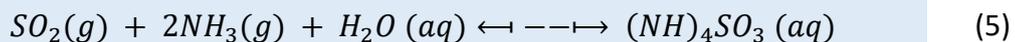
En las reacciones, se puede observar:

- El bicarbonato de amonio, bajo determinadas condiciones en el proceso, podría saturar como una sal cristalina, estable a $50^\circ C$, al ser la sal menos soluble del sistema. Su reacción sería:



- La entalpía de formación del $(NH_4)HCO_3$ es de $-124 \text{ KJ/mol} \sim -30.3 \text{ kcal/mol}$.
- Su descomposición alcanzados los $60^\circ C$ da lugar a la aparición de productos como CO_2 , NH_3 y H_2O .
- Todas ellas son reversibles, dependiendo de la presión, la temperatura y la concentración en el sistema. Por lo que puede decirse que:
 - Comportamiento exotérmico, entalpía $\Delta H < 0$, en sentido de izquierda a derecha, lo que implica una necesidad de eliminar calor para poder mantener la temperatura adecuada requerida para poder realizar la absorción del CO_2 .
 - Comportamiento endotérmico, entalpía $\Delta H > 0$, en sentido inverso, lo que requiere el aporte de energía para obtener los productos que se buscan.

En cuanto a la eliminación de los residuos de SO_2 que puedan quedar como contenido dentro del gas de combustión, cuando éste se encuentra en la fase de limpieza y enfriamiento del CAP, las reacciones químicas que se producen las podemos presentar como siguen [73][81]:



9.1.2. Descripción del proceso

La tecnología CAP se presenta como una alternativa fiable para su implementación en una planta cementera y conseguir una reducción de emisiones de CO₂.

Éste se realiza siguiendo las siguientes secciones:

Sección 1. “Flue gas cooling” Enfriador del gas de combustión.

((1), **Flue gas in**) El gas de combustión procedente de la planta es conducido a un enfriador por contacto directo, DCC por sus siglas en inglés, donde se lleva a cabo un primer enfriamiento hasta temperaturas aproximadas a las de ambiente. Esta reducción en la temperatura es posible por agua refrigerada fluyendo a contracorriente.

El contenido de agua en el gas de combustión debe acercarse a la cantidad de agua contenida en el absorbedor de NH₃ y así poder reducir cualquier acumulación que pueda producirse en la sección de absorción o captura de CO₂, y de esta forma, reducir considerablemente el consumo de energía en el destilador incluido en la sección de recuperación.

La figura 9.2. representa el diagrama de flujo correspondiente a la tecnología CAP aplicable a una planta cementera. A lo largo de la descripción de las diferentes secciones que comprenden ésta y sus características, se ha añadido la numeración correspondiente a cada una de ellas y así poder seguir, situar y entender el diagrama.

El DCC comprende dos distintas secciones de enfriamiento (**Cooling section**), una superior y otra inferior, columnas compactas que operan para minimizar la transferencia de calor entre el flujo de gas cálido y el agua enfriada.

Entre estas dos secciones, se encuentra una intermedia (**SO₂ uptake**), utilizada para la reducción de la concentración de especies, como SO₂, existente en el volumen de gas. Para realizar esta acción se necesita una solución acuosa de amoníaco cargada, parcialmente, con SO₂ operando a unos 40°C. En estas condiciones se llega a reducir hasta menos de 1-2 ppm_v, partiendo de 200 mg/Nm³.

Si no se realizase esta operación en una primera sección, el SO₂ contenido en el gas de combustión llegaría al absorbedor de CO₂ reaccionando con la solución acuosa de amoníaco formando sulfato de amoníaco, (NH₄)₂ SO₄, lo que disminuiría la capacidad de la solución acuosa a captar CO₂. La utilización como absorbente, para la eliminación de SO₂, del amoníaco acuoso diluido, conlleva la generación de sulfato de amonio, producto que puede ser comercializado como fertilizante por sus propiedades.

Sección 2. “CO₂ capture section” Sección de captación de CO₂.

Esta sección representa la parte esencial de la CAP, aquí es donde el CO₂ es atrapado y eliminado del gas de combustión. Esta operación se desarrolla en dos pasos, un primer paso mediante un absorbedor y un segundo paso a través de un desorbedor.

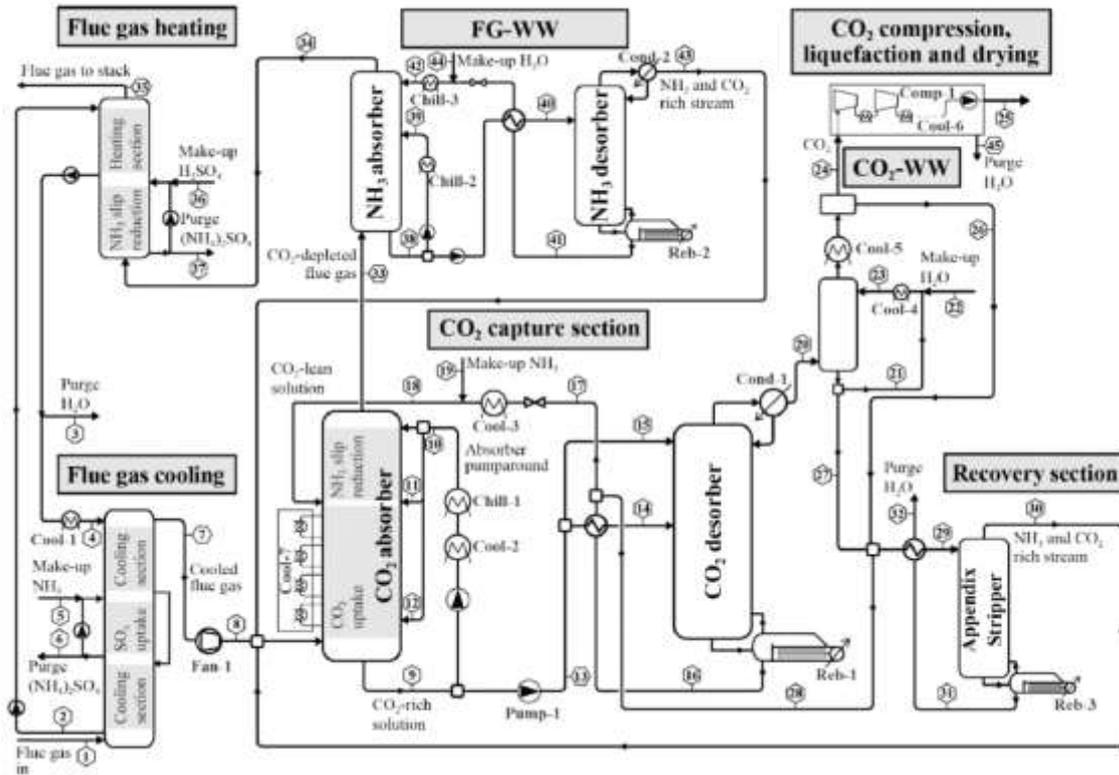


Figura 9.2. Diagrama de flujo del proceso de captura de CO₂ por amoníaco enfriado, CAP. Fuente: CEMCAP. Chilled Ammonia Process (CAP) optimization and comparison with pilot plant tests. 2018

Una vez, la solución rica en CO₂ deja esta sección por el desorbedor, su composición puede mostrar concentraciones en NH₃ entre $4 - 10 \text{ mol}_{NH_3} / \text{kg}_{agua}$ y respecto al CO₂ $0.25 - 0.45 \text{ mol}_{CO_2} / \text{mol}_{NH_3}$.

El gas de combustión refrigerada entra (8) en la parte inferior del absorbedor, (CO₂ absorber) sección de absorción de CO₂, y aquí se traspasa a una solución líquida que fluye a contracorriente hacia la parte baja del captador de CO₂ (CO₂ uptake) y es enfriada mediante agua refrigerada en diferentes etapas (Cool-7) a lo largo de la columna del captador, obteniendo como resultado, tanto una maximización de la capacidad de captación del CO₂, como posibilitar la reducción en las dimensiones de la columna, sobre todo en altura.

((9) – CO₂ rich solution) Justo a la salida del absorbedor por su parte inferior, la solución con contenido en CO₂ es dividida en dos flujos diferentes que reciben un tratamiento diferente, así:

- i. Un primer flujo es enviado hacia la parte superior del absorbedor de CO₂ pasando antes por un Absorbedor por bombeo ((10), Absorber pumparound). Antes de llegar a éste, la corriente es refrigerada en dos tiempos, consiguiendo así minimizar el contenido de NH₃ sin reaccionar al gas.

En esta sección, a consecuencia de la existencia de una presión menor parcial estando el NH₃ en equilibrio con el líquido se conseguirá una concentración menor de NH₃ en la

corriente, empobrecida de CO₂, que abandona el absorbedor de CO₂ por su parte inferior ((9) – **CO₂-rich solution**), siempre y cuando se consigan menores temperaturas y la carga de CO₂ en cada bombeo sea alta. Por lo que, para cada bombeo, con el objetivo de evitar formaciones sólidas en la composición, existe una temperatura mínima.

ii. El segundo flujo frío va hacia una Bomba -1 (**Pump-1**) y es dividido a su vez en dos:

- Una corriente enviada hacia la parte superior del desorbedor de CO₂ (**15**) que no sufre variación alguna de temperatura desde que abandona el absorbedor de CO₂. En estas condiciones, se consigue, por control de temperatura dentro del desorbedor, limitar la concentración de NH₃ en la corriente gaseosa de CO₂ cuando ésta deja el desorbedor por su zona superior (**Cond-1 – (20)**). Esto posibilita la no instalación de un condensador.
- La corriente rica en CO₂ se envía a un intercambiador de calor (**Reb-1 – (16) - (14)**) para introducir calor en ésta antes de que entre en una zona intermedia del desorbedor de CO₂.

Sección 3. “CO₂-WW” Lavado del CO₂ con agua.

En esta sección del proceso, recuperado el CO₂ del desorbedor de CO₂ (**20**), éste es purificado de nuevo mediante el flujo a contracorriente de agua líquida contenida en un enfriador de contacto directo.

Sección 4. “CO₂ compression, liquefaction and drying” Secado, compresión y licuefacción del CO₂.

El gas proveniente de la sección anterior (**24**), purificado, ya puede ser comprimido para su almacenaje. Esta labor debe realizarse bajo cumplimiento estricto de la normativa específica definida en el marco común de la licuefacción de gases.

Sección 5. “FG-WW” Lavado del gas de combustión por agua.

El volumen saliente de gas de combustión empobrecido de CO₂ desde el absorbedor de CO₂ (**33**) aún contiene trazas significantes de NH₃, con valores desde 2000 a 15000 ppm_v. Por esta razón, este volumen necesita ser tratado de nuevo en una nueva unidad de absorción y separación.

La realización de estas tareas conlleva un objetivo concreto: minimizar pérdidas tanto del solvente como del CO₂. Se tiene, por un lado, una corriente saliente desde la parte superior del desorbedor de NH₃, rica en CO₂ y NH₃, y que se dirige de nuevo hacia la parte inferior del absorbedor de CO₂ para su reciclado (**43**). Y por otro lado, tenemos otra saliente desde la parte inferior del desorbedor de NH₃ (**41**), se trata de una corriente líquida compuesta principalmente por agua que, una vez enfriada y refrigerada, alcanza

la parte superior del absorbedor de NH_3 donde se vuelve a realizar un atrapamiento de esta especie para dejar un flujo compuesto por CO_2 .

