

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE SUSTITUCIÓN ENERGÉTICA EN UNA
PLANTA CEMENTERA, CON COMPENSACIÓN DE BONOS DE CARBONO

Claudia Elena Pérez Donoso

Santiago, Chile, 2004.

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE SUSTITUCIÓN ENERGÉTICA EN UNA
PLANTA CEMENTERA, CON COMPENSACIÓN DE BONOS DE CARBONO

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero en Recursos
Naturales Renovables

CLAUDIA ELENA PÉREZ DONOSO

PROFESOR GUÍA	Calificaciones
Sr. Fernando Santibáñez Q. Ingeniero Agrónomo, Dr de Estado.	7.0
PROFESORES CONSEJEROS	
Sr. Ricardo Marchant S. Ingeniero Agrónomo.	6.0
Sr. Víctor García de Cortázar G de C. Ingeniero Agrónomo, Dr Ingeniero.	7.0

Santiago, Chile, 2004

DEDICATORIA

A mis papás, mi hermano, familia, amigas y amigos.

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores, profesores colaboradores y a don Fernando Santibáñez que guío esta memoria.

A la empresa Cementos Bío Bío, principalmente a don Víctor Vidal y Gustavo Chiang.

A Juan Andrés y Javier Donoso, a Roberto Castro y, en especial, a Juan Balmaceda.

A don David Cornejo y Marco Benavente.

A Rodrigo García.

Y a todos quienes me ayudaron y apoyaron.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
SUMMARY	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivos Específicos	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).....	5
Bonos de Carbono	7
Situación Nacional.....	9
Biomasa como Combustible.....	10
Industria Cementera.....	11
Sustitución de Combustible	14
Concepto de Adicionalidad	15
MATERIALES Y MÉTODOS	16
Materiales	16
Método.....	17
Objetivo 1: Análisis de la información por la empresa respecto al consumo energético y tipos de combustibles utilizados.	17
Objetivo 2: Establecer la cantidad, calidad y localización de los recursos biomásicos potencialmente disponibles en la región.	18
Objetivo 3: Estimación del costo de adquisición, transporte, tratamiento y almacenaje de la biomasa a utilizar.	18
Objetivo 4: Simulación de mercado basado en repuestas potenciales del precio de los residuos biomásicos frente a un aumento de demanda.	19
Objetivo 5: Análisis del efecto de sustitución de combustible, según estándares ambientales internacionales y las emisiones potencialmente reducibles.	22
Objetivo 6: Evaluación de la adicionalidad del proyecto de sustitución energética y de la compensación de bonos de carbono.	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
Análisis del proceso productivo respecto al consumo energético	24
Biomasa potencialmente disponible en la región	26
Estimación del costo de adquisición, transporte, tratamiento y almacenaje de la biomasa a utilizar.....	27

Simulación de mercado basado en respuestas potenciales del precio de los residuos biomásicos frente a un aumento de la demanda	30
Análisis del efecto de la sustitución de combustible según estándares ambientales internacionales	31
Estimación de las emisiones provenientes de la combustión del carbón.	31
Estimación de las emisiones provenientes de la sustitución parcial de carbón por biomasa.	48
Toneladas de emisiones potencialmente reducibles.	56
Compensación de bonos de carbono y adicionalidad del proyecto.	58
Compensación de bonos de carbono.	58
Adicionalidad del proyecto.	59
CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO.....	68
Anexo I.....	68

RESUMEN

El Protocolo de Kyoto, a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), permite la negociación de las reducciones de gases de efecto invernadero por medio de la certificación de proyectos aprobados por los gobiernos. Las plantas de cemento representan una fuente importante de emisión de estos gases, principalmente de CO₂, que se liberan por la quema de combustibles fósiles, como el carbón, en su proceso de producción. Estos gases pueden ser reducidos si se realiza una sustitución energética parcial por combustibles alternativos, como la biomasa.

El propósito de este estudio es evaluar el potencial de sustitución energética en una planta cementera con compensación de bonos de carbono, aprovechando los combustibles biomásicos presentes en la región.

Para realizar este estudio fue necesario estimar las emisiones de la planta de Cementos Bío Bío, ubicada en Teno, y enfrentarlas a dos escenarios; el primero es la situación actual, línea base, donde se consideran los gases liberados directamente del horno por la quema de combustibles fósiles, emisiones provenientes de la quema agrícola y de la descomposición de la biomasa forestal. El segundo escenario se aplica para la situación con proyecto, considerando la sustitución de combustibles fósiles y por lo tanto, la reducción de las emisiones.

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se realizó un análisis preliminar tomando en cuenta los costos de adquisición y transporte de los distintos combustibles para ambas situaciones.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los dos escenarios resultando ser ambiental y económicamente más atractiva la realización del proyecto.

Palabras claves

Industria Cementera – Sustitución Energética – Bonos de Carbono

SUMMARY

The Kyoto Protocol, through the Clean Development Mechanism (CDM), permits the negotiation of the greenhouse gases reductions via the certification of projects previously approved by the government. The cement plants represent an important source of gases emission (CO₂) which are released by fossil fuel burning. Coal is a clear example in its production process. These gases may be reduced if a partial energy replacement is carried out, as the biomass.

The purpose of this study is to evaluate the potential of energy replacement in a cement plant with carbon credits compensation availing the actual biomass fuels in the region.

To carry out this study was necessary to estimate the emissions of Cementos Bío Bío plant, which is located in Teno. Two scenarios were important here: On one hand, the present situation, i.e. the baseline scenario where the gases emissions are considered directly from the kiln and through the burning of fossil fuels, emissions arising from field burning and of the decomposition of the biomass forest. On the other hand, the scenario with the project is applied, taking into account the replacement of fossil fuels and therefore, the reduction of the emissions.

To evaluate the economic viability of the project, a preliminary analysis was done where the costs of acquisition and transportation of the different fuels were considered.

Finally, a comparative analysis of the two scenarios was carried out, and where the execution of the project turned out to be environmental and economically more attractive.

Key words

Cement Industry – Energy Replacement – Carbon Credits

INTRODUCCIÓN

La Empresa Cementos Bío Bío, una de las mayores productoras de cemento del país, incorpora tecnología de primera línea dando énfasis en la preservación del medio ambiente. Las instalaciones de su planta ubicada en Teno, Séptima Región, permiten incrementar su producción anual al doble. Por ello, es atractivo para la empresa, con el fin de aliviar la inversión, la adopción del Sistema de Bonos de Carbono.

La industria cementera es intensiva en el uso de energía, lo que se refleja en un 30 a 40% del costo total de producción. Las emisiones del horno de cemento provienen, en primer lugar, de las reacciones físicas y químicas de las materias primas y, en segundo lugar, del uso de los combustibles derivados del petróleo. Los principales gases emitidos por el horno son: óxidos de nitrógeno del aire de combustión, CO_2 procedente tanto de la calcinación del carbonato de calcio (CO_3Ca) como de los combustibles quemados, vapor de agua del proceso de combustión y de las materias primas.

Dados los antecedentes, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) de sustitución energética, es una buena oportunidad para ser adoptado por la empresa Cementos Bío Bío, basado en el alto potencial de combustibles biomásicos disponibles en la región, utilizándolos en el proceso de producción de cemento y eliminando así una fuente de emisión de gases proveniente del mal manejo de estos.

Esta memoria presenta como objetivo general la realización de un estudio de factibilidad para un proyecto de MDL en la industria cementera asociada a la sustitución total o parcial de combustible, considerando compensación de bonos de carbono. Para ello se exponen los siguientes objetivos:

Objetivos Específicos

- Analizar la información entregada por la empresa respecto al consumo energético y tipos de combustibles utilizados.
- Establecer la cantidad, calidad y localización de los recursos biomásicos potencialmente disponibles en la región.
- Estimar el costo de adquisición, transporte, tratamiento y almacenaje de la biomasa a utilizar.
- Realizar una simulación de mercado basada en repuestas potenciales del precio de los residuos biomásicos frente a un cambio de demanda.
- Analizar el efecto de la sustitución de combustible, según estándares ambientales internacionales y las emisiones potencialmente reducibles.
- Evaluar la compensación de bonos de carbono y la adicionalidad del proyecto de sustitución energética

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

El Protocolo de Kyoto toma en cuenta tanto el carácter global de la protección climática, como también el deseo de minimizar los costos relacionados, a través de una cooperación en la protección climática entre países industrializados y en desarrollo. El mecanismo creado para ello es el MDL, que está destinado a cumplir dos objetivos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y del Protocolo de Kyoto: ayudar a las partes del Anexo I, países desarrollados, a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones y, al mismo tiempo, apoyar a los países en vías de desarrollo en su desarrollo sustentable (UNFCCC, 1997).

El MDL permite a naciones no presentes en el Anexo I, a participar en negociaciones de reducción por medio de certificación de proyectos aprobados por los gobiernos. Se sabe que los costos de abatir emisiones o de capturar carbono atmosférico varían entre países y regiones; por esto, hay un margen importante para que los miembros del Anexo I cumplan con sus obligaciones financiando proyectos en países en vías de desarrollo (DFID, 2002).

Se puede hacer a la manera antigua, señalando a cada industria cual es su tope de emisiones, sin importar cuanto cueste. O hacerlo de esta nueva forma, donde existen límites individuales, pero también globales. Está la posibilidad de comprar a otra empresa parte de su derecho a contaminar, que no usa. De esta forma, se está incentivando a reducir las emisiones en el mundo. El 2005 se creará la moneda del carbón en Europa y eso es un hecho (ECOAMERICA, 2003).

Para hacer realidad estos proyectos, es indispensable que los países contraparte, no presentes en el Anexo I, hayan ratificado el Protocolo y cuenten con una institucionalidad eficaz a nivel nacional, que permita la suscripción de acuerdos marco y

la definición de los tipos prioritarios de proyectos. La participación pública y la inclusión de diversos grupos de interés son imprescindibles (CMCC, 2001).

Por medio del MDL, el Protocolo de Kyoto crea un vínculo a través del cual podrán fluir importantes inversiones de los países industrializados a aquellos en vías de desarrollo, mediante proyectos, que incluyan explícitamente entre sus objetivos la protección del ambiente y el desarrollo sustentable. También se ha sostenido, que desde el punto de vista del cumplimiento de los compromisos, el MDL es un mecanismo riesgoso, ya que su operación podría abrir violentamente el techo de emisiones de los países Anexo I, convirtiendo en inefectivas las limitaciones impuesta por el Protocolo (Beaumont, 1999)

En el siguiente diagrama se muestran los pasos del ciclo que se deben seguir para que un proyecto MDL obtenga los Certificados de Reducción de Emisiones (CONAMA, 2003):

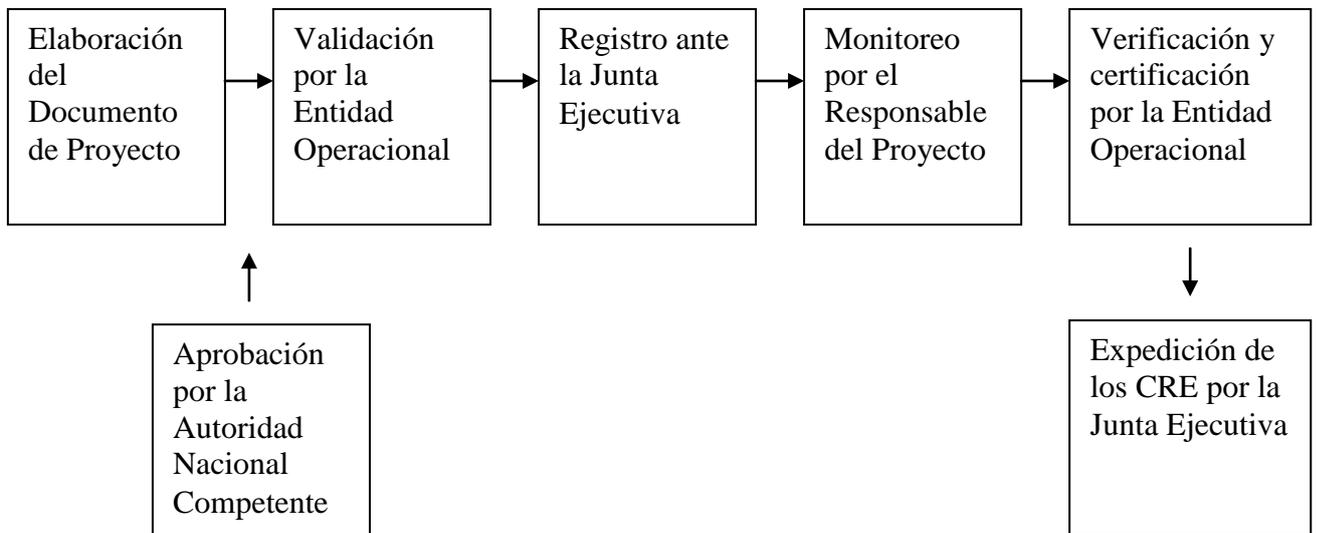


Figura 1: Pasos a seguir para la certificación de reducción de emisiones de un proyecto ante CONAMA.

Paso 1 : Consiste en la formulación y diseño del proyecto. Esta tarea está a cargo del responsable o promotor del proyecto y para ello debe seguir los parámetros y requisitos establecidos por la Autoridad Nacional Competente y las instancias internacionales del Protocolo de Kyoto y el MDL.

Paso 2 : El documento de diseño del proyecto es presentado a la Autoridad Nacional Competente, quien de acuerdo a criterios previamente establecidos, determina si el proyecto contribuye o no al desarrollo sustentable del país.

Paso 3 : La validación por una Entidad Operacional consiste en una evaluación del proyecto por una entidad independiente, que determina si éste cumple con los requisitos establecidos por las instancias internacionales para los proyectos del MDL.

