

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA MEJORAR LA COMBUSTIÓN DEL
PROCESO CLINKER DE LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA

FEDERICO PRADA LEÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2009

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA MEJORAR LA COMBUSTIÓN DEL
PROCESO CLINKER DE LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA

FEDERICO PRADA LEÓN

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Químico

Director

Humberto Escalante Hernández

Ph. D. en Ingeniería química

Codirector

Hugo Grisales Beltrán

Gerente de Proceso de Cemex Colombia

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2009

DEDICATORIA

Al todopoderoso, por el regalo de la vida y la nobleza.

A Pame, principal motivadora de mis sueños; sin su amor, ternura, dedicación y confianza nada de esto hubiera ocurrido.

A mi Madre, su infinito amor me convirtió en la persona que soy ahora.

A mi Padre, por sus consejos.

A mi Nonita, por el espacio privilegiado que tengo en su corazón.

A toda mi familia.

A la memoria de mi Nonito, de mi Mamá Tulia y de mi Papá Luis

Al Teatro UIS, y a Omar Álvarez, el complemento ideal de mi formación.

FEDE

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Dr. HUMBERTO ESCALANTE HERNANDÉZ, por su invaluable orientación y apoyo durante y después de la práctica empresarial, sus consejos ahora hacen parte de mi formación como profesional.

Quiero agradecer a CEMEX COLOMBIA S.A y a su equipo de trabajo por brindarme la oportunidad de poder realizar la práctica empresarial en una de las cementeras más grandes de Latinoamérica.

Al ingeniero Hugo Grisales, a José Alfredo Rodríguez y a todos aquellos colaboradores que de una u otra manera fueron esenciales para la culminación de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y a los profesores de la escuela de Ingeniería Química por su acompañamiento académico.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. Producción de cemento	4
1.1 Molienda de crudo.....	4
1.2 Clinkerización.....	4
1.3 Molienda de cemento.....	6
1.4 Empaque.....	6
2. METODOLOGIA.....	7
2.1 Revisión Teórica del proceso de combustión en hornos cementeros:	7
2.2 Estudiar las características fisicoquímicas de los combustibles alternativos al carbón:	7
2.3 Ensayos experimentales de combustión con los combustibles alternativos... 8	
2.4 Inicio de un proyecto piloto con el mejor combustible alternativo seleccionado.	9
2.5 Estudio económico del proceso de combustión con el mejor combustible seleccionado.	10
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	11
3.1 Estudio de las características fisicoquímicas de los combustibles alternativos	11
3.2 Composición de las cenizas:.....	12
3.3 Inicio de un proyecto piloto con el mejor combustible alternativo seleccionado.	14
3.4 Estudio Económico del proceso de de combustión con el mejor combustible seleccionado	16
3.4.1 Análisis financiero del proyecto.....	18
3.4.2 Análisis del VPN, TIR y PAY BACK.....	20
4. CONCLUSIONES.....	22
5. RECOMENDACIONES	23
6. BIBLIOGRAFIA	24

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica del clinker	5
Tabla 2. Entidades proveedoras de la biomasa para estudio.....	8
Tabla 3. Ensayos fisicoquímicos realizados a la biomasa de estudio.	8
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa.....	11
Tabla 5. Composición química de las cenizas de los combustibles.	12
Tabla 6. Evolución del crecimiento de las plántulas de Jatropha utilizando bancos germinadores.	15
Tabla 7. Evolución del crecimiento de las plántulas de Jatropha utilizando bandejas germinadoras.....	16
Tabla 8. Rendimiento del fruto de Jatropha Curcas variedad cabo verde.....	16
Tabla 9. Sustitución anual de carbón por cáscara y aceite de Jatropha curcas para horno 2.	17
Tabla 10. Capital de inversión inicial para el proyecto de sustitución de carbón...	19
Tabla 11. Costos e ingresos del proyecto a nueve años.....	20
Tabla 12. Retorno de la inversión.....	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso general de producción de cemento.	4
Figura 2. Suministro de combustible al horno.	5
Figura 3. Diagrama de etapas de la metodología.....	7
Figura 4. Diagrama de alimentación de cáscara y aceite de Jatropha al horno. ...	18
Figura 5. Proceso de producción de cemento	26

ANEXOS

ANEXO 1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO.....	26
ANEXO 2. FLUORECENCIA DE RAYOS X (XRF).	27

RESUMEN

TITULO: COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA MEJORAR LA COMBUSTIÓN DEL PROCESO CLINKER DE LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA *

AUTOR: FEDERICO PRADA LEÓN. **

PALABRAS CLAVE: cemento, combustión, biomasa, clinker, jatropha, arroz, lodos, Cemex.