Antes de entrar en la siguiente sección, ((**26**), (**28**)) es necesario la eliminación de agua para evitar la acumulación de agua dentro del sistema, por lo que se necesita la utilización de una válvula de eliminación o purga desde el circuito principal de absorción-desorción a través de la cual se pueda extraer una parte.

Sección 6. “Recovery Section” Sección de recuperación.

La corriente entrante debe ser tratada para evitar la pérdida de las especies contenidas en la misma como son el NH_3 y el CO_2 (**29**). Este objetivo se debe llevar a cabo mediante un destilador anexo a sistema principal.

De este destilador se va a obtener casi agua pura (**Reb-3**, (**31**)), ésta saldrá por la parte inferior del mismo para ser purgada (**32**).

Por otro lado, en la zona superior de la columna del destilador hay un atrapamiento tanto de CO_2 como de NH_3 (**29**). Resaltar que el porcentaje de captura que se puede obtener del amoníaco en esta sección puede alcanzar el 99,8%.

Este flujo superior es reconducido hacia la parte inferior del absorbedor de CO_2 (**30**) minimizando así la composición de la solución fresca de amoníaco.

Sección 7. “Flue gas heating section” Unidad de calefacción del gas de combustión.

El flujo ((**33**) – **CO₂-depleted flue gas**) de gas de combustión con contenido en CO_2 y trazas de amoníaco abandona el absorbedor de NH_3 por su zona superior (**34**) dirigiéndose hacia el último tratamiento antes de su almacenaje. Se hace pasar este flujo a través de una columna de lavado ácida para eliminar completamente el amoníaco.

Para realizar esta tarea se utiliza una solución acuosa de ácido sulfúrico, H_2SO_4 , con un pH aproximado de 3 (**36**). Su uso conlleva la reacción de formación de sulfato de amonio, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, (**37**) producto que puede ser comercializado como producto secundario.

En la columna de esta sección nos encontramos por un lado una parte de NH_3 sin reaccionar (**NH₃ slip reduction**) que incluye como equipamiento un tratamiento de sólidos en la cubeta de la columna. La otra sección de columna incluye una sección de calefacción (**Heating section**). Esta segunda sección es necesaria para incrementar la temperatura del efluente para su final almacenamiento (**35**).

9.2. Caso estudio: aplicación a planta cementera

9.2.1. CAP adaptado a una planta de cemento

La vasta experiencia de la aplicación de la CAP a las centrales eléctricas de carbón apoyó la adaptación del proceso a los gases de combustión de las plantas de cemento.

Las condiciones de funcionamiento se han adaptado inicialmente de forma manual, partiendo del funcionamiento típico del CAP para gases de combustión de centrales eléctricas de carbón (aprox. 15% de CO₂) y aplicando reglas básicas de diseño.

Como resultado, se pudo identificar un conjunto de condiciones operativas que permite un funcionamiento robusto de la PAC con los gases de combustión de la planta de cemento y, al mismo tiempo, alcanzar ratios energéticos competitivos.

La figura 9.3. muestra el esquema de un horno de cemento con la incorporación del absorbedor y desorbedor para la realización de la captura de CO₂ mediante amoníaco refrigerado.

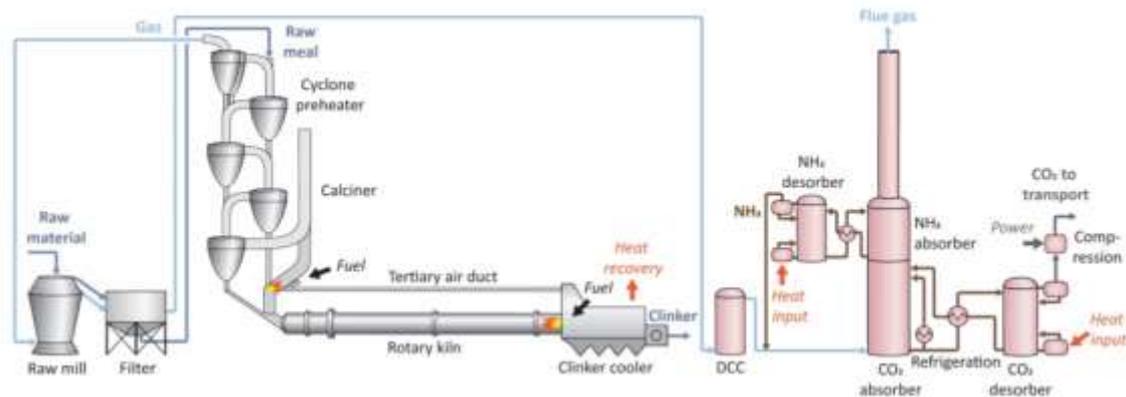


Figura 9.3. Esquema referencia de un horno de planta cementera con la incorporación de captura de CO₂ mediante CAP. Fuente: D4.6 CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants.

Las principales diferencias entre los componentes de un gas de combustión típico de una planta de cemento y una planta de energía se resumen en la Tabla 9.1. La concentración de CO₂, que tiene una gran influencia en la CAP, es mayor en los gases de combustión del cemento en comparación con la energía. Además, la concentración de SO₂ en los gases de combustión es diferente, pero la principal diferencia, que debe abordarse en el caso del cemento en comparación con la energía, es la mayor concentración de CO₂.

Hasta el momento han sido varias las experiencias que se han reportado sobre la tecnología CAP aplicada a la industria cementera. He de destacar la planta piloto Våxjö (Suecia) que se diseñó principalmente para evaluar la eficiencia de captura en el absorbedor de CO₂, pero también incluye un lavado con agua, un regenerador, un

separador de NH₃ y un lavado con ácido. está diseñado para poder imitar cualquier parte de la columna de absorción en el proceso de amoníaco refrigerado.

Abajo, seguida de la tabla 9.1. se muestra la Figura 9.4. puede verse un diagrama de flujo principal de un CAP conectado a una planta de cemento.

COMPONENTES	VALORES en PLANTA	
	CEMENTO	ENERGÍA
CO ₂	14 - 35 vol%	10 - 12 vol%
O ₂	5 - 14 %	4 - 8 %
H ₂ O	13 - 23 %	
S ₂ O	140 - 300 mg/m ³ (stp)	1000 - 3000 mg/m ³
S ₂ O con FGD		100 - 200 mg/m ³
HCl	4 mg/m ³ (stp)	25 mg/m ³ (stp)
NO _x (sin SNCR)	800 mg/m ³ (stp)	
NO _x (con SNCR SCR en energía)	340 mg/m ³ (stp)	
CO	1000 mg/m ³ (stp)	1000 mg/m ³ (stp)
Partículas de polvo	5 mg/m ³ (stp)	5 mg/m ³ (stp)
Temperatura	90 - 180 °C	60 - 180 °C

Tabla 9.1. Tabla comparativa de especificaciones para una planta cementera frente a una planta de energía. Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

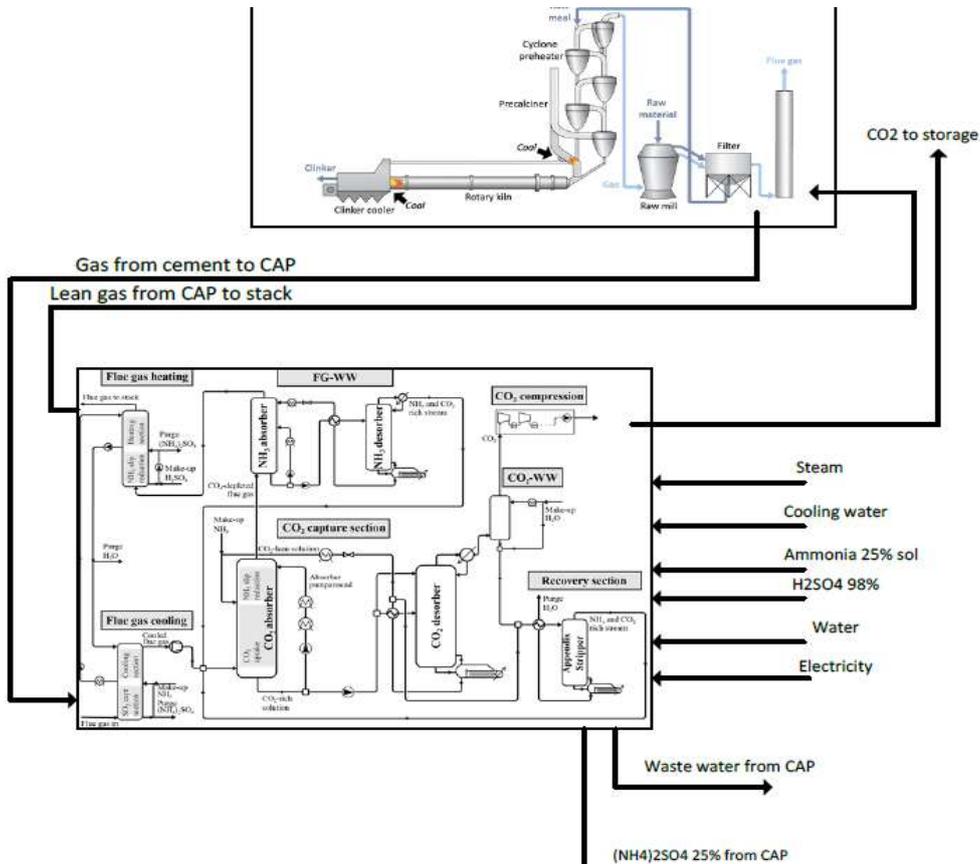


Figura 9.4. Diagrama de flujo principal de la tecnología CAP acoplada a una planta cementera.

En el proceso industrial a gran escala, la columna de absorción de CO₂ reduce el contenido de CO₂ en el gas de combustión desde aproximadamente 20-30% en volumen hasta 2-3% en volumen.

La Tabla 5 informa los números de consumo de una unidad CAP conectada a una planta de cemento de referencia cuya producción se sitúa en 3000 toneladas al día de clínker. Los valores de referencia han sido tomados del trabajo de ETHZs en D10.3 [3].

	CONSUMOS	UNIDADES
GASES DE PROCESO DE PLANTA CEMENTERA	TEMPERATURA	130 °C
	GAS de EMISIÓN (flujo másico)	316.800 K
	GAS de EMISIÓN (Fujo volumétrico)	233.200 Nm ³ /h
	CO ₂	22 % v/v
	CO ₂	101 ton/h
	SO ₂	70 ppm
	SO ₂	46 Kg/h
SUMINISTROS PARA CAP	Presión de vapor	8 bar
	Flujo de vapor	95.000 Kg/h
	Energía de vapor	54 MW
	Flujo de agua de refrigeración	4.600 m ³ /h
	Energía de agua de refrigeración	54 MW
	H ₂ O de reposición	250 Kg/h
	NH ₃ de reposición	180 Kg/h al 25 %
H ₂ SO ₄ de reposición	40 Kg/h al 98 %	
GASES de PROCESO del CAP	TEMPERATURA	47 °C
	GAS de EMISIÓN (flujo másico)	223.200 Kg/h
	GAS de EMISIÓN (Fujo volumétrico)	182.300 Nm ³ /h
	CO ₂	3.4 % v/v
	CO ₂	12.2 ton/h
	SO ₂	0 ppm
	SO ₂	0 Kg/h
CO₂ de ALMACENAJE	GAS de EMISIÓN (flujo másico)	88.5 ton/h
	Presión	20 bar
FLUJOS RESIDUALES	Agua de DDC	4.000 Kg/h
	Agua del CAP	250 Kg/h
	(NH ₄) ₂ SO ₄	580 Kg/h al 25 %

Tabla 9.2. Tabla de consumos para CAP conectado a planta de referencia de cemento.
Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

Como puede verse en la tabla anterior el caudal de CO₂ se reduce de 101 t/h a 12,2 t/h en la salida del proceso de CAP (que vuelve al sistema de calcinación para usarse como fuente de calentamiento de otros procesos) y de 88,5 t/h a 20 bares que es el flujo que puede ir a las siguientes etapas del CCS (transporte y almacenamiento).