Paso 4 : Si la Entidad Operacional considera que el proyecto cumple con los requisitos del MDL, redacta un informe de validación y procede a solicitar el registro del mismo ante la Junta Ejecutiva del MDL.

Paso 5 : El monitoreo, consiste en el seguimiento y registro, que el responsable del proyecto debe hacer de las emisiones de gases de efecto invernadero que se reducen y/o capturan.

Paso 6 : La verificación consiste en la revisión de los cálculos y procedimientos, realizados por el responsable del proyecto para cuantificar sus reducciones de GEI, mediante una Entidad Operacional, para luego proceder a la certificación de estas cantidades.

Paso 7 : La Entidad Operacional dará la certificación por escrito, constituyendo una solicitud a la Junta Ejecutiva, para que ésta, en caso de no existir objeción, proceda a la expedición de los Certificados de Reducción de Emisiones. Dichos CRE constituyen el bien final que puede ser negociado por el responsable del proyecto con el fin de obtener recursos financieros adicionales.

Bonos de Carbono

Son unidades expedidas de conformidad con el artículo 12 del Protocolo de Kyoto (anexo 1) y los requisitos que contiene, así como con las disposiciones pertinentes de esas modalidades y procedimientos, y corresponden a una tonelada métrica de CO₂

equivalente, calculada usando los potenciales de calentamiento atmosférico global definidos en la decisión 2 de la Conferencia de las Partes 3 (COP 3), con las modificaciones que posteriormente puedan ser objeto de conformidad con el artículo 5 (UNFCCC, 2001a).

Es un título transferible que representa una reducción de las emisiones de la fuente inmaterial, estas reducciones deben ser medibles o estimables, certificables, monitoreables y controlables (CONAMA, 2004b).

Según IPCC, una tonelada equivalente de CO₂ es un estándar universal de medida, a través del cual, se pueden evaluar los impactos de liberar a la atmósfera los distintos gases de efecto invernadero. Cada gas invernadero tiene un potencial de calentamiento global (PCG) que describe su efecto en el cambio climático en relación con una misma cantidad de CO₂, para un horizonte de 20, 100 y 500 años. Esto permite convertir todos los gases de efecto invernadero regulados por el Protocolo de Kyoto a unidades comunes de CO₂ equivalente.

El PCG es una medida del impacto que tiene un determinado gas en las “fuerzas radiativas”, esto significa el calor o la energía adicional que es retenida en el ecosistema de La Tierra por la adición de este gas a la atmósfera. El CO₂ fue elegido como el gas de referencia para ser consistente con las normas del IPCC (Vergara, 2002).

Un bono de carbono, representa una tonelada de CO₂. Se puede ver también, como el derecho a emitir una tonelada de esto. Este instrumento sólo tendrá valor si los gobiernos y las organizaciones establecen ciertas limitaciones y cuotas a la posibilidad de emitir contaminantes (ECOAMERICA, 2003).

Los bonos de carbono son también llamados bonos de descontaminación, que valen el derecho a contaminar una determinada cantidad y son vendidos por empresas que no hacen uso de sus cupos a aquellas que exceden los límites (ECOAMERICA, 2003).

Situación Nacional

Chile suscribió el Protocolo de Kyoto, el 17 de Junio de 1998, el cual ya fue ratificado en el año 2002. Dado el interés del país en participar en los mecanismos flexibles del Protocolo, en especial en el MDL, se hizo necesario desarrollar la institucionalidad nacional, que permita coordinar las acciones a nivel interno para su implementación, así como definir los criterios y líneas de base nacionales, a este nivel la CONAMA asumió esta responsabilidad (Montenegro et al, 2001).

Según la CONAMA 2003a, para Chile el Mecanismo de Desarrollo Limpio presenta grandes oportunidades como por ejemplo: alternativas de inversión por parte de países industrializados para adquirir reducciones de CO₂, ya que Chile no está obligado a reducir sus emisiones, al mismo tiempo nuestro país captura más carbono que el que emite, es decir, puede vender todas las toneladas de CO₂ que reduzca y tiene grandes potencialidades de reducción de emisiones.

Las fortalezas que presenta Chile para este mecanismo son: bajo riesgo país (el menor de América Latina), acuerdos comerciales con el mundo industrializado, un sistema financiero confiable e institucionalidad acorde con las exigencias del Protocolo de Kyoto, una Ley de Bonos de Descontaminación local y sinergia con Bonos de Carbono. Actualmente el proyecto de ley de Bonos de Descontaminación, iniciativa clave para lograr mejoras en la calidad del aire en distintas zonas del país, y especialmente en Santiago, se encuentra en discusión en el Congreso (CONAMA, 2003a).

Por otra parte, Chile acaba de firmar memorandos de entendimiento con cinco gobiernos europeos, a través de los cuales será privilegiado cuando dichos países quieran invertir en proyectos ambientales que puedan servir para que ellos cumplan sus metas de reducir las emisiones de GEI. Con estos acuerdos, el país se posiciona frente a la Unión Europea como la nación, en vías de desarrollo, que puede prestar el mejor servicio medioambiental al ayudarles a cumplir los objetivos del Protocolo de Kyoto (El Mercurio, 6 de Octubre de 2003).

Biomasa como Combustible

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas, desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura, de la actividad forestal y de los residuos urbanos. Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas, pues ellos producen residuos que normalmente son dejados en el campo al consumirse un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos (FOCER, 2002).

Cuando la combustión es completa, la biomasa se quema totalmente, todo el carbono se transforma en CO₂. Sin embargo, los árboles y plantas que están creciendo capturan nuevamente el CO₂ de la atmósfera y, al usar la biomasa en forma sostenible, en términos netos, no se agrega CO₂ a la atmósfera, lo que se denomina “ciclo cerrado del carbono”. De hecho, la cantidad de carbono secuestrado puede ser mayor que la del liberado durante la combustión debido a que muchos de los cultivos son permanentes, al utilizar sólo una parte de la planta (FOCER, 2002).

Dentro de las ventajas que presenta la utilización de la biomasa como combustible alternativo se encuentran, que su combustión produce menos ceniza que la del carbón mineral y puede usarse como fertilizante en los suelos. Éste es un recurso local que no está sujeto a las fluctuaciones de precios en el mercado internacional. En países en desarrollo, como es el caso de Chile, su uso reduciría la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo (Daphnia, 2001).

Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía, se requieren grandes volúmenes para producir una determinada potencia, en comparación con los combustibles fósiles, por lo que el transporte y manejo se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave para este problema es poder implementar el sistema de bonos de carbono como una forma de financiamiento (FOCER, 2002).

Industria Cementera.

El cemento, cuyo proceso de fabricación demanda mucha energía y emite enormes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, se produce en más de 80 países. Se estima que la industria cementera consume alrededor del 2% del total de energía primaria que se consume en el mundo o casi un 5% del consumo total global de energía para fines industriales (Grupo ERAtech Inc, 2004a).

Los principales contaminantes emitidos a la atmósfera durante la producción de cemento son: a) partículas, provenientes de las operaciones de almacenamiento, transporte y manipulación de los materiales pulverulentos presentes en la fábrica y de los filtros de captación de polvo, b) CO₂ proveniente de los gases de combustión y de la descarbonatación de las materias primas y c) gases propios de combustión como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO₂). Además de estos y, en función del tipo de materia prima, combustible utilizado en el horno y condiciones de operación, se pueden emitir compuestos como metales, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, compuestos de cloro y flúor (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2003).

Durante el proceso de fabricación de cemento pueden diferenciarse tres etapas básicas: obtención y preparación de materias primas (caliza, arcilla, marga) que son finamente molidas para obtener crudo. La segunda es que el crudo se calcina en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450 °C (2.000 °C de temperatura de llama) para la obtención de un producto semi-elaborado denominado clinker. Así se da paso a la tercera etapa, que es mezclar y moler este compuesto con otros productos como yeso y otras adiciones, para obtener finalmente el cemento (Greenpeace, 2002).

La producción de cemento es un proceso químico en el que las materias primas son íntimamente mezcladas con los gases de combustión. Este contacto no origina, sin embargo, cantidades apreciables de contaminantes en los gases emitidos, ya que la mayor parte de las sustancias potencialmente contaminantes son absorbidas por el producto, e integradas en él de una manera químicamente estable (Cachán, 2000).

El principal foco de emisión de gases a la atmósfera es la chimenea del horno de clinker proveniente del proceso de descarbonatación. Estas emisiones están asociadas a las reacciones físicas y químicas de las materias primas procesadas y de los combustibles empleados para la cocción, siendo diversas las variables que afectan al régimen de emisión. Dentro de estas variables, destacan entre otras, las propiedades de las materias primas y la tipología de sistema de horno empleada (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2003).

La planta de Cementos Bío Bío, ubicada en Teno, actualmente, utiliza 2 tipos de carbón (mineral y de petróleo). Llegan a la planta en camiones tolva de diversa capacidad, encarpados de acuerdo a la normativa vigente, y son almacenados al interior de la planta en los lugares asignados a estos combustibles. La incorporación al proceso parte desde el acopio en la nave central (Estudios y Gestión Ambiental S.A, 2002).

Desde la zona de acopio son extraídos los carbones y son depositados en un plato dosificador donde se ajusta la mezcla de carbón deseada. La mezcla de carbón es introducida en el molino de carbón, donde se muele finamente.

El quemador principal del horno inyecta el carbón molido junto con aire en la zona más baja del horno (zona de descarga del clinker), donde se produce la combustión. Los gases calientes pasan a través de todo el horno y posteriormente ingresan a un sistema de ciclones, donde se utilizan para pre calentar el crudo (materia prima) que ingresará al horno. Posteriormente los gases ingresan al molino de crudo donde también es utilizada su energía para evaporar el agua contenida en la materia prima. Desde el molino, previo despolvamiento en dos ciclones, los gases entran al precipitador electrostático, donde es recuperado el remanente del material particulado de la corriente gaseosa. Finalmente, los gases ingresan a una chimenea desde donde son emitidos al medio.

El material particulado, retenido tanto en los ciclones como en el precipitador electrostático, es incorporado nuevamente al proceso productivo.

Al horno, ingresa el crudo que está constituido por una mezcla de caliza, arena silícica, mineral de hierro y polvo recuperado, en proporciones tales que permitan cumplir con la calidad requerida para los distintos tipos de cementos a producir. El

crudo se calienta hasta llegar a la temperatura de fusión incipiente (parte del material se funde mientras el resto continúa en estado sólido), para que se produzcan las reacciones químicas que dan lugar a la formación de compuestos mineralógicos del clinker. La temperatura de clinkerización fluctúa entre 1.400 a 1.500 °C.

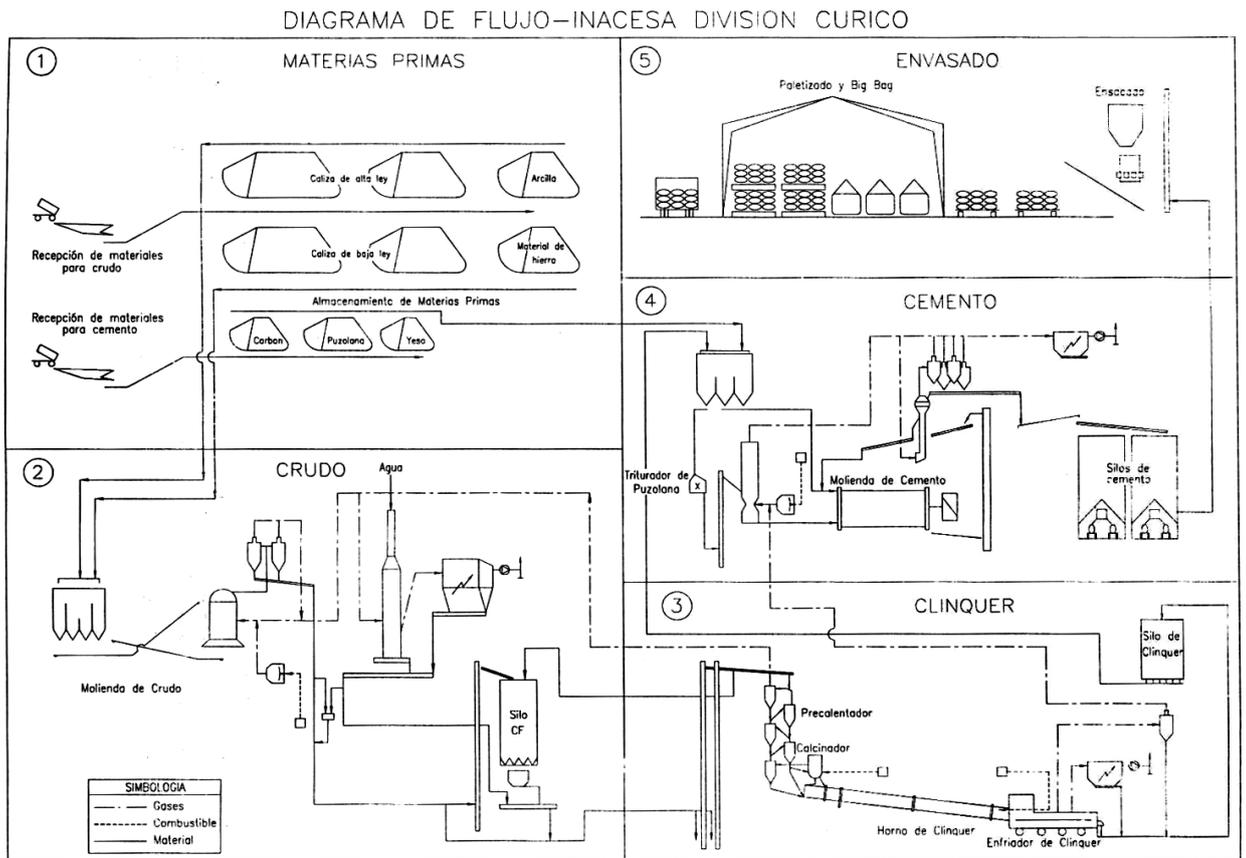
A medida que el crudo avanza por los ciclones precalentadores y por el horno (en contracorriente a los gases), va sufriendo diversas transformaciones:

- Secado o pérdida del agua libre.
- Deshidratación o pérdida del agua combinada.
- Disociación de carbonato de calcio en cal (CaO) y anhídrido carbónico.
- Clinkerización o combinación de los diferentes óxidos para formar silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio.