DESCRIPCIÓN

El proceso de calcinación de caliza para producir clinker, es una operación esencial para todas las compañías cementeras. Éste proceso garantiza que el cemento sea aglutinante y pueda ser usado en la construcción.

Actualmente la compañía utiliza carbón como combustible principal para llevar a cabo el proceso anterior generando elevados costos y problemas de contaminación.

Por esta razón, la planta caracolito de Cemex Colombia quiso encontrar un combustible renovable que genere reducción de costos y cuyo impacto ambiental sea menor. La compañía concertó en estudiar los lodos de PTAR, la cascarilla de arroz, el tallo de arroz, la cáscara de Jatropha y el aceite de jatropha, como posibles fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles. Después de realizar los respectivos ensayos físicos, y de realizar las pruebas operacionales en el horno, se decidió por los residuos de la jatropha como el mejor biocombustible.

Con el objetivo de sustituir parcialmente el carbón consumido y aprovechando los terrenos adjuntos a la fábrica, la compañía implementó un proyecto piloto de siembra, cosecha y alimentación de jatropha curcas variedad cabo verde al horno 2 de la planta caracolito. El presente trabajo contiene los resultados de la primera etapa de éste proyecto piloto que consistió en la siembra y germinación de las semillas de la planta. Asimismo se realizó una proyección económica para observar la viabilidad financiera del proyecto.

* Práctica Empresarial

** Facultad de Ingenierías FísicoQuímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph. D. Humberto Escalante Hernandez. Codirector ing. Hugo Armando Grisales gerente de proceso de Cemex Colombia

ABSTRACT

TITLE: ALTERNATIVE FUELS TO IMPROVE THE COMBUSTION OF CLINKER PROCESS OF PLANT CARACOLITO OF CEMEX COLOMBIA *

AUTHOR: FEDERICO PRADA LEÓN. **

KEYWORDS: cement, combustion, biomass, clinker, jatropha, rice, sludge, Cemex.

DESCRIPTION:

The process of limestone calcination to produce clinker is an essential operation for all the cement companies. This process ensures that the cement is a binder and can be used in construction.

The company currently uses coal as main fuel for carrying out the above process generating high costs and pollution problems.

For this reason, the Caracolito factory of Cemex Colombia wanted to find a renewable fuel to generate cost savings and whose environmental impact is less. The company arranged to study the WWTP sludge, rice hulls, rice stalk, the husk of Jatropha and Jatropha oil as potential alternative energy sources to fossil fuels. After performing the respective physical tests, and operational testing in the oven, it was decided by waste from the jatropha as the best biofuel.

In order to partially replace coal consumed and using land attached to the factory, the company implemented a pilot project of planting, harvesting and feeding of jatropha curcas variety green to oven 2 of the Caracolito factory. This paper contains the results of the first stage of this pilot project consisted of planting and germination of seeds of the plant. It also conducted an economic projection to observe the project's financial viability.

* Internship, cement plant

** Faculty of Engineering Physical Chemistry. Chemical Engineering Department, Director Ph. D. Humberto Escalante Hernandez, Co-Director ing. Hugo Armando Grisales process manager Cemex Colombia

INTRODUCCIÓN

El uso de energía renovable en las grandes industrias se ha convertido en los últimos años en un factor importante de competencia, debido al acelerado incremento en los costos de los combustibles de origen fósil y los importantes incentivos de carácter económico que ofrece la organización de naciones unidas a través de los bonos de carbón⁽¹⁾. Gran cantidad de empresas han iniciado estudios tendientes a buscar fuentes alternativas de energía en sus procesos; y en esta línea la biomasa es una perspectiva importante.

El proceso de fabricación de cemento se lleva a cabo en cuatro etapas principales: molienda de crudo, clinkerización, molienda de cemento y empaque⁽²⁾; siendo la etapa más intensiva en consumo de energía y en emisiones de CO₂ la producción de clinker. En este proceso el horno debe alcanzar temperaturas de 1.450°C para lograr las reacciones químicas necesarias en la harina cruda⁽³⁾.