9.2.2. Planta de referencia

Como planta cementera de referencia vamos a tomar una que se encuentra en funcionamiento, cuya instalación para el proceso de fabricación de cemento cuenta con un horno por vía seca, un precalentador ciclónico de cinco etapas, un calcinador con tuberías de aire terciario, horno rotatorio y enfriador de parrilla .

Su capacidad de producción es de 3.000 toneladas de clínker al día, cantidad que correspondería aproximadamente a 0.63 Mt clínker al año o 0.6 Mt de cemento al año, trabajando de media 330 días al año.

Las características o parámetros que hemos tomado de nuestra planta cementera de referencia se presentan en la tabla 9.3.

PARÁMETROS	VALOR
Producción de clínker	3.000 t _{clik} /d
Factor clínker/cemento	0.74
Factor material primario/clínker	1.6
Emisiones específicas de CO ₂	850 kg _{CO2} /t _{clik}
Consumo específico de energía eléctrica	105.6 kWh/t _{cemento} / 132 kWh/t _{cemento}

Tabla 9.3. Tabla representativa de los valores correspondientes a los parámetros de la planta cementera de referencia para el estudio. Elaboración propia.

La tabla 9.4. muestra las características principales de los gases de combustión en diferentes etapas del proceso.

	Ventilador de tiro inducido	Ventilador de molienda de materia prima	ventilador Unidad filtro	Ventiladores de los refrigeradores	Molienda y manipulación del carbón	Otros (trituration de la materia prima y clínker, accionamiento del horno, iluminación, etc.)	Total
Caudal (Nm ³ /h)	162.564	293.512	439.355	232.323			
Temperatura gases (°C)	314	110	90	15			
Energía (kWh/t _{clik})	6.40	12.70	3.03	1.52	5.81	102.14	132

Tabla 9.4. Tabla de valores de las principales características de los diferentes gases de combustión existentes en el proceso en diferentes etapas del proceso CAP. Elaboración propia.

La composición de este gas de combustión se ve en gran medida afectada por las fugas de aire en el sistema, especialmente en el molino de crudo. En este trabajo se consideran unas condiciones de fuga de aire media, para las cuales se estiman los costos de capital.

Además, el CO₂ evitado de los gases de combustión de la planta de cemento debería ser lo más cercano al 90% como sea posible.

La tabla 9.5 muestra las especificaciones de los gases de combustión en la entrada del CAP [83] para un caudal definido por fugas de aire media. Un aumento de la fuga de aire en el proceso de fabricación de cemento conduce a un mayor caudal de gas de combustión a tratar en el CAP, que contiene un menor contenido de CO₂. La tasa de entrada de aire definida se ha supuesto el doble que la de una planta de cemento de referencia con la mejor tecnología disponible (MTD).

		VALORES (pérdida a aire medio)	UNIDADES
VARIABLES	RANGO de FLUJO en PÉRDIDAS de AIRE en molienda	139.806	Kg/h
	RANGO de FLUJO total	388.098	Kg/h
	Temperatura	110	°C
	En base húmeda, Composición de fases del gas		
	CO ₂	18	vol %
	Aire	73	vol %
	H ₂ O	9	vol %

Tabla 9.5. Tabla de especificaciones de los gases de combustión que llegan al CAP.
Elaboración propia.

10. Evaluación técnica-medioambiental y económica

Una vez presentada la tecnología de postcombustión CAP en una planta cementera es necesario evaluar su implementación desde varios puntos de vista: técnico, ambiental y económicamente.

La evaluación de la tecnología CAP la vamos a realizar a través del estudio de varios indicadores KPIs. Estos indicadores de rendimiento, tanto energéticos como ambientales y económicos, nos facilitarán la tarea de valorar nuestro objetivo en la planta cementera, la eficacia del CAP en cuanto a minimizar las emisiones GEI a la atmósfera por atrapamiento de CO₂ durante el proceso de fabricación del cemento.

10.1. Indicadores ambientales

Con estos parámetros, cuya expresión es porcentual, vamos a valorar el nivel de rendimiento del CAP, con objetivo de poder sacar conclusiones en cuanto a la eficacia de la tecnología en lograr la captura de CO₂. Los indicadores seleccionados son los siguientes:

- Relación **de captura de CO₂, CCR** por sus siglas en inglés, este estimador refleja la cantidad de CO₂ capturado respecto a la cantidad de CO₂ generado:

$$CCR = \frac{\dot{m}_{CO_2,capt}}{\dot{m}_{CO_2,gen}}$$

Definimos estos flujos:

$\dot{m}_{CO_2,capt}$: flujo que representa la totalidad del CO₂ capturado. Respecto al origen del CO₂, no existe una distinción si éste es originado en el proceso de fabricación del cemento o bien proviene de alguna combustión adicional de combustible.

$\dot{m}_{CO_2,gen}$: flujo que representa el CO₂ que ha sido generado tanto en el de cemento como internamente en el proceso de producción por la combustión de combustible, pero en este indicador no queda reflejado ni el CO₂ generado en las calderas de gas natural ni aquel producido indirectamente por el consumo de energía.

- El CO₂ **equivalente evitado, AC_{eq}** por sus siglas en inglés, en este caso, el estimador evalúa las emisiones totales equivalentes de CO₂ evitadas en la planta. En estas emisiones se tiene en cuenta tanto las emisiones directas como las indirectas asociadas al consumo y generación de energía eléctrica. De esta manera, queda como sigue:

$$AC_{eq} = \frac{e_{clk,eq,ref} - e_{clk,eq}}{e_{clk,eq,ref}}$$

donde:

$e_{clk,eq,ref}$: representa el equivalente específico de las emisiones generadas del horno referencia.

$e_{clk,eq}$: representa el equivalente específico de las emisiones procedentes del horno donde se realiza la captura.

A su vez, el equivalente de emisiones, $e_{clk,eq}$ se calcula como la suma de las emisiones directas, reflejadas como e_{clk} y las indirectas $e_{el,clk}$.

$$e_{clk,eq} = e_{clk} + e_{el,clk}$$

En el caso del equivalente de CO₂ evitado se tiene que tomar en cuenta todas las emisiones, sean directas e indirectas. Este indicador aporta la mejor indicación respecto a la reducción global de las emisiones de CO₂ desde el horno de cemento en el caso de haber sido implementada una tecnología de captura. También permite realizar una comparativa justa de diferentes tecnologías.

- El consumo específico de energía primaria para el CO₂ evitado, *SPECCA*, por sus siglas en inglés, valora la energía primaria necesaria para evitar las emisiones de CO₂ a la atmósfera.
- Este indicador está definido como un cociente, cuyo numerador se obtiene por diferencia respecto al consumo equivalente de energía primaria de una planta cementera con captura de CO₂ respecto a otra sin captura. El denominador se obtiene también por diferencia en emisiones equivalentes entre una planta con captura y otra sin ella.

$$SPECCA = \frac{q_{clk,eq} - q_{clk,eq,ref}}{e_{clk,eq,ref} - e_{clk,eq}}$$

La siguiente ecuación determina el consumo específico equivalente de energía primaria se obtiene por suma del consumo específico de energía primaria directo, (q_{clk}) e indirecto ($q_{el,clk}$):

$$q_{clk,eq} = q_{clk} + q_{el,clk}$$

El consumo específico directo de energía primaria es la cantidad de energía (LHV) en forma de combustible (gas natural o carbón) que se necesita para la obtención de una tonelada de clínker y es calculado como:

$$q_{clk} = \frac{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV_{fuel}}{\dot{m}_{clk}}$$

El consumo específico indirecto de energía primaria es la cantidad de energía consumida debido a la generación de la potencia necesaria para la obtención de una tonelada de clínker. Se obtiene mediante:

$$q_{el,clk} = \frac{P_{el,clk}}{\eta_{el}}$$

De esta igualdad, denominamos:

η_{el} como la eficiencia en la generación de electricidad, la cual depende, en gran medida, del mix energético considerado.

El índice de captura de CO₂ (CCR), el CO₂ evitado de los gases de combustión, el CO₂ evitado y los indicadores de CO₂ evitado equivalente evalúan el efecto que tiene la implementación de una tecnología CAP se muestran en la Tabla 10.1.

	VALORES CAP
Rango de captura de CO ₂ (CCR)	90 %
CO ₂ evitado del gas de combustión (AC _{fg})	90 %
CO ₂ evitado (AC)	78 %
Equivalente de CO ₂ evitado (AC _{eq})	73 %

Tabla 10.1. Tabla de valores respectivos a los indicadores relacionados con la tecnología CAP. Elaboración propia.

Para la tecnología CAP el CO₂ evitado de los gases de combustión es por definición igual al parámetro CCR, ya que no hay cambio en la combustión interna del combustible que genera CO₂ dentro del horno o el proceso de captura cuando se instalan estas tecnologías.

La proporción de CO₂ evitado es el 78%. En este KPI se tienen en cuenta las emisiones indirectas relacionadas con el consumo o generación de energía, y se reduce el CO₂ equivalente evitado frente al CO₂ evitado para tecnologías que consumen energía, y se incrementa para tecnologías que generan energía.

El consumo de energía primaria específico para CO₂ evitado (SPECCA) se define como el mayor consumo de energía primaria equivalente por CO₂ equivalente evitado, y este indicador se puede utilizar para comparar el consumo de energía de diferentes tecnologías. El caso base SPECCA para la tecnología de referencia y la CAP se muestra en la tabla 10.2.

Para el proceso de amoníaco refrigerado (CAP), el consumo de vapor constituye la mayor parte del consumo de energía primaria y se evita la reducción del CO₂ equivalente. El consumo de vapor representa alrededor de las tres cuartas partes de estos valores, mientras que el consumo de energía eléctrica es responsable del resto. Debido a eso, si adicionalmente puede importarse vapor de una planta de cogeneración para ser utilizado en las calderas de la CAP, el índice SPECCA disminuiría en un 38% con respecto al caso Base, donde el vapor se produce en un GN in situ., obteniendo un SPECCA mínimo promedio anual de 2.29 MJLHV/kgCO₂avoided, frente al 3,75 MJLHV / kgCO₂ [83].