El clinker que sale del horno, es sometido a otras etapas, para finalmente ser despachado como cemento. Todo este proceso se encuentra graficado en la figura 2 que se presenta a continuación.

Por otro lado, cabe señalar que en el horno rotatorio, el azufre contenido en las materias primas y en el combustible se oxida bajo la forma de dióxido de azufre (SO₂), a temperatura sobre los 1.000 °C, en presencia de exceso de aire. Este compuesto reacciona con los álcalis que se volatilizan simultáneamente formando sulfatos alcalinos, con menos volatilidad y que se descargan del horno con el clinker o se reincorporan al polvo que ingresa al proceso. El SO₂ restante en los gases dentro del horno, puede en presencia de oxígeno, reaccionar con el CaCO₃ del crudo y también con el CaO formado por el calentamiento anterior, dando sulfato cálcico (CaSO₄) (Labahn, 1985).

La implementación de cualquier programa de combustibles alternativos generará una compensación por CO₂ (Grupo ERAtech Inc, 2004a).



Sustitución de Combustible

Reaprovechar energéticamente la biomasa desechada mediante su utilización como combustible alternativo, sustituyendo parcialmente en sus hornos a los combustibles primarios fósiles (petcoke, carbón, fuel-oil, etc.) constituye una contribución medioambiental que la industria cementera puede potenciar de forma sustancial en el ahorro de recursos naturales en su proceso de fabricación del cemento. Esta es una práctica habitual, desde hace muchos años, y que cuenta con el apoyo de las autoridades medioambientales de los países en las cuales se ha desarrollado (Grupo ERAtech Inc, 2002).

Más de 200 cementeras en todo el mundo utilizan combustibles alternativos. La valorización de residuos en hornos industriales, en especial de cemento, es una técnica fuertemente implantada en los países desarrollados; en particular, el uso de los residuos como alternativa a los combustibles fósiles convencionales es una práctica habitual que ha sido ampliamente ensayada en los países industriales (Murcia, 2004).

El proceso de fabricación de cemento es ideal para usar combustibles derivados de desechos debido a su gran demanda de energía, la alta temperatura y al prolongado tiempo de retención de gases que se produce en el horno para cemento (Cembureau, 2004).

Las altas temperaturas y largos tiempos de residencia inherentes al proceso cementero suponen un alto potencial para la destrucción de compuestos orgánicos, lo que posibilita la utilización de una amplia variedad de combustibles, subproductos de otros procesos industriales o derivados de residuos, tanto líquidos como sólidos. Mientras el poder calorífico del flujo de desechos se utiliza como combustible se logra la destrucción total de todo el material (Cachán, 2000).

Concepto de Adicionalidad

La Conferencia de las Partes sobre su Séptimo Período de Sesiones celebrada en Marrakech en el año 2001, define que una actividad o proyecto del MDL tendrá carácter de adicionalidad, si la reducción de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero por las fuentes es superior a la que se produciría de no realizarse la actividad de proyecto MDL registrada (UNFCCC, 2002a).

Si las emisiones que ocurren en la situación contemplada por la línea base son mayores que las emisiones verificadas para la situación con proyecto (existe una reducción de emisiones), entonces el proyecto es adicional, es decir, puede considerarse como un proyecto reductor de emisiones (Beaumont, 1999).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar el objetivo de esta memoria se contó con el patrocinio de la empresa. Se trabajó sobre la base de datos reales entregados por ésta. La metodología se basó, principalmente, en realizar un diagnóstico de la situación actual de la planta cementera, estimar el tipo y cantidad de combustible utilizado, el sistema de combustión y las emisiones asociadas al proceso productivo. Además de un estudio del potencial uso de combustible alternativo, en este caso la biomasa.

Materiales

Para obtener la información mencionada se entrevistó a personas involucradas en el tema, se revisaron sitios Web nacionales e internacionales a través de INTERNET, y se utilizaron las siguientes fuentes de información:

- Protocolo de Kyoto y Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- Páginas Web relacionadas al sector (UNFCCC, CONAMA, EPA, IPCC, entre otros).
- PDD (Project Designed Document) de proyectos ya aprobados.
- Información proporcionada por la empresa.
- Otros documentos relacionados al tema.
- Planillas de cálculo, Excel.

Método

Objetivo 1: Análisis de la información por la empresa respecto al consumo energético y tipos de combustibles utilizados.

Se analizó la información proporcionada por la empresa sobre los requerimientos energéticos del proceso, exactamente de la producción de clinker. Para esto se consideró el rendimiento térmico, las kilocalorías necesarias para producir un kilogramo de clinker y el poder calorífico de los distintos combustibles a utilizar. Se realizó un estudio sobre la factibilidad técnica de sustitución de carbón por biomasa. Según información entregada por la empresa no existen problemas técnicos para cargar el horno con este combustible.

Por razones de seguridad de la empresa la sustitución de combustible, en términos energéticos, será sólo parcial. De la energía total requerida una mitad va a ser proporcionada por carbón y la otra por biomasa. Las características del horno permiten la utilización de biomasa sin necesidad de adaptaciones, por lo que no existen problemas técnicos para realizar esta sustitución¹.

Considerando las razones de seguridad y logística de la empresa se definió que la sustitución será sólo parcial, comprendiendo un 50% del requerimiento energético total de la empresa. Además con el poder calorífico estándar de la biomasa y el crecimiento anual de la empresa se determinó el volumen de biomasa y carbón necesario para alcanzar la potencia que requiere el proceso.

¹ Gustavo Chiang, Gerente Área Optimización, Cementos Bío Bío, Enero 2004, Teno, Chile. (Comunicación personal).

Objetivo 2: Establecer la cantidad, calidad y localización de los recursos biomásicos potencialmente disponibles en la región.

Este análisis se basó en un estudio previo realizado por INTEC para la empresa Cementos Bío Bío.

Se efectuó un listado de empresas existentes en la zona que generan este tipo de residuos considerando los siguientes aspectos:

- Definición de zonas o centros de mayor concentración de la oferta.
- Definición de volúmenes de generación, mensuales y anuales, en las zonas seleccionadas.

Según la información presente en el inventario, entregada por las mismas empresas, se seleccionaron las que tienen un mayor volumen de biomasa generada. Otro criterio utilizado para realizar la selección es la continuidad de la producción, porque al ser la mayoría empresas agrícolas, su producción es estacional, no coincidiendo siempre con la periodicidad de la demanda de la planta. Cumpliendo estos criterios, fueron elegidas las cáscaras de arroz y los residuos de madera como combustibles de sustitución. El nombre genérico de cáscara de arroz incluye la cáscara y paja de arroz y los residuos de madera se refieren principalmente a virutas, aserrín y despunte.

Este inventario abarcó sólo las regiones VI y VII por ser las más cercanas a la planta.

Objetivo 3: Estimación del costo de adquisición, transporte, tratamiento y almacenaje de la biomasa a utilizar.

Una vez determinadas las características, ubicación y el volumen necesario para la biomasa a utilizar, se estimó el costo de adquisición y transporte.

El precio de los residuos biomásicos fue entregado por las mismas empresas productoras. Para estimar el costo de transporte se realizó un sondeo en el mercado local y se estableció una distancia promedio para la VI y VII Región de 100 y 50 km respectivamente.

Según las características de la biomasa seleccionada, se determinó que no es necesario realizar tratamientos previos, ni almacenar la biomasa.

Objetivo 4: Simulación de mercado basado en repuestas potenciales del precio de los residuos biomásicos frente a un aumento de demanda.

Debido a la falta de información y de datos históricos de demanda y precio, se realizaron escenarios tomando en cuenta tres respuestas posibles frente a la naciente demanda creada por el poder comprador de esta industria.

Estos escenarios se determinaron de la siguiente manera:

1. El precio de los residuos biomásicos subiría proporcionalmente igual con el aumento de demanda creada por este poder comprador.

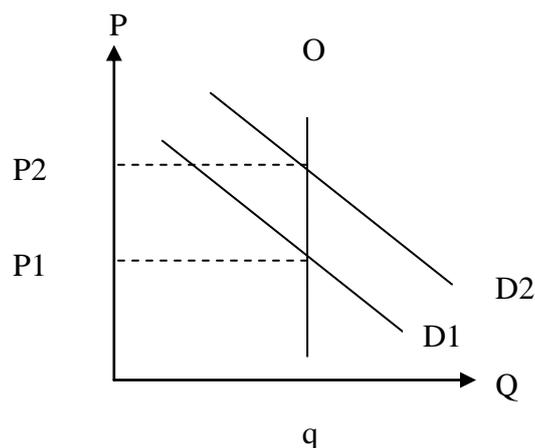


Figura 3: Curva de oferta perfectamente inelástica y demanda en elasticidad unitaria.

2. El precio de los residuos biomásicos se mostraría insensible frente al aumento de demanda (caso en que esta nueva demanda represente volúmenes insignificantes respecto de las transacciones actuales).

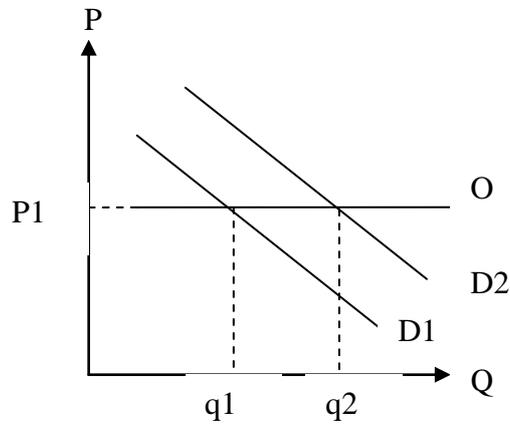


Figura 4: Curva de oferta perfectamente elástica y demanda en elasticidad unitaria.

3. El precio de los residuos biomásicos subiría menos que proporcionalmente con el aumento de demanda creada por este poder comprador.

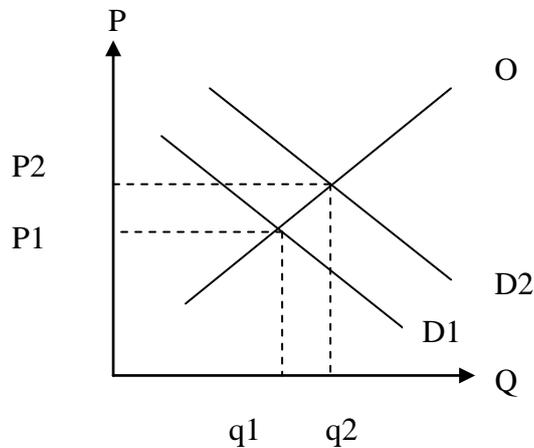


Figura 5: Curva de oferta con menor elasticidad respecto a la demanda.

Según la ley de la demanda decreciente, la cantidad demandada tiende a variar inversamente al precio. A menudo se quiere saber cuánto variaría la respuesta a una variación del precio. La elasticidad-precio de la demanda mide cuánto varía la cantidad demandada de un bien cuando varía su precio.

Las demandas de bienes se diferencian por sus elasticidades. Un bien es elástico, cuando su cantidad demandada responde significativamente a las variaciones del precio, es decir, cuando la variación del precio de un 1% provoca una variación de la cantidad demandada superior a ese porcentaje, se tiene una demanda elástica respecto al precio. En cambio, un bien es inelástico, cuando su cantidad demandada apenas responde a las variaciones del precio, cuando una variación del precio de un 1% provoca una variación de la cantidad demandada inferior a ese porcentaje, se tiene una demanda inelástica respecto al precio.

La elasticidad-precio en curvas de demandas lineales va desde cero a infinito a lo largo de la curva. En el punto medio de la curva de demanda, se encuentra el caso límite de la demanda de elasticidad unitaria, que se produce cuando la variación porcentual de la cantidad es exactamente de la misma magnitud que la variación porcentual del precio.

Según los economistas, la elasticidad-precio de la oferta es la sensibilidad de la cantidad ofrecida de un bien a su precio de mercado. Más concretamente, la elasticidad-precio de la oferta mide la variación porcentual que experimenta la cantidad ofrecida en respuesta a una variación del precio del bien de un 1%.

En el caso límite de una oferta totalmente inelástica, es decir, de una curva de oferta vertical, la cantidad ofrecida es totalmente fija, independiente del precio que pueda alcanzar.

En el otro extremo, que una mínima reducción del precio reduce a cero la cantidad ofrecida y que una subida mínima del precio atrae una oferta infinitamente grande. En este caso, el cociente entre la variación porcentual de la cantidad ofrecida y la variación porcentual del precio es extraordinariamente grande y da lugar a una curva de oferta horizontal. Este es el caso extremo de la oferta infinitamente elástica.

Entre esos dos extremos, se dice que la oferta es elástica o inelástica, dependiendo de que el aumento porcentual de la cantidad sea mayor o menor que la variación porcentual del precio. En el caso límite de la elasticidad unitaria, en el que la elasticidad-precio de la oferta es igual a 1, el aumento porcentual de la cantidad ofrecida es exactamente igual al aumento de porcentual del precio (Samuelson et al, 1995).