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

	CAP
Consumo de carbón	0
Consumo de vapor (Calentador NG)	1859
Consumo de energía eléctrica	542
Generación de energía eléctrica	0
CONSUMO EQUIVALENTE ESPECÍFICO AÑADIDO A ENERGIA PRIMARIA (MJ_{LHV}/t_{clk})	2401
<hr/>	
Horno de cemento hacia el almacenaje	762
Consumo de vapor (Calentador NG)	-104
Consumo de energía eléctrica	- 18
Generación de energía eléctrica	0
EQUIVALENTE ESPECÍFICO de CO₂ EVITADO (Kg_{co2}/t_{CLK})	640
<hr/>	
SPECCA (MJ_{LHV}/Kg_{CO2})	3.75

Tabla 10.2. Tabla de los valores correspondientes al caso base SPECCA para la tecnología de referencia y la CAP
Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

10.2. Indicador económico

Las herramientas económicas que vamos a contar en este apartado caracterizan el rendimiento económico a través de costes, los del clinker y del CO₂ evitado. Definimos estos costes como [83]:

- **Coste de clinker, COC**, por sus siglas en inglés. Este coste se obtiene mediante suma de diferentes vectores y su expresión se escribe:

$$COC = +C_{RM} + C_{fuel} + C_{el} + C_{O\&M} + C_{cap}$$

Donde:

C_{RM} : Costes de materia prima.

C_{fuel} : Costes del combustible.

C_{el} : Costes de electricidad.

$C_{O\&M}$: Costes de operación y mantenimiento.

C_{cap} : Costes de capital, los cuales son transformados en un flujo anual constante cuya anualización se realiza mediante un factor de carga.

- **Coste del CO₂ evitado, CAC** por sus siglas en inglés. Este coste relaciona el coste de clinker con el equivalente específico de emisiones de la planta

cementera en estudio, ambos respecto a la planta referencia sin captura de CO₂. Su expresión es la siguiente:

$$CAC = \frac{COC - COC_{ref}}{e_{clk,eq,ref} - e_{clk,eq}}$$

La tabla 10.3. incluye los costes considerados para realizar el estudio económico, siendo los siguientes:

COSTES GENERALES	Costes generales	2014 €
	Factor de capacidad de planta (%)	91,3
	Tipo impositivo (%)	0
	Vida operativa (años)	25
	Tiempo de construcción, horno de cemento (años)	2
	Tiempo de construcción, planta de captura (años)	3
	Tipo de inflación (%)	0
	Tipo de descuento de los flujos de caja (%)	8
INVERSIONES	Costes indirectos (% Costes Totales Directos, TDC, por sus siglas en inglés)	14
	Financiación propietarios (% Costes Totales Directos)	7
GASTOS CORRIENTES	Costes de materia prima (€/t _{clk})	5
	Precio del gas natural (€/GJ _{LHV})	6
	Precio de electricidad (€/MWh)	58.1
	Coste del vapor producido de los calentadores de gas natural (€/MWh)	25.3
	Coste del vapor producido de planta cementera con pérdida de calor (€/MWh)	8.5
	Coste de agua de refrigeración (€/t _{CO2})	0.39
	Coste de agua de proceso (€/m ³)	6.65
	Costes del amoniaco como solvente (€/t)	406
	Ácido sulfúrico €/t)	46
	Otros costes variables de Operación y mantenimiento, O&M, por sus siglas en inglés. (€/t _{clk})	1.09
	Impuestos Seguros y alquileres (% TPC, Costes totales de proyecto, Total Project Cost)	2
	Costes de mantenimiento (incluye costes de personal de mantenimiento (% TPC)	2.5
	Coste laboral por trabajador (k€/año)	60
	Coste de personal de mantenimiento (% del coste total de mantenimiento)	40
	Coste de personal administrativo (% del O&M)	30

Tabla 10.3. Tabla representativa con los costes asociados a la tecnología CAP para poder realizar el estudio económico de ésta. Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

Presentadas las tablas con los costes y estimadores necesarios para el estudio de viabilidad para la implementación de una CAP en nuestra planta cementera, los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

La tabla 10.4., como puede verse, presenta la comparativa entre los valores que corresponden a una planta cementera sin utilización de la tecnología CAP frente a los números que se asocian a aquella con utilización de CAP.

DATOS ECONÓMICOS DE PLANTA REFERENCIA

	sin CAP	con CAP
Coste variable directo (€/tclk)	22,0	39,5
Materia prima	5,0	5,0
Combustibles	8,2	8,2
Electricidad	7,7	11,7
Vapor		12,1
Recuperación de agua refrigerada		0,6
Recuperación de agua de procesos		0,1
Recuperación de amoniaco (i. ácido sulf.)		0,7
Otros costes variables	1,1	1,1
Costes fijos directos (€/tclk)	18,2	27,3
Trabajos de operación, administrativo y de soporte	8,7	10,8
Impuestos y seguros	4,2	7,3
Costes de mantenimiento (incluidos las labores de mantenimiento)	5,3	9,2
Costes directos Totales (€/tclk)	40,2	66,8
Costes indirectos (14% sobre coste fijo directo)	2,5	3,8
Costes de amortización (7% sobre coste fijo directo)	1,3	1,9
Costes Totales de clínker (€/tclk)	44,0	72,6
Costes Totales de cemento (€/tclk)	32,6	53,7

Tabla 10.4. Tabla comparativa de los valores económicos respecto a la planta de referencia sin CAP y con CAP.
Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, el cálculo de las variaciones porcentuales en las principales partidas de la planta, el cual se muestra en la tabla 10.5, y es a partir de ésta cuando podemos comenzar a sacar conclusiones respecto a la implementación de la CAP en una planta cementera.

En un primer momento, lo más llamativo es que las variaciones obtenidas son positivas, lo que nos indica un aumento de los costes como era evidente. Este aumento se produce por la introducción del módulo de la CAP en el proceso productivo. Este módulo, como ya se ha visto, incluye todos aquellos necesarios accesorios como los

DATOS ECONÓMICOS DE PLANTA REFERENCIA			
	sin CAP	con CAP	PORCENTAJES
Coste variable directo (€/tclk)	22	39,5	79,55%
Materia prima	5	5	
Combustibles	8,2	8,2	
Electricidad	7,7	11,7	51,95%
Vapor		12,1	
Recuperación de agua refrigerada		0,6	
Recuperación de agua de procesos		0,1	
Recuperación de amoniaco (i. ácido sulf.)		0,7	
Otros costes variables	1,1	1,1	
Costes fijos directos (€/tclk)	18,2	27,3	50,00%
Trabajos de operación, administrativo y de soporte	8,7	10,8	24,14%
Impuestos y seguros	4,2	7,3	73,81%
Costes de mantenimiento (incluidos las labores de mantenimiento)	5,3	9,2	73,58%
Costes directos Totales (€/tclk)	40,2	66,8	66,17%
Costes indirectos (14% sobre coste fijo directo)	2,5	3,8	52,00%
Costes de amortización (7% sobre coste fijo directo)	1,3	1,9	46,15%
Costes Totales de clínker (€/tclk)	44	72,6	65,00%
Costes Totales de cemento (€/tclk)	32,6	53,7	64,72%

Tabla 10.5. Tabla de comparativa de costes en valores absolutos y porcentuales para una planta de producción sin aplicación de CAP y otra con aplicación CAP. Fuente Elaboración propia.

absorbedores, desorbedores, contenedores de almacenaje y lavado, sistemas de tuberías, maquinaria, etc., con los cuales se puede realizar el proceso de atrapamiento de CO₂ durante la producción del clínker en postcombustión.

Fijándonos ya en el caso de la implementación de la tecnología CAP, y analizando por partidas de costes, podemos realizar diferentes observaciones:

- Respecto a costes variables directos:

Las partidas que no sufren ninguna alteración son la materia prima, los combustibles y otros costes variables asociados que puedan aparecer durante la producción. Por el contrario, la partida más sensible a la CAP es la Electricidad, aumento más que justificado debido a la presencia de elementos nuevos en la instalación de producción, los cuales necesitan suministro eléctrico para su funcionamiento.

En este apartado de costes variables aparecen partidas nuevas que con anterioridad en la planta sin CAP no tenían presencia. Estos costes están asociados al Vapor, y a la recuperación tanto de los sorbentes como de los absorbentes, es el caso de las aguas de refrigeración y de procesos y al amoniaco.

Dentro de las nuevas partidas, la más relevante es el Vapor debido a la importancia de su utilización para llevar a cabo la regeneración del disolvente.

- Respecto a los costes fijos directos:

Puede verse, la implementación del módulo de CAP conlleva un aumento en el coste de consumos, pero que también repercute sobre todo en la partida de impuestos y seguros, así como también en la de costes de mantenimiento.

Como consecuencia del aumento de los costes fijos provocado por la implementación de la tecnología CAP se origina un incremento de los costes indirectos y de amortización, ya que éstos representan un porcentaje de los anteriores.

- Respecto a las partidas de costes totales de clínker y cemento:

Como se puede apreciar en la tabla, el aumento repercute directamente en el coste total de producción tanto de clínker como de cemento. Siendo dicho aumento en el coste de producción unitaria de cemento un 67% respecto al coste sin la tecnología CAP. No obstante, hasta este punto del TFG no se ha tenido en cuenta el coste de la emisión asociada de CO₂ del cemento producido y, cuyo ahorro, es la base de la rentabilidad.

Por lo tanto, se espera que este aumento de coste se compense con el ahorro que se produzca al poder evitar los costes de CO₂ que se emite a la atmósfera durante la producción de clínker/cemento en la planta sin la tecnología CAP.

Para la estimación del ahorro del CO₂ se recurre a un análisis de sensibilidades, ya que el coste de este input varía de un periodo u otro, como puede verse en la figura 10.1.

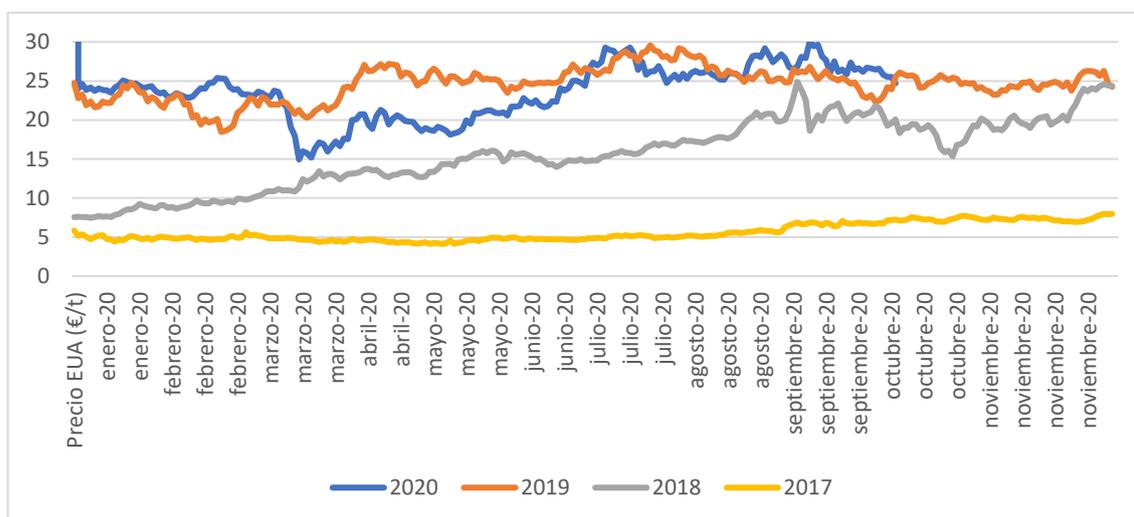


Figura 10.1. Gráfico de la evolución del precio de emisión de CO₂ (EUA). Fuente: Sendeco

Tal como regula el RD 137/2006 y posteriores modificaciones, para el periodo actual 2013-2020, a cada emisor identificado se le asigna una cuota gratuita de emisión de CO₂ (denominado derechos de emisión), si la instalación no emite la cantidad que tiene asignada existe la posibilidad de vender sus derechos del CO₂ o comprar si necesita más derechos por haber consumido su asignación en el mercado EUA.

Durante este año debido a la tensión de oferta y demanda el precio ha fluctuado entre los valores c 24-27 €/t EUA. La evolución del precio del EUA en el marco de la Unión Europea se puede ver en la figura 10.1.

Respecto a la media de 5 €/ t de CO₂ del año 2016, en los años 2017 y 2018 hubo un gran ascenso de precios, 15 y 24€/t, respectivamente. En el último año el precio del derecho EUA se ha visto incrementado respecto a los años anteriores hasta los 27,5€/ t de septiembre del 2020. Esto se debe, por un lado, a una política de reducciones de la asignación gratuita de derechos EUA y , por otro, a una demanda superior a la oferta hoy en día. A partir del año 2021 se abre un nuevo periodo de asignación con otra metodología más estricta, por lo que se estima que el precio del EUA ascienda aún más. Los precios del carbono de la UE se duplicarán para 2021 y podrían cuadruplicarse a 55 euros por tonelada si la Comisión Europea finalmente legisla para alinear los objetivos de emisiones actuales del bloque con el acuerdo climático de París, según un nuevo informe de Carbon Tracker [84].

Por este motivo, en este TFG se va a realizar una estimación de 4 casos diferentes en función del precio del CO₂

- CASO A: 27 €/t de CO₂
- CASO B: 35 €/t de CO₂
- CASO C: 50 €/t de CO₂
- CASO D: 60 €/t de CO₂

En la tabla 10.6. se muestra el resultado obtenido de la instalación de una tecnología CAP en una planta de cemento considerando el precio del derecho de CO₂ EUA y la ratio de emisión de CO₂ por tonelada de clínker producido, que es 0,85 t_{CO2} / t_{clínker}:

ESCENARIOS	PRECIOS (€/t)	Solo coste CO ₂ (€ de CO ₂ / t _{clínker})	Coste producción clínker con CO ₂ (€/ t _{clínker})	Coste producción cemento con CO ₂ (€/ t _{cemento})
A	27	23,0	67,0	49,6
B	35	29,8	73,8	54,6
C	50	42,5	86,5	64,0
D	60	51,0	95,0	70,3

Tabla 10.6. Tabla de costes económicos unitarios del cemento sin CAP, considerando el estudio de sensibilidad del precio de CO₂. Fuente. Elaboración propia.

Como se puede ver, el proyecto de instalación de una tecnología CAP en una planta cementera de referencia empieza a ser rentable con precios de CO₂ (EUA) de 35€/t o superior (ver Tabla 10.7). Es decir que para una planta tipo de 600.000 t de cemento anuales con CAP los ahorros económicos serían los presentados en esa misma tabla.

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA CEMENTERA

ESCENARIOS	PRECIO (€/t)	Coste producción cemento sin CAP y con CO ₂ (€/t cemento)	Coste producción cemento con CAP y con CO ₂ (€/t cemento)	Ahorro por unidad de cemento producida (€/t cemento)	Ahorro anual (para una producción 600.000 t de cemento)
A	27	49,6	53,7	-4,1	- 2.484.432 €
B	35	54,6		0,9	534.768 €
C	50	64,0		10,3	6.195.768 €
D	60	70,3		16,6	9.969.768 €

Tabla 10.7. Tabla representativa del ahorro anual para una planta cementera con CAP comparando con una planta de referencia sin CAP y considerando el estudio de sensibilidad del precio de CO₂. Fuente: Elaboración propia.

Así, para un periodo de un año el ahorro podría llegar a ser entre 0,5 M€ y 10 M€ con un rango de precios del derecho EUA entre 35 y 60 € anuales como puede verse en la figura 10.2.

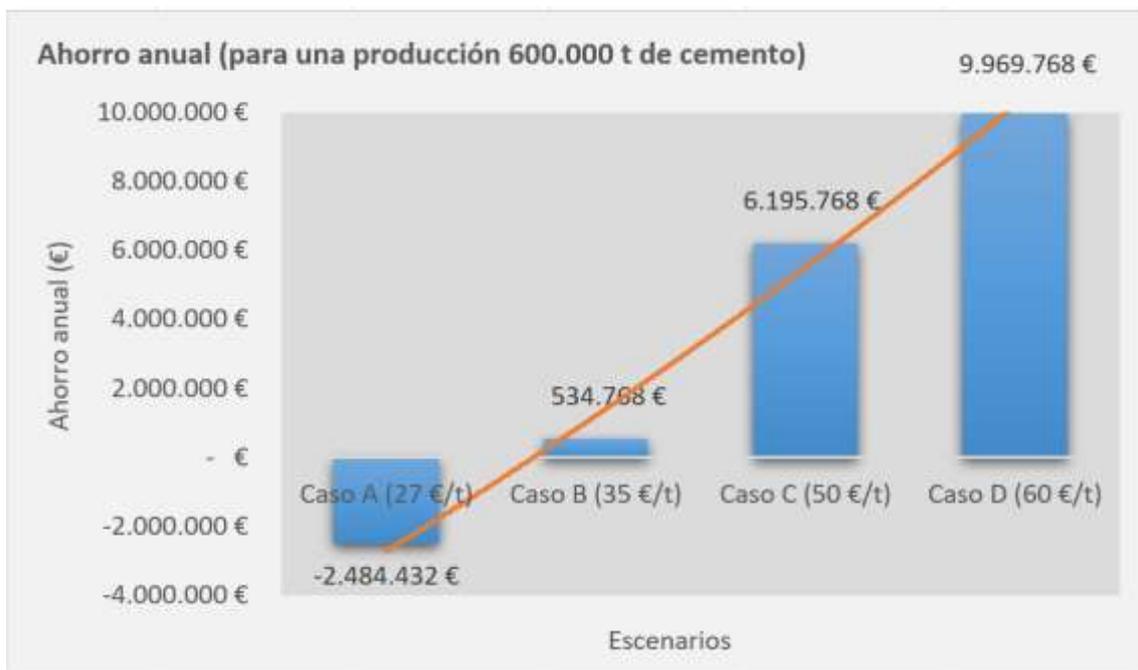


Figura 10.2. Gráfico del Ahorro anual, según los diferentes escenarios económicos estudiados, para una planta cementera con producción anual de 600.000 t de cemento. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, desde el punto de vista medioambiental se evitaría emitir a la atmósfera 510.000 t de CO₂, principal gas de efecto invernadero.

11. Conclusiones

En resumen, este TFG muestra que la instalación de una tecnología CAC en una planta de referencia de cemento, en concreto la denominada CAP, captura en postcombustión con amoníaco enfriado, puede adaptarse muy bien a los gases de combustión de la planta de cemento sin requerir cambios en el esquema de flujo del proceso básico, es posible aprovechar las altas concentraciones de CO₂ en el gas de combustión de la planta de cemento y lograr una separación de CO₂ eficaz.

Se ha realizado una evaluación técnica, económica y medioambiental de la tecnología CAC, en concreto de la denominada CAP, captura en postcombustión con amoníaco enfriado, aplicadas a un horno de cemento de referencia. Se han calculado indicadores clave de rendimiento, como el equivalente de CO₂ evitado, el consumo específico de energía primaria (SPECCEA,) el coste del clínker (COC) y el coste del CO₂ evitado.

La evaluación muestra que la aplicación de la tecnología CAP supone una ventaja no solo respecto al consumo específico de energía primaria, sino también en cuanto al coste total de producción de clínker si se considera un precio de CO₂ igual o superior a 35 €/t.

El costo del clínker aumenta en un 65% cuando la tecnología CAP se implementa en la planta de cemento de referencia en las condiciones del caso base. El coste del CO₂ evitado se sitúa, por tanto, en 28,5 €/t_{CO2} sin contar con los procesos subsiguientes de transporte y almacenamiento intermedio (si lo hubiera) y final.

Los cálculos de los KPIs se basan en supuestos relacionados con el precio de la electricidad, el precio del combustible, la fuente de vapor, etc. Además, se realiza un análisis de sensibilidad del impuesto a la emisión de CO₂ en el marco de la comercialización de derechos en Europa (EUA) que se basa en las estimaciones y la actualidad del precio de EUA, pero se puede afirmar que a partir de un valor de CO₂ de 35€/t o superior el proyecto arrojaría ahorros anuales que a medida que ascienda el precio de CO₂ serían cada vez más altos.

Además de los parámetros tecno-económicos típicos como el consumo específico de energía primaria, el coste del clínker y el coste del CO₂ evitado, cabe mencionar que existen otros aspectos que son importantes para la evaluación e implementación práctica de esta tecnología para la captura de CO₂ en una planta cementera. Las propiedades importantes son la madurez de la tecnología, la integración con el proceso de combustión del clínker y los posibles efectos sobre la calidad del producto (y por lo tanto el riesgo), los requisitos de espacio, la necesidad de energía o gas natural, etc.

Las tecnologías de captura de CO₂ basadas en la absorción, como la CAP, dependen en gran medida del suministro de vapor al proceso de captura para la regeneración del disolvente. Por tanto, la opción de generación de vapor tiene un impacto considerable en la economía del proceso y en la cantidad total de CO₂ evitado siendo su principal desventaja.

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI A TRAVÉS DEL USO DE TECNOLOGÍA CAC EN UNA PLANTA
CEMENTERA

La evaluación que se presenta aquí se realiza para su aplicación a un horno de cemento de referencia con la mejor tecnología disponible, pero debe tenerse en cuenta que las plantas de cemento varían en general significativamente entre sí, por ejemplo, en lo que respecta a la concentración de CO₂ en el gas de combustión.

12. Bibliografía y Referencias

[1] García Labiano, F, Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC). Rubiera, Fernando, Instituto Nacional del Carbón (INCAR-CSIC). Estado actual de la captura de CO₂ en la industria del cemento. Revista Técnica CEMENTO HORMIGON - N° 984 – ENERO-FEBRERO 2018. ISSN: 0008-8919 PP.:56-65

[2] Saldívar-Esparza, Santiago, Cabrera-Robles, J. Salvador, Reta-Hernández, Manuel. Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. Universidad Autónoma de Zacatecas. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias, septiembre, 2017 Vol.4 No,12, 22-34.

[3] Udara S.P.R. Arachchige, Dinesh Kawan, Lars-André Tokheim and Morten C. Melaaen. Model Development for CO₂ Capture in the Cement Industry. International Journal of Modelling and Optimization, Vol. 3, No. 6, December 2013.