Objetivo 5: Análisis del efecto de sustitución de combustible, según estándares ambientales internacionales y las emisiones potencialmente reducibles.

- La estimación de CO₂ y de otros gases liberados actualmente, no sólo considera las emisiones provenientes de la combustión del carbón propiamente tal, sino que también, incluye las emisiones del transporte del carbón desde los puertos hasta la planta y las emisiones de la quema agrícola y de la descomposición de los desechos forestales.

Todas estas estimaciones utilizaron los estándares del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

- Las emisiones provenientes de la situación con el proyecto de sustitución energética, incluyen los gases liberados de la combustión de la fracción de carbón y de biomasa. Del mismo modo que el caso anterior este cálculo contempla las emisiones provenientes del transporte del carbón y de la biomasa desde su ubicación hasta la planta.

Todas estas estimaciones utilizaron los estándares del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

- Para calcular las toneladas de CO₂ potencialmente reducibles, se utilizaron los Potenciales de Calentamiento Global de cada gas de efecto invernadero emitido, para determinar la cantidad de toneladas de CO₂ eq. Luego se realizó una sustracción entre las toneladas de CO₂ eq emitidas en la situación actual y las emitidas en la situación con proyecto, obteniendo las toneladas potencialmente reducibles.

Objetivo 6: Evaluación de la adicionalidad del proyecto de sustitución energética y de la compensación de bonos de carbono.

La adicionalidad se demuestra a través del establecimiento de un escenario hipotético de línea base para la situación normal, emisiones estimadas en ausencia del proyecto. Este escenario base se comparó con las emisiones estimadas anteriormente y se verificó si existe una reducción real, medible y que genere beneficios a largo plazo en relación con la mitigación del cambio climático.

Para realizar la compensación de los bonos de carbono consideran las toneladas de CO₂ equivalente potencialmente reducibles y el precio en que se transan en el mercado internacional, además de los costos asociados a dicha transacción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del proceso productivo respecto al consumo energético

Como ya se mencionó anteriormente, una de las etapas de la fabricación de cemento es la calcinación del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450 °C para la obtención de un producto semi-elaborado denominado clinker. En la Planta de Cementos Bío Bío la producción actual es de 350.000 toneladas anuales y se proyecta un nivel de crecimiento anual de 4%.

Según información proporcionada por la empresa, la planta cuenta con un rendimiento térmico de 810 Kcal/ Kg clinker, es decir, para lograr la obtención de un kilogramo de clinker es necesario disponer de 810 Kcal, las que actualmente son alcanzadas por la combustión de una mezcla de distintos carbones. En el Cuadro 1 se resume información relevante sobre los combustibles actualmente utilizados por la empresa.

Cuadro1: Combustibles utilizados por la empresa, precio unitario y dosificación.

	P C (Kcal/Kg)	US\$/ t	Dosificación (%)
Catamotun	7.009	66,50	25
ENACAR Mejorado	7.320	58	25
Petcoke	8.900	45	50

Fuente: Cementos Bío Bío, 2004.

Para estimar el poder calorífico de la mezcla de combustibles es necesario realizar una ponderación entre la dosificación y el poder calorífico de cada uno de estos carbones, dando como resultado Cuadro 2.

Cuadro 2: Aporte calorífico de los combustibles (Kcal/ Kg mezcla).

Carbón	Aporte Calorífico
Catamotun	1.752,25
ENACAR Mejorado	1.830
Petcoke	4.450
Mezcla	8.032,25

Para determinar la cantidad demandada de cada combustible se debe considerar la producción anual de clinker y la cantidad de energía necesaria para alcanzarla.

La empresa cuenta con un crecimiento anual de un 4%, de la producción de clinker en un plazo de 10 años. Esto hará crecer la demanda de combustible y las emisiones de los distintos gases en la misma proporción.

En el caso actual, sin sustitución de combustible, todo el requerimiento energético es proporcionado por el carbón. Para determinar su volumen se considera la cantidad de energía demandada y el poder calorífico de la mezcla que es de 8.032 Kcal/ Kg. En el caso donde existe sustitución energética del 50%, la energía total se divide por la mitad y se estima la cantidad de carbón y biomasa necesitada, considerando un poder calorífico de 8.032 Kcal/ Kg y de 3.900 Kcal/ Kg² respectivamente.

En el Cuadro 3 se especifica la demanda de combustible para las dos situaciones en un plazo de 10 años.

² World Bank, 2004.

Cuadro 3: Requerimiento anual de combustibles (t/ año).

		Sin Sustitución	Con Sustitución	
Año	Producción Clinker	Carbón	Carbón	Biomasa
1	350.000	35.295,22	17.647,61	36.346,15
2	364.000	36.707,02	18.353,51	37.800,00
3	378.560	38.175,31	19.087,65	39.312,00
4	393.702,4	39.702,32	19.851,16	40.884,48
5	409.450,50	41.290,41	20.645,21	42.519,86
6	425.828,52	42.942,03	21.471,01	44.220,65
7	442.861,66	44.659,71	22.329,85	45.989,48
8	460.576,12	46.446,10	23.223,05	47.829,06
9	478.999,17	48.303,94	24.151,97	49.742,22
10	498.159,13	50.236,10	25.118,05	51.731,91
Total	4.202.137,49	423.758,15	211.879,07	436.375,82
Promedio	420.213,75	42.375,81	21.187,91	43.637,58

Biomasa potencialmente disponible en la región

La empresa dispone de un catastro (año 2000) de las principales empresas generadoras de todo tipo de residuos biomásicos con valor energético, abarcando sólo la VI y VII Región por ser las más cercanas a la planta.

En conjunto, las empresas productoras de cáscara de arroz, todas ubicadas en la VII Región, producen mensualmente 1.410 toneladas y 16.920 toneladas al año.

En la VI y VII Región se localizan las empresas generadoras de los residuos de la madera, que incluyen principalmente, aserrín, virutas y cortezas.

La VI Región aporta 94 toneladas mensuales y 1.128 anuales, y la producción mensual de la VII Región es 1.593 toneladas y 19.116 toneladas anuales, lo que da como resultado total mensual 1.687 toneladas y 20.244 toneladas anuales.

Resumiendo, se cuenta con una disponibilidad total anual de 37.164 toneladas de biomasa, lo que satisface la demanda anual de la planta que es de 36.346 toneladas.

Estimación del costo de adquisición, transporte, tratamiento y almacenaje de la biomasa a utilizar

El costo de tratamiento no es estimado ya que las características del horno y de la biomasa a utilizar, no hacen necesario efectuar un tratamiento especial. El almacenamiento tampoco fue considerado porque la demanda de biomasa genera un flujo continuo.

En el caso del carbón, aunque la llegada del material es continua durante la época de producción de cemento, es necesario realizar un acopio para lograr alcanzar la proporción adecuada de los distintos carbones de la mezcla.

Como ya es conocida la cantidad de biomasa a utilizar anualmente es preciso realizar un análisis de los costos de adquisición y transporte para determinar realmente la opción más conveniente a utilizar, para lo cual es necesario tomar en cuenta los valores presentes en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Precio y densidad de residuos disponibles.

Residuo	US\$/ t	US\$/ m³	Densidad (t/ m³)
Madera	2	1	0,5
Cáscara de Arroz	3,3	0,5	0,16

Fuente: INTEC, 2000.

Para determinar el costo de transporte se toma como referencia una distancia promedio de 100 km para la biomasa disponible en la VI Región y 50 km para la que está en la VII Región.

Mediante un sondeo local de empresas de transporte se determinó que el valor promedio, que cobra un camión con capacidad de 50 m³, es de \$90.000 por una distancia de 50 km y \$170.000 por 100 km.³

Si se multiplica la capacidad de carga del camión por la densidad de los residuos, se obtiene la cantidad de toneladas de cada combustible que puede transportar dicho camión. En el caso de la cáscara de arroz un camión puede transportar 8 toneladas y de residuos de madera 25 toneladas.

Teniendo estas cifras se puede obtener, mediante la división del precio del viaje, según el kilometraje recorrido, por la cantidad de toneladas que transporta de cada combustible, el costo de cada tonelada transportada.

Para determinar la opción más conveniente de sustitución se estima el precio total de la tonelada, el costo de adquisición más el costo de transporte, y luego se transforma a dólar considerando un valor de \$638⁴, estos valores se encuentran en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Costos de los distintos residuos.

Residuo	Costo Transporte (\$/t)	Costo Adquisición (\$/t)	Costo Total (\$/t)	Costo (US\$/t)
Cáscara Arroz	11.250	2.105,40	13.355,40	20,93
Madera VI Región	6.800	1.276	8.076	12,66
Madera VII Región	3.600	1.276	4.876	7,64

Se puede apreciar que los costos de los residuos de madera son considerablemente más bajos en comparación con los de la cáscara de arroz. Es necesario determinar la disponibilidad de cada uno de ellos para establecer la relación más conveniente.

³ Sergio Cabello, Transportes Cabello. Mayo 2004. Santa Cruz, Chile. (Comunicación Personal)

⁴ Fecha de observación, 20 de Abril de 2004.

La disponibilidad de los residuos de madera de la VII Región es de 16.920 toneladas anuales que alcanzan a cubrir un 50% de la demanda energética. La cantidad de residuos de madera provenientes de la VI Región es de 1.128 toneladas anuales correspondiendo a un 6% del total de la demanda y la cáscara de arroz cubre la demanda restante, que es de 44%.

Considerando un requerimiento energético de 810 Kcal por cada kilogramo de clinker y una producción, con un crecimiento histórico anual de 4% y, suponiendo que las empresas proveedoras de estos residuos crecen a una tasa de 4%, se asegura la existencia de estos residuos y el abastecimiento de la planta de cementos. El cálculo se realiza considerando la proporción anteriormente mencionada y los precios actuales de cada uno de estos residuos dando como resultado el Cuadro 6.

Cuadro 6: Estimación del costos de la biomasa (US\$/ año).

Año	Biomasa (t/ año)	Costo (US\$/ año)
1	36.346,15	501.265,59
2	37.800,00	521.316,27
3	39.312,00	542.168,92
4	40.884,48	563.855,68
5	42.519,86	586.409,92
6	44.220,65	609.866,25
7	45.989,48	634.260,96
8	47.829,06	659.631,41
9	49.742,22	686.016,63
10	51.731,91	713.457,31
Total	436.375,81	6.018.248,94
Promedio	43.637,58	601.824,89

Además, el abastecimiento de la planta podría estar asegurado si se considera la posibilidad que haya interesados en producir biomasa con fines energéticos en los alrededores de la planta, al crearse este nuevo mercado para ella, se puede generar una nueva tendencia de desarrollo de cultivos dendroenergéticos.

En el Cuadro 7 se comparan los dos escenarios, con y sin sustitución energética, en cuanto a la inversión anual en concepto de combustible durante un período de 10 años. Se considera el gasto del carbón en la situación actual y la compra, tanto del carbón como de la biomasa en la situación con proyecto.

Cuadro 7: Costos de Combustibles (US\$/ año).

Año	Carbón	Carbón y Biomasa	Diferencia
1	1.892.706,17	1.447.618,68	445.087,49
2	1.968.413,95	1.505.523,24	462.890,70
3	2.047.151,00	1.565.744,15	481.406,85
4	2.129.036,91	1.628.374,13	500.662,78
5	2.214.198,24	1.693.509,30	520.688,93
6	2.302.766,36	1.761.249,16	541.517,19
7	2.394.876,95	1.831.699,16	563.177,78
8	2.490.672,11	1.904.967,46	585.704,65
9	2.590.298,78	1.981.166,02	609.132,76
10	2.693.910,86	2.060.412,74	633.498,12
Total	22.724.031,33	17.380.264,07	5.343.767,26
Promedio	2.272.403,13	173.802.640	534.376,73

Del Cuadro 7 se puede inferir, que en el escenario sin sustitución el costo del combustible sigue siendo mayor a pesar de la menor cantidad de combustible demandada.

Simulación de mercado basado en respuestas potenciales del precio de los residuos biomásicos frente a un aumento de la demanda

Una vez hecho el análisis, se puede determinar que la sustitución es económicamente rentable puesto que genera una diferencia positiva en el costo de adquisición de los combustibles. Producto de esta diferencia es que el precio de los residuos biomásicos puede variar significativamente, sin afectar la decisión de

sustitución. Es por esto que la demanda que se enfrentará, de residuos biomásicos, será inelástica, puesto que los precios pueden variar positivamente y la cantidad de producto demandada no se verá afectada. El nivel de ahorro que generará la sustitución es tan alto, que el precio de los residuos biomásicos puede duplicarse, sin verse afectada la cantidad demandada.

Esto se puede demostrar con la diferencia que existe entre los valores medios de cada combustible, una tonelada de carbón tiene como precio 53,63 dólares y una tonelada de biomasa 13,79 dólares, casi cuatro veces menor que el precio del carbón.

Análisis del efecto de la sustitución de combustible según estándares ambientales internacionales

Estimación de las emisiones provenientes de la combustión del carbón.

Para estimar la cantidad real de emisiones que se liberan a la atmósfera es necesario tomar en cuenta el crecimiento anual de la empresa, ya que todos los años va a aumentar la producción de clinker y consiguientemente la demanda de combustible, generando una mayor cantidad de emisiones. En el Cuadro 8 se muestra la producción y demanda anual de carbón.

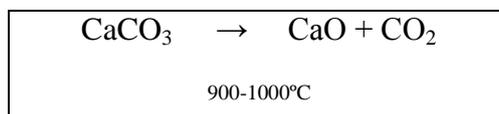
La estimación de las emisiones de los distintos gases, se realiza mediante balances de masa de los distintos compuestos presentes en la mezcla de carbón utilizada como combustible.