[4] Informe de síntesis del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés.

https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

[5] Captura y Almacenamiento de CO₂, Documento del Grupo de Trabajo de Conama 10: Grupo de trabajo 02, Ángel Cámara (Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Centro de España.

http://www.conama10.conama.org/conama10/download/files/GTs%202010/2_final.pdf

[6] Fuente consultada:

<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/cumbre-cambio-climatico-cop21/resultados-cop-21-paris/>

[7] OCDE/IEA 2013. “Redrawing the Energy-Climate map”. World Energy Outlook special report (2013), Paris, Francia.

[8] Glosario de términos sobre medio ambiente, UNESCO PNUMA Programa Internacional de Educación Ambiental. UNESCO Regional Office for Education in Latin America and the Caribbean (Chile), Sánchez, Vicente; Guiza, Beatriz. 1989.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000085533>

[9] IPCC,2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1,5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte,V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J.Skea, P.R,Shukla, A. Pirani, W.Moufouma-Okia, C.Téan, R. Pidcock, S.Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press

[10] ¿Cuáles son las consecuencias del efecto invernadero? <https://blog.oxfamintermon.org/cuales-son-las-consecuencias-del-efecto-invernadero/>

[11] ¿Cómo influimos sobre el efecto invernadero natural? <https://blog.oxfamintermon.org/como-influimos-sobre-el-efecto-invernadero-natural/>

[12] Efecto Invernadero. Desarrollado por Centro Internacional para la investigación del Fenómeno del El Niño, CIIFEN Copyright 2016-2017. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content%26view%3Dcategory%26layout%3Dblog%26id%3D99%26Itemid%3D132%26lang%3Des

[13] *Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI)*. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Montevideo-Uruguay. <https://www.mvotma.gub.uy/inventarios-nacionales-de-gases-de-efecto-invernadero>

[14] Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Ministerio para la Transición Ecológica. Última actualización: julio de 2019. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-GEI.aspx>

[15] Global Warming: News, Facts, Causes & Effects. LiveScience. <https://www.livescience.com/topics/global-warming>

[16] ¿Por qué se produce el calentamiento global? Oxfam Intermón. <https://blog.oxfamintermon.org/por-que-se-produce-el-calentamiento-global/>

[17] Primer análisis completo de la actividad solar de los últimos 400 años. SINC La ciencia es noticia. 11 de diciembre 2018. Referencia bibliográfica: Andrés Muñoz-Jaramillo y José M Vaquero. "Visualization of the challenges and limitations of the long-term sunspot number record". Nature Astronomy, 2018 Doi: 10.1038/s41550-018-0638-2. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Primer-analisis-completo-de-la-actividad-solar-de-los-ultimos-400-anos>

[18] Agua y Vapor. Cambio Climático Global. <https://cambioclimaticoglobal.com/agua>

[19] CICLOS CLIMÁTICOS, C-2400 Y C-800. Introducción a las correlaciones entre ciclos astronómicos y ciclos climáticos terrestres. Más allá de Milankovitch. Por José Luis Pascual Blázquez. Trabajo expuesto en el Congreso Ibérico de Astrología, Alicante, junio 2007. <https://astrofactoria.webcindario.com/C-800.htm>

[20] Doble calentamiento global entre 2018-2022 por causas naturales. Blog de Picazo. Cambio climático. 23 de agosto de 2018. <https://picazo.eltiempo.es/doble-calentamiento-global-entre-2018-2022-por-causas-naturales/>

[21] Causas del cambio climático y el calentamiento global, Ingeoexpert. 7 diciembre, 2017. <https://ingeoexpert.com/causas-cambio-climatico/?v=04c19fa1e772>

[22] Avanza CO₂. Cambio Climático. <http://www.minasyenergia.upm.es/investigacion/co2/cambioClimatico.htm>

[23] Special report on the impacts of global warming of 1.5°C above preindustrial levels and relates global greenhouse gas emission pathways (SR1.5). Working Group I. The Physical Science Basis. <https://wg1.ipcc.ch/SR/SR.html>

[24] El IPCC aprobó el Informe especial sobre el calentamiento global de 1,5°C. El blog de la Agencia Estatal de Meteorología. <https://aemetblog.es/2018/10/09/el-ipcc-aprobo-el-informe-especial-sobre-el-calentamiento-global-de-15-c/>

[25] John Tyndall: founder of climate science? Ed Hawkins. Aril 26, 2018. Climate Lab Book, Open climate science. <https://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/john-tyndall-founder-of-climate-science/>

[26] Historia sobre el efecto invernadero y calentamiento global de la tierra. Source: Maslin, M., Global Warming, a very short introduction. Oxford University Press. Oxford 2004. <https://www.lenntech.es/efecto-invernadero/historia-calentamiento-global.htm>

[27] Determinación del Ozono atmosférico de las medidas de MIPAS/ENVISAT. Tesis Doctoral realizada por Sergio Gil López, Granada 2006. Instituto de Astrofísica de Andalucía. CSIC. Universidad de Granada. <https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/GIL%20LOPEZ.pdf>

[28] La “Curva de Keeling” y el número más importante para nuestro mundo 400 ppm. Dirk Hoffman. 20 de mayo de 2013. <https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20130520-la-quot-cu-.pdf>

[29] Resoluciones aprobadas por la Asamblea General durante el 23º periodo de sesiones. Asamblea General – Enlaces Rápidos. DAG HAMMARSKJÖLD BIBLIOTECA. <https://research.un.org/es/docs/ga/quick/regular/23>

[30] Documento. <https://undocs.org/es/A/RES/2398%28XXIII%29>

[31] Is Carbon Dioxide from Fossil Fuel Changing Man’s Environment? Charles D. Keeling. Source: Proceedings of the American Philosophical Society. Vol.114, No. 1 (Feb. 16, 1970) pp. 10-17. Published by: American Philosophical Society. http://shadow.eas.gatech.edu/~kcobb/warming_papers/keeling70.pdf

[32] Día Mundial del Medio Ambiente, 5 de junio. NACIONES UNIDAS. <https://www.un.org/es/events/environmentday/background.shtml>

[33] Documento de la Resolución **A/RES/2994 (XXVII)**. [https://undocs.org/es/A/RES/2994%20\(XXVII\)](https://undocs.org/es/A/RES/2994%20(XXVII))

[34] Documento de la Resolución **A/RES/3000 (XXVII)**. [https://undocs.org/es/A/RES/3000%20\(XXVII\)](https://undocs.org/es/A/RES/3000%20(XXVII))

[35] 1ra Conferencia del Clima. El ambiente es de todos. Minambiente. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/420-plantilla-cambio-climatico-10>

[36] About. History of the IPCC, ipcc. <https://www.ipcc.ch/about/history/>

- [37] The Reports, ipcc. <https://www.ipcc.ch/about/history/>
- [38] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Introducción. https://unfccc.int/resource/docs/publications/handbook_esp.pdf
- [39] Antecedentes. Día Internacional de la Preservación de la Capa de Ozono, 16 de septiembre. <https://www.un.org/es/events/ozoneday/background.shtml>
- [40] Ministerio de Transición Ecológica. COP25. https://www.miteco.gob.es/es/cop25/detalle_noticias.aspx?tcm=tcm:30-505708
- [41] Cronología de la lucha para controlar el cambio climático. Una nueva ronda de conversaciones, la última antes de vencer el Protocolo de Kioto original y con vistas al acuerdo de “Kioto II: Por: EFE. 30 de agosto de 2012- 09:33 hs. INFORMADOR.MX. <https://www.informador.mx/Tecnologia/Cronologia-de-la-lucha-internacional-para-controlar-el-cambio-climatico-20120830-0169.html>
- [42] Cronología de negociaciones sobre el clima. Objetivos de desarrollo sostenible. NACIONES UNIDAS. Fuente: CMNUCC. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cronologia-de-negociaciones-sobre-el-clima/>
- [43] Qué es Rio+20. La Conferencia. Ecodes25, tiempo de actuar. <https://ecodes.org/rio+20/que-es-rio20>
- [44] Informes de Evaluación del IPCC. Recursos. CENEAM. Ministerio para la Transición Ecológica. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/Cclimatico/informe_ipcc.aspx
- [45] Guía Resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Elaborado por Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Fundación Biodiversidad, Oficina Española de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología Centro Nacional de Educación Ambiental). Impresa Madrid en febrero de 2016. https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-sintesis-resumida_tcm30-376937.pdf
- [46] Clave para entender la COP22 de Marrakech. Álex Fernández Murza, 25 de Oct 2016.Actualidad. Cambio Climático. HABLADO EN VIDRIO. <https://hablandoenvidrio.com/claves-cop-22-marrakech/>
- [47] Donal Trump anuncia que Estados Unidos abandonará el Acuerdo de París sobre cambio climático. Redacción BBC Mundo. 1 de junio 2017. BBC. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-40124921>
- [48] La COP23 impulsa la implementación del Acuerdo de París y la creación de alianzas globales par reforzar la acción climática. La vigesimotercera edición de la cumbre del Clima, organizada por la convención Marco de las Naciones Unidas, tuvo lugar en Bonn (Alemania) entre el 6 y el 17 de noviembre, bajo la presidencia de Fiji. CUMBRE DEL

CLIMA: COP23. IBERDROLA. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/cop23>

[49] concluye la COP24 sentando las bases para activar el Acuerdo de París. Cumbre de Clima: COP24. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/cop24>

[50] Cronología del Estudio del cambio climático. Emiliano Monroy-Rios. Septiembre 30, 2018. Environmental Biogeochemistry. <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/2018/09/30/cronologia-cc/>

[51] Consejo Europeo, Consejo de la Unión Europea. Políticas. Lucha contra el cambio climático en la UE. Acuerdos internacionales sobre acción por el clima. <https://www.consilium.europa.eu/es/policias/climate-change/international-agreements-climate-action/>

[52] Gobierno de España, Ministerio para la Transición Ecológica, cambio climático, El proceso internacional de lucha contra el cambio climático. Naciones Unidas. Protocolo de Kioto. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>

[53] Paris Agreement on Climate change. European Council, Council of the European Union. Introduction. <https://www.consilium.europa.eu/en/policias/climate-change/timeline/>

[54] Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE). Comisión Europea, Acción por el Clima. https://ec.europa.eu/clima/policias/ets_es

[55] Transporte. Página – última modificación 08/08/2019. Agencia Europea de Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/es/themes/transport/intro>

[56] Análisis panorámico 2017. Acción de la UE de materia de energía y cambio climático. Transporte, 88 – 96. Tribunal de Cuentas Europeo <http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/#chapter4>

[57] Agricultura – Introducción. Agencia Europea de Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/es/themes/agriculture>

[58] Landscapes in transition. An account of 25 years of land cover change in Europe. <https://www.eea.europa.eu/publications/landscapes-in-transition>

[59] Documento “Global Energy and CO₂ Status Report 2018”. de International Energy Agency. https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf

[60] iea. Publications. Nuclear power in a clean energy system. <https://www.iea.org/publications/nuclear/>

- [61] Cambio climático. Mitigación: políticas y medidas. MITECO. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/edificacion.aspx>
- [62] Análisis panorámico 2017. Acción de la UE de materia de energía y cambio climático. Tribunal de Cuentas Europeo. Edificios. 85 – 87. <http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/#chapter4>
- [63] Análisis panorámico 2017. Acción de la UE de materia de energía y cambio climático. Industria, 80 – 84. Tribunal de Cuentas Europeo <http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/#chapter4>
- [64] CONSTRUCÍA. News. <https://www.construcia.com/en/noticias/que-es-economia-circular/>
- [65] “INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO”. /Henry Oswaldo Benavides Ballesteros, Gloria Esperanza León Aristizábal. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM-METEO/008-2007.
- [66] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [67] Economics for Energy Blog. Sobre la Captura y Almacenamiento de Carbono (CSS). <https://economicsforenergy.wordpress.com/2014/02/03/sobre-la-captura-y-almacenamiento-de-carbono-ccs/>
- [68] La captación y el Almacenamiento de Dióxido de Carbono. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer. 2005, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. ISBN 92-9169-319-7
- [69] Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂. El Futuro del Carbón en la política energética española. Capítulo 6.
- [70] Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. SALDÍVAR-ESPARZA, Santiago, CABRERA-ROBLES, José Salvador, RETA-HERNÁNDEZ, Manuel. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias. 2017, 4-12:22-34
- [71] Estado del Arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. César Bartolomé Muñoz, Pedro Mora Peris, José David Recalde Rodríguez. 1ª Edición, diciembre 2011. ISBN 978-84-615-5702-8
- [72] Chilled Ammonia process for CO₂ capture. Jose Francisco Pérez-Calvo, Daniel Sutter, Matteo Gazzani, Marco Mazzotti. CEMCAP. ECRA-Cemcap Workshop

[73] La Captura y el Almacenamiento del Dióxido de Carbono, CAC: Una Herramienta de mitigación del Cambio Climático. Academia Nacional de Ingeniería, Uruguay. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. Aca. Prof. Ing. Raúl R. Prando. 01 de junio 2011-Versión Revisada.