Cuadro 8: Producción de clinker y demanda de carbón sin sustitución energética (t/año).

Año	Producción	
	Clinker	Carbón
1	350.000	35.295,22
2	364.000	36.707,02
3	378.560	38.175,31
4	393.702,4	39.702,32
5	409.450,50	41.290,41
6	425.828,52	42.942,03
7	442.861,66	44.659,71
8	460.576,12	46.446,10
9	478.999,17	48.303,94
10	498.159,13	50.236,10
Total	4.202.137,49	423.758,15
Promedio	420.213,75	42.375,81

1. Balance de Carbono

Debido al uso predominante de combustibles fósiles intensivos en carbono, como por ejemplo el carbón, la industria cementera emite grandes cantidades de CO₂. Además del consumo de energía, la producción de clinker también emite CO₂ debido al proceso de calcinación donde se descompone el CaCO₃ en CaO y en CO₂, alcanzando un 60% de las emisiones liberadas por el horno. Cabe mencionar que estas fuentes son esencialmente independientes unas de otras.



Para efectos de realizar el balance de carbono no se consideran las emisiones provocadas por la descomposición del carbonato cálcico, ya que la liberación del CO₂ gaseoso va a permanecer constante, independiente del combustible utilizado.

En el Cuadro 9 se muestra el contenido de carbono presente en cada uno de los carbones utilizados por la planta actualmente.

Cuadro 9: Contenido de carbono en los distintos carbones (%).

Carbón	C
Catamotun	47,51
ENACAR Mejorado	58,30
Petcoke	85,20

Fuente: Universidad de Concepción, 2000.

Considerando la dosificación de cada carbón utilizado y su contenido de carbono se establece que la mezcla de combustible contiene un 69,45% de carbono.

Si se toma en cuenta que la concentración de C en el CO₂ es de 27,27%, se asume que todo el carbono contenido en el carbón se emite en forma de CO₂, se obtiene la emisión anual durante 10 años, que se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Emisión de CO₂ (t/ año).

Año	Carbono	Emisión CO₂
1	24.512,53	89.888,26
2	25.493,03	93.483,79
3	26.512,75	97.223,14
4	27.573,26	101.112,06
5	28.676,19	105.156,55
6	29.823,24	109.362,81
7	31.016,17	113.737,32
8	32.256,81	118.286,81
9	33.547,09	123.018,29
10	34.888,97	127.939,02
Total	294.300,03	1.079.208,04
Promedio	29.430,00	107.920,80

2. Balance de azufre.

En la fabricación de cemento el azufre entra en el proceso como componente de los combustibles y de las materias primas, en forma de sulfatos o sulfuros. El azufre que entra como sulfuro en las materias primas es parcialmente evaporado, aproximadamente un 30%, en las primeras etapas del proceso, y emitido a la atmósfera en su mayor parte.

La emisión de SO₂, es abatida en el proceso de clinquerización dado, que el azufre contenido en la materia prima y en los combustibles, reacciona en el horno con la sílice, los álcalis y la cal, siendo absorbido en el clinker aproximadamente un 88%. La experiencia práctica demuestra que en el horno de Cementos Bío Bío S. A. C. I., la absorción es mucho mayor, alcanzando un 96%.

La estimación de las emisiones considera sólo el azufre ingresado en el combustible ya que el que ingresa en el crudo va a permanecer inalterado.

En el Cuadro 11 se muestra el contenido de azufre presente en cada uno de los carbones utilizados, actualmente, como combustible por la planta cementera.

Cuadro 11: Contenido de azufre en los carbones (%).

Carbón	Azufre
Catamotun	1,22
ENACAR Mejorado	0,88
Petcoke	1,12

Fuente: Universidad de Concepción, 2000

Para determinar el azufre que ingresa en el combustible se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_{\text{comb}} = \%S_{\text{comb}} * M_{\text{comb}}$$

Donde:

S comb : Azufre que ingresa al sistema (t/ año).

%S comb : Concentración de azufre en el combustible (%).

M comb : Cantidad de carbón utilizado (t/ año).

Se calcula la proporción de azufre presente en los combustibles según su dosificación dentro de la mezcla, resultando ser de 1,09%.

Luego de obtener la cantidad de azufre que ingresa al sistema a través de los combustibles, es necesario establecer las siguientes relaciones para obtener la producción de SO₂.

$$\begin{aligned} & \% \quad \% S / 0,4 \\ \text{SO}_3 &= \\ & \% \quad \% \text{SO}_3 * 0,8 \end{aligned}$$

Una vez estimadas las SO₂ = toneladas de SO₂ producidas se considera una retención de 96% y, por lo tanto, una emisión a la atmósfera del 4% del total de SO₂ producido. En el Cuadro 12 se presenta la emisión anual.

Cuadro 12: Emisión anual de SO₂ (t/ año)

Año	Azufre	SO ₃	SO ₂	Emisión SO ₂
1	382,95	957,38	765,91	30,64
2	398,27	995,68	796,54	31,86
3	414,20	1.035,51	828,40	33,14
4	430,77	1.076,93	861,54	34,46
5	448,00	1.120,00	896,00	35,84
6	465,92	1.164,80	931,84	37,27
7	484,56	1.211,39	969,12	38,76
8	503,94	1.259,85	1.007,88	40,32
9	524,10	1.310,24	1.048,20	41,93
10	545,06	1.362,65	1.090,12	43,60
Total	4.597,78	11.494,44	9.195,55	367,82
Promedio	459,78	1.149,44	919,56	36,78

3. Balance de Nitrógeno (NOx)

Los óxidos de nitrógeno son generados durante la combustión como consecuencia de la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible y a la fijación térmica del

nitrógeno contenido en el aire de combustión. En las plantas cementeras, su generación resulta inevitable dadas las altas temperaturas del proceso.

Para efectos de este balance sólo se analiza la emisión proveniente de la oxidación del nitrógeno orgánico contenido en los combustibles. No se considera el nitrógeno comprendido por el exceso de aire en el proceso, ya que su consumo no es afectado por el tipo de combustible utilizado.

El nitrógeno presente en el carbón es de 0,78% y la concentración estequiométrica de N en NO_x es de 30%, según el IPCC se emplea el NO_2 como molécula de referencia para este caso.

Se determina la cantidad de nitrógeno que entra al sistema en el combustible mediante la siguiente fórmula:

$$\text{N comb} = \% \text{ N carbón} * \text{M comb}$$

Donde:

N comb : Nitrógeno que ingresa al sistema (t/ año).

% N comb : Concentración de nitrógeno en el combustible (%).

M comb : Cantidad de combustible, carbón, requerido (t/ año).

Para estimar las emisiones de NO_x se considera la cantidad de nitrógeno presente en el sistema y la concentración de nitrógeno en los óxidos de nitrógeno. En el Cuadro 13 se muestran las emisiones anuales de NO_x .

Es importante destacar que este gas no es un GEI, se estima sólo para comparar su emisión en los distintos escenarios.

Cuadro 13: Emisión de NO_x anuales (t/ año).

Año	Nitrógeno	Emisión NO_x
1	275,30	917,68
2	286,31	954,38
3	297,77	992,56
4	309,68	1.032,26
5	322,07	1.073,55
6	334,95	1.116,49
7	348,35	1.161,15
8	362,28	1.207,60
9	376,77	1.255,90
10	391,84	1.306,14
Total	3.305,31	11.017,71
Promedio	330,53	1.101,77

4. Emisiones provenientes del transporte de combustible.

No se puede dejar de considerar que el carbón es transportado desde los puertos a la planta en camión y esta actividad genera emisiones de CO₂ que deben ser incluidas dentro de la estimación total de las emisiones.

Para realizar esta estimación se utilizó la metodología propuesta por MGM Internacional, en el Documento de Proyecto del cambio de combustible en la planta Nestlé ubicada en Graneros, Chile. Esta metodología ya fue aprobada por la Junta Ejecutiva del MDL en el año 2003.

Con el propósito de realizar los cálculos se asume que los tres carbones utilizados son transportados por el mismo camión. Se considera que éste tiene una capacidad de carga de 50 m³ y un rendimiento de 2 kilómetros por litro. Se utiliza una densidad promedio para los carbones de 0,7 t/ m³, por lo que se transportan 35 toneladas por viaje.

Con este método se obtienen los kilogramos de CO₂ emitidos por tonelada de carbón transportada. Para poder estimar la cantidad total emitida es necesario multiplicar este valor por la cantidad de cada carbón demandada durante los 10 años, la que se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14: Demanda de los distintos carbones (t / año).

Año	Catamotun	ENACAR	
		Mejorado	Petcoke
1	8.823,81	8.823,81	17.647,61
2	9.176,76	9.176,76	18.353,51
3	9.543,83	9.543,83	19.087,66
4	9.925,58	9.925,58	19.851,16
5	10.322,60	10.322,60	20.645,21
6	10.735,51	10.735,51	21.471,02
7	11.164,93	11.164,93	22.329,86
8	11.611,53	11.611,53	23.223,05
9	12.075,99	12.075,99	24.151,97
10	12.559,03	12.559,03	25.118,05
Total	105.939,54	105.939,54	211.879,08
Promedio	10.593,95	10.593,95	21.187,91

El método usado para este propósito es el siguiente:

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

Donde:

TFSC: Consumo específico de energía por carga del camión (l/ t).

DD: Densidad del petróleo = 0,849 Kg/ l.

CVD: Poder Calorífico Inferior de petróleo = 43,33 MJ/ Kg.

EFD: Factor de emisión de CO₂ proveniente del consumo de petróleo = 0,07407 Kg CO₂/MJ.

El TFSC es calculado mediante la distancia recorrida por el camión, consumo de combustible de éste y el total de toneladas de carbón transportadas (l/ t carbón). Por efecto de la distancia el TFSC va a ser distinto para cada carbón.

Para el caso del carbón Catamotun que es transportado desde el Puerto de Ventana hasta Teno el cálculo de las emisiones es el siguiente:

TFSC:

Distancia recorrida por el camión = 358 km distancia desde la planta a Ventanas.

Consumo de combustible por el camión = 2 km/l.

Consumo total de combustible por viaje = $(2 * 358) / 2 = 358$ l.

Toneladas de carbón transportadas por viaje = 35 t.

Consumo de combustible = $358 \text{ l} / 35 \text{ t} = 10,23 \text{ l} / \text{t}$.

$$\text{E Transporte (t de CO}_2\text{ / t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

E Transporte (t de CO₂ / t carbón) = 27,87 Kg de CO₂ por tonelada de carbón.

La cantidad de carbón Catamotun utilizado como combustible durante este período es de 105.939,54 toneladas, multiplicando se obtiene una emisión total de 2.952,65 toneladas de CO₂.

Para el carbón ENACAR Mejorado, que es traído desde Arauco, se repite el mismo procedimiento.

TFSC:

Distancia recorrida por el camión = 684 km.

Consumo de combustible por el camión = 2 km/l.

Consumo total de combustible por viaje = $(2 * 400) / 2 = 684$ l.

Toneladas de carbón transportadas por viaje = 35 t.

Consumo de combustible = $684 \text{ l} / 35 \text{ t} = 19,54 \text{ l} / \text{t}$.

$$\text{E Transporte (t de CO}_2\text{ / t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

E Transporte (t de CO₂ / t carbón) = 53,25 Kg de CO₂ por tonelada de carbón.

Para obtener la emisión de CO₂ se considera todo el carbón ENACAR Mejorado utilizado como combustible durante un período de 10 años que es de 105.939,54 toneladas, generando una emisión de 5.641,37 toneladas de CO₂.

Para el Petcoke, traído desde Talcahuano se repite el procedimiento realizado con los otros carbones.

TFSC:

Distancia recorrida por el camión = 400 km.

Consumo de combustible por el camión = 2 km/l.

Consumo total de combustible por viaje = (2 * 400) / 2 = 400 l.

Toneladas de carbón transportadas por viaje = 35 t.

Consumo de combustible = 400 l / 35 t = 11,43 l / t.

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

E Transporte (t de CO₂ / t carbón) = 31,14 kg de CO₂ por tonelada de carbón.

El total de la emisión de CO₂ proveniente del transporte de este carbón durante 10 años se obtiene por la multiplicación de la cantidad de Petcoke demandado durante este período que es de 211.879,07 toneladas y la relación existente entre los Kg de CO₂ emitidos por tonelada de carbón, dando un total de 6.598,1 toneladas.

En resumen, la emisión total de CO₂ proveniente del transporte de carbón durante 10 años es de 15.192,12 toneladas.

Para determinar por completo las emisiones del escenario actual, no se pueden dejar de considerar las emisiones provenientes del manejo actual de los distintos residuos de biomasa que se van a utilizar como combustible de sustitución. Estos manejos se refieren a la quema agrícola de la cáscara de arroz y a la descomposición de los residuos de madera.

5. Emisiones de gases efecto invernadero provenientes de la quema agrícola.

Cuando se producen quemas abiertas asociadas a prácticas agrícolas y forestales, son emitidos gases de efecto invernadero provenientes de la combustión, esta quema de biomasa produce principalmente emisiones de CO₂. Sin embargo, en este tipo de quema el CO₂ liberado no es considerado por ser una fuente de emisión neta, porque es reabsorbido durante el crecimiento de la siguiente biomasa durante la próxima estación. Sin embargo, producto de la combustión incompleta, la biomasa quemada es una fuente significativa de CH₄, CO, NO_x y N₂O (IPCC, 1996).

Sólo se estimarán las emisiones de CH₄ y óxido nitroso, gases de efecto invernadero que ocurren naturalmente (EPA, 2003).