[74] Componentes y propiedades del cemento. El cemento. IECA. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>

[75] Cemento. Marco Teórico. Aspectos Generales <https://sinavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>

[76] El Cemento. Proceso de Fabricación. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. <https://www.ieca.es/proceso-de-fabricacion/>

[77] Definición y elaboración del cemento. <https://sinavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>

[78] Estado actual de la captura de CO₂ en la industria del cemento. Fuente: Francisco García Labiano. Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC). Fernando Rubiera. Instituto Nacional del Carbón (INCAR-CSIC). Revista Técnica EMENTO HORMIGÓN. N° 984. ENERO-FEBRERO 2018.

[79] ovacen. Periodismo al detalle. Arquitectura > El hormigón: el material más destructivo de la Tierra. Fuente: Francisco García Labiano. Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC). Fernando Rubiera. Instituto Nacional del Carbón (INCAR-CSIC). Revista Técnica EMENTO HORMIGÓN. N° 984. ENERO-FEBRERO 2018.

[80] Model Development for CO₂ Capture in the Cement Industry. Fuente: Udara S.P.R. Arachchige, Dinesh Kawan, Lars-André Tokheim, and Morten C Melaaen. International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 6, December 2013

[81] CCS Project with Alstom's Chilled Ammonia Process at AEP's Mountaineer Plant. Paper no. 72. Bollinger, Rob; Muraskin, David; Hammond, Mike; Kozak, Fred; Spitznogle, Gary; Cage, Matt; Sherrick, Brian; Varner, Michael.

[82] Voldsund, Mari; Anantharaman, Rahul; Berstad, David; De Lena, Edoardo; Fu, Chao; Gardarsdottir, Stefania; Jamali, Armin; Pérez-Calvo, José-Francisco; Romano, Matteo; Roussanaly, Simon; Ruppert, Johannes; Stallmann, Olaf; Sutter, Daniel, 2018; CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants. (D4.6).

[83] [Pérez-Calvo, José-Francisco]. [2018]. CEMCAP. Ammonia Process (CAP) optimization and comparison with pilot plant tests. (D10.3)]

[84] EU carbon prices could double by 2021 and quadruple by 2030. 26 April 2018. Carbon Tracker. <https://carbontracker.org/eu-carbon-prices-could-double-by-2021-and-quadruple-by-2030/>

13. Lista de Figuras

Figura 3.1. Emisiones globales de CO₂ fósil. Fuente Global Carbon Project, Data CDIAC/GCO/BP/USGS. https://www.eldiario.es/sociedad/emisiones-mundiales-CO2-alcanzaran-combustible_0_843066014.htm

Figura 3.2. Proyectos CAC a gran escala operativos a fecha de diciembre 2017. Estado actual de la captura de CO₂ en la industria del cemento. Fuente: Global CCS Institute

Figura 6.1. Efecto invernadero natural. Fuente: Okinagan University Collee, University of Oxford, United States Environmental Agency. The Science of Climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UNEP, WMO. Cambridge University Press. U.S.A.1996.

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008/05_atmosfera/cap5_2.htm

!

Figura 6.2. Balance pormenorizado de los flujos de energía entre el espacio, la atmósfera de la Tierra y el suelo. Fuente: publicación por la NASA, The Earth Observer November-December 2006. Volume 18, Issue 6. page 38, basado en las mediciones del programa SORCE en 2006. Las cantidades entre paréntesis indican la variación de los valores respecto a 1996. <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/140268>

Figura 6.4. Emisión Bruta Total (desagregado) (Mt CO₂eq – 2017 – Sectores y actividades) Fuente: Infografía: Emisiones GEI-2017 (abril 2019). Ministerio para la Transición Ecológica. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/gei-2017-sectores-diagram_tcm30-496692.pdf

Figura 6.5. Evolución emisiones GEI (kt CO₂-eq) para el año 2018. Fuente: Avance de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero correspondientes al año 2018. (junio 2019) Ministerio para la Transición Ecológica. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/avance-gei-2018_tcm30-496677.pdf

Figura 6.6. Evolución de la temperatura media en los últimos 30 años en el mes de junio, donde se aprecia el aumento considerable en el año en curso respecto a los anteriores no solo a escala europea sino también a nivel global Fuente: ECMWF, Copernicus Climate Change Service. https://www.bolsamania.com/?section=print&story_id=6793244&

Figura 6.7. Medias de temperaturas anuales españolas en la serie histórica desde 1965. Siete de los diez años más calurosos de esta época acontecen en los últimos 20 años. Fuente: ECMWF, Copernicus Climate. https://www.elespanol.com/ciencia/ecologia/20190731/anos-calidos-historia-espana-ocurrido/417958818_0.html

Figura 6.8. Actividad solar desde 1985 hasta 2015 junto con predicciones hasta el año 2020. Los Enigmas del Campo Magnético Solar. López Ericsson, Franklin Aldas, Mar 2016
Fuente: NASA/Marschall Space Flight Center.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Actividad-solar-desde-1985-hasta-2015-junto-con-predicciones-hasta-el-ano-2020_fig3_321951045

Figura 6.9. Gráficas de emisiones mundiales de CO₂ por combustible y por diferentes regiones. Fuente: Global Carbon Project. EL PAÍS.
https://elpais.com/sociedad/2018/12/05/actualidad/1544012893_919349.html

Figura 6.10. Imagen que detalla el primer plano del flexágono del cambio climático, la interacción entre el Sol y los diversos gases que integran la atmósfera terrestre, cómo ocurre de manera natural el efecto invernadero, y que debido a la quema de combustibles fósiles y la tala de bosques se incrementa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y se modifica la temperatura. Fuente: Joaquín Flores Ramírez, El flexágono del Cambio Climático. Instituto de Tecnología del Agua.
<http://aguasimple.org.mx/revistav9/index.php/tambien-es-agua/130-el-flexagono-del-cambio-climatico>

Figura 6.11. Anomalía del Golfo. La corriente que asegura un clima templado a Europa está modificando su comportamiento por la influencia de aguas de deshielo polar. La corriente del Golfo amenaza al clima de la Tierra. Xavier Fonseca. Redacción. 23/04/2018 11:00 H Fuente: LA VOZ. Joaquín Flores Ramírez, El flexágono del Cambio Climático. Instituto de Tecnología del Agua. Fuente: LA VOZ.
https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/galicia/2018/04/15/amenaza-corriente-golfo/0003_201804H15P59991.htm

Figura 6.12. Niveles de CO₂ están aumentando. Las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera desde la Revolución Industrial se han incrementado. En la gráfica se muestra las concentraciones atmosféricas de CO₂ en partes por millón, desde el 1700 al momento presente, así también se puede apreciar la evidencia de núcleos de hielo antes de 1958 y las mediciones que se toman diariamente en el observatorio de Hawái después de 1958. La circulación del océano se está volviendo más lenta. Traducción por Mónica Morales. Fuente: InsideClimate News. Scripps Institution of Oceanography. 15 mayo, 2018. <https://futuroverde.org/2018/05/15/la-circulacion-del-océano-se-esta-volviendo-mas-lenta/>

Figura 6.13. Aumento del nivel del mar y causas. En milímetros, 19980-presente. La mayor evidencia que tienen los científicos para constatar el cambio climático. Traducido por Mónica Morales. 10 de octubre, 2017. Fuente: Lijing Cheng, Instituto de Física Atmosférica, Beijing, China. InsideClimateNews.
<https://futuroverde.org/2017/10/10/la-mayor-evidencia-que-tienen-los-cientificos-para-constatar-el-cambio-climatico/>

Figura 6.14. Glacier Muir. VivreDemain by News. Fuente: Etats-Unis.
<https://vivrede main.fr/2015/10/27/etats-unis-photos-fonte-glaciers/>

Figura 6.15. Infografía de WWF que recoge los riesgos e impactos de una subida de medio grado. Fuente: WWF. <https://aemetblog.es/2018/10/09/el-ipcc-aprobo-el-informe-especial-sobre-el-calentamiento-global-de-15-c/>

Figura 6.16. Emisiones de CO₂. EL PAIS. Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente https://elpais.com/elpais/2014/06/03/media/1401824410_599926.html

Figura 6.17. Emisiones de CO₂ por sectores. EL PAIS Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente

https://elpais.com/elpais/2014/06/03/media/1401824410_599926.html

Figura 6.18. Condiciones de ratificación para el Acuerdo de París. Fuentes: ONU, Climate analysis. *180 países lo firmaron. Fuente: www.afp.com, <http://verdenoticias.org/index.php/noticias-ambientales-agenda-ambiental/1558-india-ratifico-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-clima>

Figura 6.19. Cronología de entrada en vigor del Acuerdo de París. Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.20. Países que han ratificado o firmado el Acuerdo de París a fecha 1 de junio de 2017. Statista. Fuentes: UNFCCC, Business Insider.

<https://es.statista.com/grafico/9654/que-paises-forman-parte-del-acuerdo-de-paris/>

Figura 6.21. División de fases del Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE. Fuente: EU ETS Handbook. Elaboración propia. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/ets_handbook_en.pdf

Figura 6.22. Países actuales en América que cuentan con programas de Comercio de emisiones (tope y comercio) en 2019. Fuente: Infografía del Status Report 2019 de ICAP. https://icapcarbonaction.com/images/ICAP_StatusReport_2019/InfographicsSpanish/World_map_infographic_Spanish.jpg

Figura 6.23. Países actuales que cuentan con programas de Comercio de emisiones (tope y comercio) en 2019. Fuente: Infografía del Status Report 2019 de ICAP.

https://icapcarbonaction.com/images/ICAP_StatusReport_2019/InfographicsSpanish/World_map_infographic_Spanish.jpg

Figura 6.24. Emisiones de gases de efecto invernadero de la EU en 2015 por sectores. Fuente: EEA Greenhouse Gas – Data viewer, AEMA,2017 y Elaboración propia.