Los cálculos de las emisiones se realizarán bajo el supuesto que, toda la cantidad de cáscara de arroz demandada para la sustitución de combustible, es quemada bajo prácticas agrícolas.

Según el IPCC, el primer paso para realizar la estimación de ambas emisiones es calcular la cantidad de carbono total liberado por la quema de biomasa, el cual se hará con la siguiente fórmula.

$$CL = B * FCB$$

CL : Carbono total liberado (t/año).

B : Cantidad de biomasa utilizada como combustible (t biomasa/ año).

FCB : Fracción de carbono presente en la biomasa (Valor por defecto del IPCC, 0,4 t C/ t biomasa).

En el Cuadro 15 se muestra la cantidad de carbono total liberado por la quema de biomasa durante un período de 10 años.

Cuadro 15: Carbono Total Liberado (t/ año).

Año	Cáscara de Arroz	Carbono Liberado
1	15.992,31	6.396,92
2	16.632,00	6.652,80
3	17.297,28	6.918,91
4	17.989,17	7.195,67
5	18.708,74	7.483,50
6	19.457,09	7.782,84
7	20.235,37	8.094,15
8	21.044,79	8.417,91
9	21.886,58	8.754,63
10	22.762,04	9.104,82
Total	192.005,36	76.802,14
Promedio	19.200,54	7.680,21

1. Emisiones de CH₄.

Las emisiones de CH₄, según el IPCC, se calculan con la siguiente fórmula:

$$CH_4 = CL * CCH_4 * FCM$$

CH₄ : Emisión anual de CH₄ (t CH₄/ año).

CL : Carbono Liberado (t C/ año).

C CH₄ : Relación de emisión para el CH₄ (Valor predeterminado por el IPCC, 0,5%).

FCM : Relación de conversión de los pesos moleculares (16/12, t CH₄/ t C).

Para determinar las toneladas de CO₂ equivalentes, se multiplican las toneladas de CH₄ liberadas anualmente por el Potencial de Calentamiento Global (PCG) para el caso del CH₄ es de 21 t CO₂ eq/ t CH₄, es decir, una tonelada de CH₄ equivale a 21 toneladas de CO₂.

$$CO_2 \text{ eq} = CH_4 * PCG$$

CO₂ eq: Toneladas anuales de CO₂ equivalente (t CO₂ eq/ año).

CH₄ : Emisión anual de CH₄ (t CH₄/ año).

PCG : Potencial de calentamiento global (21 t CO₂ eq/ t CH₄).

Las emisiones resultantes para 10 años se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16: Emisión de CO₂ eq (t/ año).

Año	Emisión CH ₄	CO ₂ eq
1	42,65	895,57
2	44,35	931,39
3	46,13	968,65
4	47,97	1.007,39
5	49,89	1.047,69
6	51,89	1.089,60
7	53,96	1.133,18
8	56,12	1.178,51
9	58,36	1.225,65
10	60,70	1.274,67
Total	512,01	10.752,30
Promedio	51,20	1.075,23

2. Emisiones de óxido nitroso.

Las emisiones de N₂O, según el IPCC, se calculan con la siguiente fórmula:

$$N_2O = CL * R N/C * RE * FCM$$

N₂O : Emisión anual de óxido nitroso (t N₂O/ año).

CL : Carbono total liberado (t C/ año).

R N/C : Relación de nitrógeno-carbono en la biomasa (Valor por defecto del IPCC, 0,015 t N/ t C).

RE : Nitrógeno liberado como óxido nitroso en quema a cielo abierto (0,7%, predefinido por el IPCC).

FCM : Relación de conversión de los pesos moleculares (44/28, t N₂O/ t C).

Para sacar la equivalencia en toneladas de CO₂ es necesario multiplicar las toneladas emitidas de N₂O por su PCG, en este caso es 310 t CO₂ eq/ t N₂O.

$$\text{CO}_2 \text{ eq} = \text{N}_2\text{O} * \text{PCG}$$

CO₂ eq: Toneladas de CO₂ equivalentes (t CO₂ eq/ año).

N₂O : Emisión anual de óxido nitroso (t N₂O/ año).

PCG : Potencial de calentamiento global (310 t CO₂ eq / t N₂O).

Las emisiones de CO₂ eq para un período de 10 años se muestran en el Cuadro 17.

Cuadro 17: Emisión de CO₂ eq (t/ año)

Año	Emisión de N ₂ O	CO ₂ eq
1	1,06	327,20
2	1,10	340,29
3	1,14	353,90
4	1,19	368,06
5	1,23	382,78
6	1,28	398,09
7	1,34	414,02
8	1,39	430,58
9	1,44	447,80
10	1,50	465,71
Total	12,67	3.928,43
Promedio	1,26	392,28

6. Estimación de las emisiones de gases efecto invernadero provenientes de la descomposición de residuos de madera.

Los residuos de madera demandados como combustibles, actualmente son apilados en su lugar de generación en donde se produce su descomposición.

Los grandes acopios de residuos de madera pueden representar una fuente potencial de gases de efecto invernadero, de óxido nitroso y, si ocurre digestión anaeróbica dentro

del acopio, de CH₄. Si estos gases se emiten en grandes cantidades un proyecto, que pueda mitigar la generación y la acumulación de residuos de madera, puede ser autorizado para exigir la reducción de gases de efecto invernadero. En el presente no se sabe mucho sobre la magnitud de las emisiones de CH₄ y óxido nitroso provenientes de los acopios de madera (BTG, 2002).

Por eso el Banco Mundial ha comisionado la construcción de una metodología para asignar las emisiones de CH₄ y de óxido nitroso proveniente de los acopios de residuos de madera (BTG, 2002).

Además de las emisiones de CH₄, las emisiones de óxido nitroso proveniente de los acopios de biomasa pueden contribuir significativamente al efecto invernadero. La literatura sobre emisiones de óxido nitroso está principalmente enfocada al compostaje, los datos sobre emisiones de acopio de madera no están disponibles.

Para el caso específico de las reservas de madera, se utiliza el siguiente modelo del BTG:

$$Q_m = V_m (\zeta \alpha \sum (A_j - A_{ox,j}) k C_{o,j} \rho v_o e^{-k(t-j)}) * (1 - \zeta_{ox})$$

Este modelo describe la emisión de CH₄ Q_m (m³/ año) en un acopio de madera en el que la madera se vierte por un número de años n (año). En este modelo varios factores son conocidos de antemano:

A_j = Volumen de madera que se vierte durante el año j (m³).

α = Factor de conversión del carbono orgánico disponible para descomposición (Kg) a metro cúbico de biogás (m³). Este factor es igual a 1,87 m³/ Kg carbono.

$A_{ox,j}$ = Volumen del acopio de madera que está bajo condiciones aeróbicas. Se asume que está en la misma proporción que el total de madera depositada anualmente A_j (m³).

k = Constante de descomposición de la madera (año⁻¹).

$C_{o,j\rho}$ = Contenido de carbono orgánico inicial de la madera vertida en el año j (Kg/m^3).

v_o = Fracción del contenido de carbono orgánico inicial que es hemicelulosa y celulosa. La razón para esto es que es sabido que la lignina no se descompone (-). Una fracción normal es 0,25, así que para la fracción de no lignina toma el valor de 0,75.

ζ = Factor de generación de carbono orgánico a CH_4 , también considera el CO_2 formado. Por lo tanto, el IPCC predeterminó este valor de 0,77.

V_m = Fracción de CH_4 emitido en el gas de un relleno. Se asume que en el caso de los acopio de madera el CH_4 representa un 60% (-).

ζ_{ox} = Factor de oxidación del CH_4 , representa la cantidad de CH_4 que es oxidado a través de la actividad biológica. El factor de oxidación que se toma es de 0,1, valor por defecto determinado por el IPCC (-).

Según estándares internacionales, para este caso se consideran los siguientes valores:

Datos Generales:

Factor de conversión de carbono orgánico a biogás (a)	= $1,87\text{m}^3$ biogás/ Kg carbono.
Potencial de Calentamiento Global	= 21 t CO_2 eq/ t CH_4 .
Densidad de CH_4	= $0,7 \text{ Kg}/\text{m}^3$.
Concentración del CH_4 en el biogás	= 60%.
Vida Media de la biomasa	= 10 años.
Constante de descomposición (k)	= $0,046 \text{ año}^{-1}$.
Factor de generación (zeta)	= 0,77.
Factor de oxidación del CH_4	= 0,10.
Porcentaje de un acopio bajo condiciones aeróbicas	= 10%.

Datos Específicos de la biomasa:

		Acopio	Fresca
Contenido de carbono orgánico (bs)	=	53,6%	53,6%
Contenido de Humedad	=	x ⁵	50% bh
Contenido de carbono orgánico(bh)	=	53,6%	26,8% bh
Fracción de lignina	=	0,25	0,25

En el Cuadro 18 se expresan las emisiones de CO₂ eq provenientes de la descomposición de biomasa forestal durante 10 años.

Cuadro 18: Emisión de CO₂ eq (t/ año).

Año	Biomasa Acopio	Años Biomasa	Biomasa Fresca	CO ₂ eq
1	20.353,85	0	20.353,85	5.450,84
2	21.168,00	1	21.168,00	10.702,90
3	22.014,72	2	22.014,72	15.768,24
4	22.895,31	3	22.895,31	20.658,49
5	23.811,12	4	23.811,12	25.384,87
6	24.763,57	5	24.763,57	29.958,22
7	25.754,11	6	25.754,11	34.389,04
8	26.784,27	7	26.784,27	38.687,45
9	27.855,64	8	27.855,64	42.863,29
10	28.969,87	9	28.969,87	46.925,66
Total	244.370,46		244.370,46	270.789
Promedio	24.437,05		24.437,05	27.078,9

La emisión total de gases en el escenario actual proyectándose para un período de 10 años, se puede resumir en el Cuadro 19.

⁵ El porcentaje de humedad varía según las condiciones climáticas del lugar y de las características propias del acopio.

Cuadro 19: Emisión total de gases (t).

Gas	Emisiones sin proyecto
CO ₂	1.094.400,16
CO ₂ eq (CH ₄)	281.541,3
CO ₂ eq (N ₂ O)	3.928,43
NO _x	11.017,71
SO ₂	367,82

Las emisiones de CO₂ incluyen a los gases provenientes del carbono presente en la mezcla de combustibles y su oxidación, como las provenientes del transporte del carbón desde los distintos puertos hasta la planta.

Las toneladas de CO₂ eq (CH₄) consideran tanto a las toneladas emitidas por la descomposición de los residuos de la madera y a las liberadas por la quema bajo prácticas agrícolas de la cáscara de arroz.

El NO_x y el SO₂ provienen de la oxidación del nitrógeno y del azufre presentes en el carbón durante el proceso de clinkerización.

Estimación de las emisiones provenientes de la sustitución parcial de carbón por biomasa.

Muchos residuos de cosechas o leña son sometidos, por parte de los agricultores, a una quema a cielo abierto (contaminando el aire) para disminuir los residuos antes de la cosecha. De igual forma, los aserraderos generan un volumen significativo de diversos tipos de desperdicios de la madera (aserrín, trozos de muebles, etc). En todos estos casos, el manejo de los residuos está transformándose en un problema ambiental importante y la opción de eliminarlos (reutilización energética) en el horno cementero puede ser una solución efectiva a esta problemática. (ICH, 2001).

Para realizar el balance de los distintos gases de esta situación, con sustitución energética, es necesario manejar la cantidad de los distintos combustibles utilizados, las que se encuentran en el Cuadro 3.

El balance de los distintos gases se realiza utilizando el mismo método que se usó para el primer escenario.

1. Balance de carbono.

El balance de carbono se realiza considerando una sustitución energética parcial de un 50% de carbón por biomasa. Sólo se van a analizar las emisiones provenientes de la combustión del carbón, ya que la combustión completa del carbono contenido en la biomasa pasa a formar parte del ciclo cerrado del carbono.

La obtención de las emisiones de CO₂ se realiza mediante un balance de masa de la misma manera, que se realizó anteriormente y los resultados se resumen en el Cuadro 20.

Cuadro 20: Emisión de CO₂ (t/ año).

Año	Carbono	Emisión CO₂
1	12.256,26	44.944,13
2	12.746,51	46.741,89
3	13.256,37	48.611,57
4	13.786,63	50.556,03
5	14.338,10	52.578,27
6	14.911,62	54.681,40
7	15.508,08	56.868,66
8	16.128,41	59.143,41
9	16.773,54	61.509,14
10	17.444,49	63.969,51
Total	147.150,02	539.604,02
Promedio	14.715,00	53.960,40

2. Balance de azufre

En este caso el ingreso de azufre al sistema por parte del crudo va a permanecer constante, sólo va a variar su ingreso en el combustible, debido a que la biomasa no contiene azufre en su composición química, sólo se considera el azufre contenido en el carbón que es de 1,09%.

Las emisiones de SO₂ liberadas a la atmósfera se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21: Emisión de SO₂ (t/ año).

Año	Azufre	SO₃	SO₂	Emisión SO₂
1	191,48	478,69	382,95	15,32
2	199,14	497,84	398,27	15,93
3	207,10	517,75	414,20	16,57
4	215,39	538,46	430,77	17,23
5	224,00	560,00	448,00	17,92
6	232,96	582,40	465,92	18,64
7	242,28	605,70	484,56	19,38
8	251,97	629,93	503,94	20,16
9	262,05	655,12	524,10	20,96
10	272,53	681,33	545,06	21,80
Total	2.298,89	5.747,22	4.597,78	183,91
Promedio	229,89	574,72	459,78	18,39

3. Balance de nitrógeno.

La emisión de NO_x no se ve significativamente afectada por la combustión de residuos, depende básicamente de las condiciones operativas específicas del horno, del exceso de aire y de la temperatura. No obstante, cuando se utilizan residuos con una elevada proporción de agua, se reduce el nivel de emisión de óxidos de nitrógeno.

La concentración de nitrógeno en el carbón es de 0,78% y en la biomasa de 0,53% y de 30% en los NO_x.

La cantidad de nitrógeno que entra al sistema en el combustible, se determina como fue hecho en el anterior balance de nitrógeno.

Las emisiones de NO_x se exponen en el Cuadro 22.

Cuadro 22: Emisión de NO_x (t/ año).

Año	Nitrógeno	Emisión NO_x
1	330,29	1.100,95
2	343,50	1.144,99
3	357,24	1.190,79
4	371,53	1.238,42
5	386,39	1.287,96
6	401,84	1.339,48
7	417,92	1.393,06
8	434,63	1.448,78
9	452,02	1.506,73
10	470,10	1.567,00
Total	3.965,45	13.218,16
Promedio	396,54	1.321,82

4. Emisiones provenientes del transporte de combustible.

En este caso no es posible dejar de considerar la emisión proveniente del transporte, tanto del carbón desde los puertos a la planta como de la biomasa desde las industrias hasta Teno. Estas emisiones de CO₂ deben ser incluidas dentro de la estimación total de las emisiones.

Para realizar el cálculo de estas emisiones se mantienen los supuestos anteriores, se utiliza el mismo camión y las variables relacionadas con el petróleo permanecen constantes.

Utilizando la misma metodología, para calcular la cantidad de toneladas que el camión puede trasladar por viaje se consideran las densidades de los distintos combustibles que son entregadas en el Cuadro 23.

Cuadro 23: Densidades de los combustibles (t/ m³).

Combustible	Densidad
Carbón	0,7
Cáscara de Arroz	0,16
Residuos de Madera	0,5

Si se multiplica la capacidad volumétrica del camión por la densidad de los combustibles se obtiene que, el camión por viaje transporte 35 toneladas de carbón, 6,25 toneladas de cáscara de arroz y 25 toneladas de residuos de madera.

Para estimar las emisiones totales es necesario considerar la cantidad de cada combustible demandada durante los 10 años, la que se muestra en el Cuadro 24.

Cuadro 24: Demanda de combustibles (t/ año).

Año	Catamotun	ENACAR Mejorado	Petcoke	Cáscara de Arroz	Madera VI	Madera VII
1	4.411,90	4.411,90	8.823,81	15.992,31	2.180,77	18.173,08
2	4.588,38	4.588,38	9.176,76	16.632,00	2.268,00	18.900,00
3	4.771,91	4.771,91	9.543,83	17.297,28	2.358,72	19.656,00
4	4.962,79	4.962,79	9.925,58	17.989,17	2.453,07	20.442,24
5	5.161,30	5.161,30	10.322,61	18.708,74	2.551,19	21.259,93
6	5.367,75	5.367,75	10.735,51	19.457,09	2.653,24	22.110,33
7	5.582,46	5.582,46	11.164,93	20.235,37	2.759,37	22.994,74
8	5.805,76	5.805,76	11.611,53	21.044,79	2.869,74	23.914,53
9	6.037,99	6.037,99	12.075,99	21.886,58	2.984,53	24.871,11
10	6.279,51	6.279,51	12.559,03	22.762,04	3.103,91	25.865,96
Total	52.969,77	52.969,77	105.939,54	192.005,36	26.182,55	218.187,91
Promedio	5.296,98	5.296,98	10.593,95	19.200,54	2.618,26	21.818,79

Las emisiones provenientes del transporte de cada tipo de carbón (t de CO₂ / t carbón) no varían entre un escenario y otro, sólo cambia la cantidad de carbón demandada por la que se debe multiplicar.

Para el caso del carbón Catamotun que es transportado desde el Puerto de Ventana hasta Teno el cálculo de las emisiones es el siguiente:

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = 27,87 \text{ Kg de CO}_2 \text{ por tonelada de carbón.}$$

La cantidad de carbón Catamotun utilizada como combustible durante este período es de 52.969,77 toneladas, multiplicando se obtiene una emisión de 1.476,32 toneladas de CO₂.

Para el carbón ENACAR Mejorado, que es traído desde Arauco, se repite el mismo procedimiento.

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = 53,25 \text{ Kg de CO}_2 \text{ por tonelada de carbón.}$$

Para obtener la emisión de CO₂ se considera todo el carbón ENACAR Mejorado utilizado como combustible durante un período de 10 años que es de 52.969,77 toneladas, generando una emisión de 2.820,67 toneladas de CO₂.

Para el Petcoke, traído desde Talcahuano se repite el procedimiento realizado con los otros carbones.

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = 31,14 \text{ Kg de CO}_2 \text{ por tonelada de carbón.}$$

El total de emisión de CO₂ proveniente del transporte de este carbón durante 10 años se obtiene por la multiplicación de la cantidad de Petcoke demandado durante este período que es de 105.939,54 toneladas y la relación existente entre los Kg de CO₂ emitidos por tonelada de carbón dando un total de 3.299,05 toneladas.

En el caso del transporte de los combustibles biomásicos es necesario realizar el cálculo de toda la operación.

La cáscara de arroz es llevada a la planta desde la VII Región, la que tiene una distancia promedio de 50 km.

TFSC:

Distancia recorrida por el camión = 50 km.

Consumo de combustible por el camión = 2 km/l.

Consumo total de combustible por viaje = $(2 * 50) / 2 = 50$ l.

Toneladas de carbón transportadas por viaje = 8 t.

Consumo de combustible = $50 \text{ l} / 8 \text{ t} = 6,25 \text{ l} / \text{t}$.

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 / \text{t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

E Transporte (t de CO₂ / t carbón) = 17,03 Kg de CO₂ por tonelada de carbón.

Considerando que la cantidad de cáscara de arroz utilizada como combustible durante un período de 10 años es de 192.005,36 toneladas, se obtiene una emisión total de CO₂ de 3.269,88 toneladas de CO₂.

Para el caso de los residuos de madera proveniente de la VI Región, se utiliza una distancia promedio de 100 km.

TFSC:

Distancia recorrida por el camión = 100 km.

Consumo de combustible por el camión = 2 km/l.

Consumo total de combustible por viaje = $(2 * 100) / 2 = 100$ l.

Toneladas de carbón transportadas por viaje = 25 t.

Consumo de combustible = $100 \text{ l} / 25 \text{ t} = 4 \text{ l} / \text{t}$.

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 / \text{t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

E Transporte (t de CO₂ / t carbón) = 10,9 Kg de CO₂ por tonelada de carbón.

Cuando se multiplica 26.182,55, toneladas de residuos de madera de la VI Región, por 10,9, relación existente entre Kg de CO₂ por tonelada de carbón se obtiene, 285,37

toneladas de CO₂ correspondiente a la emisión proveniente del transporte de este combustible durante 10 años.

Del mismo modo, la madera proveniente de la VII Región es transportada una distancia de 50 km.

TFSC:

Distancia recorrida por el camión = 50 km.

Consumo de combustible por el camión = 2 km/l.

Consumo total de combustible por viaje = $(2 * 50) / 2 = 50$ l.

Toneladas de carbón transportadas por viaje = 25 t.

Consumo de combustible = $50 \text{ l} / 25 \text{ t} = 2 \text{ l} / \text{t}$.

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = \text{TFSC} * \text{DD} * \text{CVD} * \text{EFD}$$

$$E \text{ Transporte (t de CO}_2 \text{ / t carbón)} = 5,45 \text{ Kg de CO}_2 \text{ por tonelada de carbón.}$$

Para obtener la emisión de CO₂ se considera todo el residuo de madera de la VII Región utilizado como combustible durante un período de 10 años que es de 192.005,36 toneladas, generando una emisión de 1.189,05 toneladas de CO₂.

De la suma de las emisiones provenientes del traslado de todos los combustibles desde su lugar de origen a la planta cementera se obtiene un total de 12.340,34 toneladas de CO₂ emitidas durante un período de 10 años.

La emisión total de gases en el escenario con sustitución energética, por un período de 10 años, se puede resumir en el Cuadro 25.

Cuadro 25: Emisión total de gases (t).

Gas	Emisiones con proyecto
CO ₂	551.944,36
NO _x	13.218,16
SO ₂	183,91

Las toneladas de CO₂, corresponden a las emisiones provenientes del transporte de la biomasa desde su lugar de generación hasta la planta de cemento. La otra fuente es la oxidación del carbono presente en el carbón, como se mencionó anteriormente, el carbono presente en la biomasa no se considera.

Las emisiones de NO_x se generan a partir de la oxidación del nitrógeno presente en el carbón y en la biomasa.

Las emisiones de SO₂ se generan a partir del azufre presente sólo en el carbón.

Toneladas de emisiones potencialmente reducibles.

Según el IPCC, de los gases liberados en este proceso, sólo el CO₂, CH₄ y el N₂O corresponden a gases de efecto invernadero, los NO_x y los SO₂ son gases de efecto invernadero en forma indirecta, ya que son aerosoles precursores. En el Cuadro 26 se muestran las emisiones totales de CO₂, del escenario actual, la emisión del escenario con sustitución energética (con proyecto) y por último, las emisiones potencialmente reducibles. Las emisiones de NO_x y SO₂, se consideran sólo a modo de comparación.

Para efecto de contabilizar todas las emisiones de CO₂ se asume que también incluye a las toneladas de CO₂ equivalentes liberadas durante un período de 10 años.

Cuadro 26: Emisiones potencialmente reducibles (t).

Gas	Emisiones sin proyecto	Emisiones con proyecto	Emisiones reducibles
CO ₂	1.375.165,76	551.944,36	823.221,4
SO ₂	367,82	183,91	183,91
NO _x	11.017,71	13.218,16	-2.200,45

Las emisiones de óxidos de nitrógeno, aumentan durante el desarrollo del proyecto correspondiendo a la poca diferencia existente en la concentración de nitrógeno en ambos combustibles. El incremento de las emisiones se debe principalmente al aumento de la masa a quemar y, en consecuencia, a la cantidad de nitrógeno que ingresa.

Por consiguiente, las emisiones de dióxido de sulfuro demuestran la poca incidencia que tiene la presencia de azufre en los combustibles en comparación con la gran cantidad que es ingresado en el crudo.

La sustitución de carbón por biomasa implica una reducción de las emisiones de CO₂ debido a las características del proceso donde se produce una combustión completa y el carbono presente en la biomasa pasa a formar parte del ciclo cerrado del carbono.

Además en términos de transporte, actualmente se emite mayor cantidad de CO₂ que el que se emite en el escenario con proyecto, esto se debe principalmente a que la distancia recorrida es mayor, aunque sea mucho mayor el número de viajes que ocurren con proyecto la distancia es considerablemente menor, por lo que la emisión de CO₂ también lo es.

Se considera que dentro de las emisiones de CO₂, se encuentran las de CH₄ y N₂O provenientes de la quema agrícola y la descomposición actual de los residuos de madera. Estas emisiones, en el escenario con proyecto dejan de existir, eliminándose una importante fuente de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, promoviendo la utilización de residuos con valor energético., aportando al desarrollo sustentable.

Compensación de bonos de carbono y adicionalidad del proyecto.

Compensación de bonos de carbono.

La compensación con bonos de carbono se obtiene al realizar la venta de las toneladas de CO₂ reducidas. Actualmente el precio de una tonelada de carbono que se reduce varía entre US\$3 y US\$7,5 y sólo por la transacción hay que desembolsar entre US\$100.000 y US\$200.000.⁶

Con este proyecto se reducen 823.221 toneladas de carbono, éstas se pueden transar a un precio de US\$3, en el peor de los escenarios, generando para la empresa un ingreso de US\$2.469.663.

A esta cantidad se le debe sustraer el costo de la Entidad Operacional, que están relacionados con la cantidad de toneladas reducidas tal como se definen en el Cuadro 27.

Cuadro 27: Costos de registro en el MDL por toneladas reducidas.

Promedio de toneladas de CO2 equivalentes reducidas por año bajo el período del crédito (estimado/aprobado)	US\$
≤ 15.000	5.000
> 15.000 y ≤ 50.000	10.000
> 50.000 y ≤ 100.000	15.000
> 100.000 y ≤ 200.000	20.000
> 200.000	30.000

Fuente: UNFCCC, 2004b.

⁶ Fundación Chile, Agosto 2004.

Los otros costos asociados al ingreso del proyecto al MDL, están definidos en el Cuadro 28.

Cuadro 28: Costos asociados a proyectos MDL.

Descripción	Observaciones	Valor US\$
Estudio de Línea Base	Si se realizó con una empresa externa.	40.000 – 60.000
Documento de Diseño de proyecto (PDD)	Incluyendo la nueva metodología y un informe de verificación.	40.000
Entidad Operacional Designada (DOE)	-----	25.000
Costo de Registro en CDM	Depende del tamaño del proyecto.	15.000
Costos de transacción	Fue calculado aproximadamente con el 30% del ingreso de la venta de bonos.	45.000
Total		165.000

Fuente: CONAMA, Marzo 2004c.

Como se puede observar, los costos por ingreso del proyecto al MDL, son en total de US\$165.000, sin incluir los costos de logística interna de la empresa, los cuales están asociados al primer año y son considerados como un costo de inversión.

Adicionalidad del proyecto.

Para demostrar la adicionalidad del proyecto se adoptó una línea base fundada en el supuesto que en ausencia de financiamiento de bonos de carbono, la empresa continuaría operando esta planta principalmente con carbón.

El proyecto está propuesto en un área donde los recursos de biomasa están disponibles en grandes cantidades. El inventario destaca que anualmente existen

alrededor de 37.164 toneladas de biomasa excedentes, que están disponibles en la región. Esta cantidad de biomasa actualmente no es utilizada, por lo tanto libera emisiones de GEI a la atmósfera por descomposición natural y por quemas en los campos.