<http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/>

Figura 6.25. Emisiones de gases de efecto invernadero en la EU en el sector del transporte en 2015. Fuentes: EEA Greenhouse gas – Data viewer, AEMA, 2017, análisis del TCE.

<http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/#B112>

Figura 6.26. Emisiones de gases de efecto invernadero de la EU en 2015 por sectores. Fuente: EEA Greenhouse Gas – Data viewer, AEMA,2017 y Elaboración propia.

<http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/>

Figura 6.27. Crecimiento medio anual de la demanda mundial de energía primaria por Combustible, 2010-2018 Fuente: IEA y elaboración propia. https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf

Figura 6.28. Previsión de la producción de energía en la EU por tipo de combustible. Fuente: Comisión Europea, EU Reference Scenario 2016 (simulación del modelo PRIMES) <http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/>

Figura 6.29. Emisiones de gases de efecto invernadero de la EU en 2015 en el sector Edificios. Fuente: IEA Greenhouse gas – Data viewer, AEMA, 2017. Elaboración propia. https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf

Figura 6.30. Emisiones de gases de efecto invernadero de la EU en 2015 en sector Residuos. Fuente: Tribunal de Cuentas Europea. <http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/#A109>

Figura 6.31. Emisiones de gas en el sector Industria. Fuente: EEA Greenhouse gas - Data viewer, AEMA, 2017. <http://publications.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/es/#chapter4>

Figura 6.32. Emisiones verificadas del RCDE en el periodo 2005-2017, emisiones previstas del RCDE en el periodo 2018-2030, límites máximos del RCDE en las fases 2, 3 y 4 y excedente acumulado de derechos del RCDE en el periodo 2008-2017 (Mt equiv. CO₂). El gráfico muestra las emisiones verificadas del RCDE con el alcance sectorial y geográfico del RCDE en el Año correspondiente, por lo que no puede leerse como una serie cronológica antes de 2013. El sector de la aviación está incluido en el límite máximo para el periodo 2012-2017. Fuente: Comisión Europea.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0716&from=EN>

Figura 6.33. Litografía explicativa de la economía circular.

<https://trabajo.ladiaria.com.uy/articulo/2019/6/economia-circular-el-modelo-en-el-que-el-uso-sustituye-al-consumo/>

Figura 6.34. Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE. Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático. IDEAM-METEO/008-2007.pdf

Figura 6.35. Emisiones mundiales de GEI (en Gt CO₂-eq anuales) en ausencia de políticas climáticas adicionales. IPCC

Figura 6.36. Emisiones de los seis escenarios IE-EE, así como también la distribución de la frecuencia de las emisiones de los escenarios post IE-EE (percentil 5, 25, mediana, 75, 95). Capítulo 3 del IPCC

Figura 7.1. Gráfica de proyectos CAC a gran escala respecto a su aporte a la atmósfera en MtCO₂ por año. TCEP (2013)

Figura 7.2. Presentación de las diferentes configuraciones correspondientes a las tecnologías CAC. IPCC, 2005.

Figura 7.3. Esquema general del proceso de captura de CO₂ posterior a la combustión. Citi Investment Research Analysis.

Figura 7.4. Esquema de captura por postcombustión en una Central térmica. Vattenfall.

Figura 7.5. Esquema representativo del proceso de absorción química del CO₂. Inyección del CO₂ como método de recuperación mejorada. Jose Luis Botella Rivas

Figura 7.6. Ley de Henry.

Figura 7.7. Esquema simplificado del proceso Selexol.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/selexol-process>

Figura 7.8. Esquema de absorción de CO₂ con destilación criogénica.

Figura 7.9. Ilustración del transporte de un volumen de gas a través de una membrana PVAM basado en FSC de una membrana.

<https://doi.org/10.1186/s13705-018-0177-9>

Figura 7.10. Diagrama de flujo del proceso de compresión y purificación de CO₂. DOE

Figura 7.11. Ilustración conjunta del proceso de Carbonatación-Calcinación.

<http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/home.html>

Figura 7.12. Representación del diseño de una planta de precombustión. Vattenfall

Figura 7.13. Representación de un esquema general de una planta por oxidación junto con las posibles impurezas a eliminar en los principales componentes. Vattenfall y Elaboración propia.

Figura 7.14. Representación de la configuración de oxidación por recirculación en vía seca y vía húmeda viendo como existe una reducción del volumen total y la predominancia del CO₂ en éste. Vattenfall.

Figura 7.15. Gráfica de costos para transporte marítimo y terrestre con estimaciones a la baja (línea continua, y estimaciones al alta (línea a puntos). Estos están expresados en \$ por tonelada de CO₂ por cada 250 km en función del flujo másico de CO₂ expresado en MtCO₂/año. IPCC,2205

Figura 7.16. Gráfica comparativa de los costos asociados al transporte marítimo por buque, frente a los gaseoductos tanto terrestres como marítimos, éstos están expresados en dólares estadounidenses por tonelada de CO₂ respecto a la distancia en km para su transporte. IPCC, 2005.

Figura 7.17. Ilustración mostrando los diferentes métodos de almacenamiento de CO₂ respecto a las distintas formaciones geológicas subterráneas profundas. IPCC, 2005

Figura 7.18. Corte esquemático mostrando los diferentes mecanismos de escape que pueden presentarse en una formación salina junto con las medidas de saneamiento más favorables para contrarrestar este escape. IPCC, 2005

Figura 8.1. Gráfica de producción de cemento en países industrializados y en vías de desarrollo. Ovacen.

Figura 8.2. Planta procesadora de cemento. Cillo Rouge / Roger Rivert

Figura 8.3. Ilustración de las diferentes zonas de un Horno Rotativo junto con sus principales características. "Fundamentos sobre Hornos". Ingenio.

Figura 8.4. Consumo y Producción de Cemento junto al PBI del Mundo (2006-2018P). International Cement Review, Banco Mundial y FMI. Elaboración: ASOCEM

Figura 8.5. Figura representativa y de relación entre fabricación del concreto y emisión de CO₂ por país productor. PBL Agencia de evaluación ambiental de los Países Bajos. BBC

Figura 8.6. Figura representativa de los puntos de emisión de CO₂ en una planta cementera sin captura de CO₂. Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN. Elaboración propia.

Figura 8.7. Gráfico histórico con pronóstico hasta el 2050 partiendo desde el año 2010 respecto a emisiones directas en GtCO₂. Los diferentes colores se corresponden con la disminución de emisiones que se corresponden con las diferentes medidas a poder adaptar a las cementeras para una mitigación relativa de emisiones GEI. Revista CEMENTO HORMIGÓN.

Figura 9.1. Esquema de la integración del CAP en el horno de una cementera. D4.6. CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants.

Figura 9.2. Diagrama de flujo del proceso de captura de CO₂ por amoniaco enfriado, CAP. CEMCAP. Chilled Ammonia Process (CAP) optimization and comparison with pilot plant tests. 2018

Figura 9.3. Esquema referencia de un horno de planta cementera con la incorporación de captura de CO₂ mediante CAP. D4.6 CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants.

Figura 9.4. Diagrama de flujo principal de la tecnología CAP acoplada a una planta cementera.

Figura 10.1: Gráfico de la evolución del precio de emisión del CO₂ (EUA). <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

Figura 13.1. Gráfico del Ahorro anual para una planta cementera con producción anual de 600.000 t de cemento. Elaboración propia.

14. Lista de Tablas

Tabla 6.1. Gases de efecto invernadero por fuente y actividad emisora. Fuente: Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático-Ecuador, 2011. Elaboración propia.

http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=132&lang=es

Tabla 6.2. Impactos por esperar del cambio climático. 3.1. El Cambio Climático y los Acuerdos Internacionales. Energía y Sociedad. Fuente: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Elaboración propia. <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-1-el-cambio-climatico-y-los-acuerdos-internacionales/>

Tabla 6.3. Tabla de los acuerdos principales del Acuerdo de París. Fuente: European Council. Council of the European Union y Elaboración propia. https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish.pdf

Tabla 7.1. Procesos que incluyen las distintas tecnologías CAC. ZEP. Elaboración propia.

Tabla 7.2. Tabla conteniendo las ventajas y desventajas principales de las tres tecnologías CAC comentada. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias, septiembre 2017 Vol. 4 No 12, 22-34. Elaboración propia.

Tabla 7.3. Estimación de la capacidad de almacenamiento que presentan los distintos tipos de almacenamiento geológico nombrados en GtCO₂. La capacidad de almacenamiento no incluye costos económicos. IPCC. Elaboración propia.

Tabla 8.1. Tabla de ejemplos de materias primas no incluyentes de elementos menores o elementos traza. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.2. Tabla de concentraciones de los principales gases de emisión en una planta cementera. Udara S.P.R. Arachchige, Dinesh Kawan, Lars-André Tokheim, and Morten C Melaaen. International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 6, December 2013. Elaboración propia

Tabla 8.3. Tabla de Emisiones medias de CO₂ por tonelada de cemento producido (para un contenido medio de clínker del 78%). Udara S.P.R. Arachchige, Dinesh Kawan, Lars-André Tokheim, and Morten C Melaaen. International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 6, December 2013. Elaboración propia.

Tabla 8.4. Tabla mostrando la participación en %, en cuanto a reducción en emisiones GEI, de aquellas tecnologías incluidas en la figura 8.7. Cemento Hormigón.

Tabla 9.1. Tabla comparativa de especificaciones para una planta cementera frente a una planta de energía. Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

Tabla 9.2 Tabla de consumos para CAP conectado a planta de referencia de cemento. Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

Tabla 9.3 Tabla representativa de los valores correspondientes a los parámetros de la planta cementera de referencia para el estudio. Elaboración propia.

Tabla 9.4 Tabla de valores de las principales características de los diferentes gases de combustión existentes en el proceso en diferentes etapas del proceso CAP. Elaboración propia.

Tabla 9.5 Tabla de especificaciones de los gases de combustión que llegan al CAP. Elaboración propia.

Tabla 14.1. Tabla de especificaciones de los gases de combustión que llegan al CAP. Elaboración propia.

Tabla 14.1. Tabla de valores respectivos a los indicadores relacionados con la tecnología CAP. Elaboración propia.

Tabla 14.2. Tabla de los valores correspondientes al caso base SPECCA para la tecnología de referencia y la CAP Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

Tabla 14.3. Tabla representativa con los costes asociados a la tecnología CAP para poder realizar el estudio económico de ésta. Fuente: CEMCAP. Elaboración propia.

Tabla 10.4. Tabla comparativa de los valores económicos respecto a la planta de referencia sin CAP y con CAP. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.5. Tabla de comparativa de costes en valores absolutos y porcentuales para una planta de producción sin aplicación de CAP y otra con aplicación CAP. Elaboración propia.

Tabla 10.1. Tabla de costes económicos unitarios del cemento sin CAP, considerando el estudio de sensibilidad del precio de CO₂. Elaboración propia.

Tabla 14.7. Tabla representativa del ahorro anual para una planta cementera con CAP comparando con una planta de referencia sin CAP y considerando el estudio de sensibilidad del precio de CO₂. Elaboración propia.