Las adición de este proyecto, presenta las siguientes barreras que son un factor de riesgo e incertidumbre para la inversión:

1. El funcionamiento de este proyecto, requiere principalmente de la disponibilidad de biomasa como fuente de combustible. La biomasa actualmente disponible está sujeta a fluctuaciones estacionales, por lo que su suministro no está asegurado, es por esto que, la cantidad de biomasa fue proyectada en un plazo de 10 años.
2. Actualmente, la biomasa se encuentra dispersa en distintos lugares, por lo que la recolección de ésta requiere de grandes recursos humanos y económicos, por esto la recolección y transporte hasta el sitio del proyecto puede convertirse en una dificultad. Además se debe considerar, que los costos de la recolección y transporte subirán cada año debido a la tendencia al incremento del salario de los jornaleros y al alza del costo del combustible utilizado en el transporte.
3. Además de los costos de recolección y transporte de la biomasa, se debe considerar los precios de ésta, los cuales varían según la estación, haciendo que el costo de generación de energía en la planta sea inestable.
4. La eficiencia de conversión de la biomasa es mucho menor comparada con la eficiencia de conversión energética de los combustibles fósiles, por lo que la demanda de biomasa es considerablemente mayor lo que aumenta los costos de logística interna de la empresa.

Considerando las barreras anteriormente descritas, se infiere que el uso de la biomasa es mucho más riesgoso que otras alternativas como el carbón y el gas para generar energía, por lo que no es una práctica común.

Además el proyecto muestra adicionalidad ambiental, que se justifica de la siguiente manera:

1. Se demuestra que las emisiones de CO₂ eq generadas por la planta utilizando carbón como combustible durante 10 años son de 1.375.165,76 toneladas, si se realiza una sustitución energética parcial de 50% las emisiones liberadas llegarían a 551.944,36 toneladas, se reduce un 60% de los gases emitidos a la atmósfera.
2. Reaprovechar energéticamente la biomasa desechada, mediante su utilización como combustible alternativo realizando una sustitución energética parcial en los hornos, es una práctica poco común y constituye una contribución medioambiental, que se traducirá en una mejor calidad de vida y reducción de desechos, convirtiéndolos en materia prima para otros procesos.
3. Este proyecto demuestra que la sustitución de combustibles fósiles convencionales por combustibles alternativos como biomasa puede hacer una contribución importante al desarrollo sustentable a través de la reducción de la carga global de GEI tales como el CO₂ y conservar los recursos naturales no renovables. De esta forma la industria cementera puede potenciar de forma sustancial el ahorro de recursos naturales en su proceso de fabricación del cemento, siendo una contribución muy positiva a la mejora global del Medio Ambiente.

Si se consideran las justificaciones ambientales mencionadas anteriormente se deduce que el uso de combustibles alternativos, en este caso biomasa, es una práctica que genera beneficios ambientales, tanto en la reducción de emisiones, como de los volúmenes de desechos, que no existirían si este proyecto no se realiza.

El proyecto es adicional, reduce las emisiones antropogénicas de GEI bajo el nivel que podría haber ocurrido en la ausencia de la actividad de proyecto.

Se requieren incentivos del MDL para implementar esfuerzos adicionales significantes para romper ciertas barreras.

CONCLUSIONES

En este caso, la planta cementera no presenta ningún tipo de restricción tecnológica para realizar el proyecto, el cual genera importantes beneficios sociales y ambientales. Este proyecto efectivamente reduce 823.221 toneladas de CO₂ eq cumpliendo con los criterios del MDL.

Al considerar las toneladas de CO₂ eq potencialmente reducibles por el proyecto y al realizar la transacción de éstas, la sustitución energética se transforma beneficiosa en términos económicos, siendo rentable para la empresa y transformándose en una contribución para el medio ambiente.

Las toneladas de CO₂ eq potencialmente reducibles aumentan si también lo hace el porcentaje de sustitución energética, utilizando una mayor cantidad de biomasa como combustible, se reducen las emisiones de la planta, ya que es un combustible más limpio que el carbón y por otro lado, se elimina una fuente de emisión de gases que proviene de la quema agrícola y de la descomposición de la madera.

Si se aumenta el porcentaje de sustitución o si otras empresas del sector se interesan en este tipo de proyectos, se crearía un mercado adicional para la biomasa que podría estimular una oferta espontánea proveniente de plantaciones dendroenergéticas en terrenos no aptos para la agricultura generando beneficios sociales y económicos. A su vez, se pueden crear programas gubernamentales a modo de incentivar este tipo de cultivos.

En este estudio se estableció una metodología de evaluación de sustitución energética, que puede ser aplicado en otras plantas de la misma empresa y en otras empresas, incluso de otro rubro, que cuenten con condiciones tecnológicas y espaciales similares a las descritas en este proyecto. Por otro lado, la venta de las toneladas de CO₂ eq reducidas pueden compensar parte de la inversión necesaria para la realización del proyecto.

Este mercado, a nivel mundial está comenzando a crecer, por lo que la empresa Cementos Bío Bío, al ingresar al MDL a través de este proyecto sería pionera en Chile, lo que significa que la empresa obtiene un posicionamiento favorable dentro del sector, beneficiando su imagen corporativa. Además el ingreso económico, que recibe proveniente de la venta de los bonos de carbono estimula su crecimiento y competitividad.

Los resultados de la investigación señalan que es necesario realizar nuevos estudios en el sector energético para buscar combustibles alternativos, considerando las características de cada empresa y el lugar donde se emplazan, creando una oferta importante en término de reducción de emisiones, aprovechando las ventajas comparativas que Chile presenta y así incentivar la inversión extranjera.

BIBLIOGRAFÍA

- BEAUMONT, E. 1999. El Protocolo de Kyoto y el Mecanismo para un Desarrollo Limpio, Nuevas Posibilidades para el Sector Forestal de América Latina y El Caribe. Buenos Aires, Argentina. 94 p.
- BIOMASS TECHNOLOGY GROUP (BTG). 2002. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Biomass Waste Stockpiles, Final Report. The Netherlands. 92 p.
- CACHÁN, S. 2000. Cementos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 28 p.
- CEMBUREAU. 2004. Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production. Brussels, Belgium. 38 p.
- CMCC. 2001. Ciencia de Cambio Climático en Chile: Evidencias, Perspectivas y Desafíos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Santiago, Chile. 78 p.
- CONAMA. 2003. Mecanismo de Desarrollo Limpio. [en línea] Disponible en el WWW < <http://www.conama.cl/coain/article-27777.html>> [Consulta: Junio de 2004].
- CONAMA. 2003a. Oportunidades para Chile en el MDL. Santiago, Chile. 29 p.
- CONAMA. 2004b. Bonos de Descontaminación. Santiago, Chile. 21 p.
- CONAMA. 2004c. Instrumentos económicos para el control de la contaminación atmosférica. Seminario en Hyatt. Santiago, Chile. 605 p.

- CORPORACIÓN DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA (INTEC). 2000. Calificación y Cuantificación de Residuos con Valor Energético. Chile.
- DAPHNIA. España. 2001. Biomasa: Una fuente de Energía. [en línea] Disponible en el WWW <<http://www.ccoo.es/publicaciones/periodicas.html>> [Consulta: Octubre de 2003].
- DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT (DFID). 2002. Colocando Cimientos para el MDL. Reino Unido. 25 p.
- ECOAMERICA. 2003. Bonos de Descontaminación, Nueva Herramienta para la Gestión Ambiental. 30: 14 – 17.
- EL MERCURIO. 2003. Memorandos de Entendimiento: Chile se posiciona en UE con “Bonos de Carbono”. Santiago, Chile, 6 de Octubre. Cuerpo C, 8 p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2002. Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values. U.S. 16 p.
- ESTUDIOS Y GESTIÓN AMBIENTAL S.A. 2002. Declaración de Estudio de Impacto Ambiental, Uso combinado de Combustible Alternativo Líquido (C.A.L.) y Carbón Mineral en el Horno de Clinker de Cementos Bío Bío. S.A.C.I., División Curicó. Talcahuano, Chile. 59 p.
- FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD EN ENERGÍA RENOVABLE (FOCER). 2002. Manual Sobre Energía Renovable: Biomasa. Costa Rica. 56 p.
- FUNDACIÓN CHILE. 2004. El Mercado del Carbono, Proyectos en Energía y Residuos. Santiago, Chile. 29 p.
- GREENPEACE. 2002. Campaña de Tóxicos. Los Residuos en Cementeras: Otra Forma de Incineración. Madrid, España. 4 p.

- GRUPO ERATECH INC. 2002. Utilización de neumáticos desechados como combustible alternativo en fábricas de cemento. Cementos Bío Bío. Chile. 51 p.
- GRUPO ERATECH INC. 2004a. Como Funcionan los Programas de Combustibles Alternativos. [en línea] Disponible en el WWW. <<http://www.co2cement.com/spanish/index.cfm>> [Consulta: Abril de 2004].
- INSTITUTO DEL CEMENTO Y HORMIGÓN DE CHILE (ICH). 2001. Boletín de informaciones: Primer Grupo Técnico en Materias Medio Ambientales. Chile. 23 p.
- IPCC. 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual.
- LABAHN, O. 1985. Cement Engineers' Handbook. Bauverlag. 799 p.
- MGM INTERNATIONAL, INC. 2003. Graneros Plant Fuel Switching Project, Nestlé S.A., Chile. Buenos Aires, Argentina. 54 p.
- MONTENEGRO S., HERVÉ D., DURÁN V. 2001. Los Tratados Ambientales: Principios y Aplicaciones en Chile. Gobierno de Chile y Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp. 368 - 402.
- MURCIA, S. 2004. Valorización de Residuos como Combustible en Cementera. Madrid, España. 18 p.
- SAMUELSON A, NORDHAUS W. 1995. Economía. McGraw-Hill. Madrid, España. pp. 80 - 89.
- SIREAU, A. 2001. Educación y Desarrollo Sostenible: Una Propuesta de Contenidos, Métodos y Actividades. Santiago, Chile. 37 p.

- SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL. 2003. Guía Técnica para la Medición, Estimación y Cálculo de las Emisiones al Aire, Sector Cemento. España. 64 p.
- UNFCCC. 1997. Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. Kyoto, Japón. 21 p.
- UNFCCC. 2002a. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su Séptimo Período de Sesiones. Marrakech. 35 p.
- UNFCCC. 2004b. Register a Project Activity [En línea]. Disponible en el WWW <<http://cdm.unfccc.int/pac/howto/CDMProjectActivity/Register>>. [Consulta: Junio de 2004].
- UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. 2000. Informe preliminar, Laboratorio de Recursos Renovables, Facultad de Ciencias Químicas. Concepción, Chile.
- VERGARA, A. 2002. Pre-factibilidad Técnica y Económica de un Sistema de Purificación y Utilización del Biogás generado en el Relleno Sanitario Lomas Los Colorados. Universidad de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago, Chile. 124 p.
- WORLD BANK. 2004. Biomass Energy Sources. [En línea]. Disponible en el WWW <<http://www.worldbank.org/html/fpd/em/power/sources/easrbiom.stm>> [Consulta: Febrero de 2004].

ANEXOAnexo IArtículo 12: Mecanismo de Desarrollo Limpio.

1. Por el presente se define un mecanismo para un desarrollo limpio.

2. El propósito del mecanismo para un desarrollo limpio es ayudar a las Partes no incluidas en el anexo I a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las Partes incluidas en el anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo.

3. En el marco del mecanismo para un desarrollo limpio:

a) Las Partes no incluidas en el anexo I se beneficiarán de las actividades de proyectos que tengan por resultado reducciones certificadas de las emisiones; y

b) Las Partes incluidas en el anexo I podrán utilizar las reducciones certificadas de emisiones resultantes de esas actividades de proyectos para contribuir al cumplimiento de una parte de sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3, conforme lo determine la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo.

4. El mecanismo para un desarrollo limpio estará sujeto a la autoridad y la dirección de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el

presente Protocolo y a la supervisión de una junta ejecutiva del mecanismo para un desarrollo limpio.

5. La reducción de emisiones resultante de cada actividad de proyecto deberá ser certificada por las entidades operacionales que designe la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo sobre la base de:

- a) La participación voluntaria acordada por cada Parte participante;
- b) Unos beneficios reales, mensurables y a largo plazo en relación con la mitigación del cambio climático; y
- c) Reducciones de las emisiones que sean adicionales a las que se producirían en ausencia de la actividad de proyecto certificada.

6. El mecanismo para un desarrollo limpio ayudará según sea necesario a organizar la financiación de actividades de proyectos certificadas.

7. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo en su primer período de sesiones deberá establecer las modalidades y procedimientos que permitan asegurar la transparencia, la eficiencia y la rendición de cuentas por medio de una auditoría y la verificación independiente de las actividades de proyectos.

8. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo se asegurará de que una parte de los fondos procedentes de las actividades de proyectos certificadas se utilice para cubrir los gastos administrativos y ayudar a las Partes que son países en desarrollo particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático a hacer frente a los costos de la adaptación.

9. Podrán participar en el mecanismo para un desarrollo limpio, en particular en las actividades mencionadas en el inciso a) del párrafo 3 supra y en la adquisición de unidades certificadas de reducción de emisiones, entidades privadas o públicas, y esa

participación quedará sujeta a las directrices que imparta la junta ejecutiva del mecanismo para un desarrollo limpio.

10. Las reducciones certificadas de emisiones que se obtengan en el período comprendido entre el año 2000 y el comienzo del primer período de compromiso podrán utilizarse para contribuir al cumplimiento en el primer período de compromiso.