En la planta Caracolito de Cemex Colombia se tienen en funcionamiento dos hornos rotatorios que operan actualmente con carbón. En el año 2008 su consumo fue de 307.830 toneladas generando costos que superaron los cuarenta mil millones de pesos y que implicaron emisiones de CO₂ al ambiente que ascendieron a 1.128.710 toneladas⁽⁴⁾, lo que ocasionó grandes problemas de contaminación afectando directamente a la comunidad cercana del corregimiento de Payandé (Tolima).

Por lo anterior, la empresa Cemex emprendió una serie de acciones encaminadas a mejorar las operaciones en los hornos y tratar de reducir los problemas de contaminación. En este orden de ideas, el primer proyecto consistió en la evaluación de nuevos combustibles para los hornos; con la característica adicional de proceder de fuentes renovables.

El uso de fuentes alternas de energía se ha incrementado en los últimos años. México es el primer país de Latinoamérica en producir clinker para cemento usando energía renovable, en Octubre de 2006 se instaló un sistema de suministro de lodos de PTAR como combustible que actualmente reemplaza 15% del carbón suministrado a los hornos ⁽⁵⁾, asimismo en el presente año en el estado de Oaxaca Cemex inauguró un parque de energía eólica para sustituir un 25% del carbón consumido ⁽⁶⁾. Brasil es el primer país latinoamericano en utilizar diferentes residuos agrícolas para el aprovechamiento de su energía, en la actualidad son los productores más grandes del mundo de etanol de la caña de azúcar con una participación del 25% ⁽⁷⁾.

En Colombia el uso de residuos como fuentes alternas de energía aún cuando no es muy alto, en el año 2005, el 37,32% fueron de origen vegetal, el 62,62% de animal y el 0,06% procedieron de los residuos urbanos ⁽⁸⁾.

Colombia es un país con tradición agrícola con gran producción de Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) y Residuos Agrícolas Industriales (RAI), los cuales se constituyen en biomasa residual con potencial energético significativo ⁽⁹⁾. En el país, en el año 2005 se produjo 503.575,2 toneladas de cascarilla de arroz que fueron destinados principalmente para la elaboración de camas en avicultura y el transporte de ganado ⁽¹⁰⁾. Los cultivos de arroz produjeron la misma cantidad de tallo, residuo que en la actualidad es quemado a campo abierto como alternativa para su manejo.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar cinco combustibles alternativos para los hornos de la planta Cemex. Este estudio se llevó a cabo en la modalidad de práctica empresarial. Dada la gran cantidad de combustible utilizado en la planta Cemex el estudio se enfocó por dos frentes: a) utilizar como combustible un residuo agrícola o industrial que tuviera la capacidad volumétrica mensual de poder sustituir la rata másica de carbón; y b) sembrar 942 hectáreas que tiene la empresa adjunto a la fábrica, con un cultivo no convencional. En este orden de

ideas, la dirección de Cemex estimó conveniente evaluar lodos de PTAR, cascarilla de arroz, paja de arroz, aceite y cáscara de *Jatropha curcas*.

En el país actualmente no se registran grandes cultivos de *Jatropha*, solo en el departamento del Meta y en el Magdalena existen cultivos experimentales de la variedad de cabo verde.

El cultivo de *Jatropha* se constituye del 100% de masa residual, debido a que no se produce como alimento. En especial el fruto de la planta contiene 3 a 4 semillas oleaginosas y cubiertas por una cáscara que tienen el mayor potencial energético.
(11)

El tratamiento de las aguas residuales domésticas genera subproductos como los lodos, desecho de difícil tratamiento por su elevada cantidad y volumen. En la actualidad se tratan para ser convertidos en biosólidos y posteriormente, se usan en la recuperación de suelos, actividades forestales y cobertura en rellenos sanitarios.

La biomasa residual de arroz es producida desde la cosecha, momento en el que se obtiene el tallo para su disposición final. Más adelante, la industria arrocera se encarga de separar el grano de su cascarilla, generando así otro residuo en el proceso.

La biomasa analizada en el presente estudio ha sido caracterizada por diferentes autores con resultados fisicoquímicos satisfactorios para las necesidades del sistema de combustión de plantas cementeras.⁽¹²⁾

1. Producción de cemento

El cemento es un material aglutinante hidráulico compuesto principalmente por clinker, yeso en menor cantidad y agregados como la puzolana. Las etapas para la fabricación de cemento se esquematizan en la figura 1. El proceso completo se puede ver en el Anexo 1.



Figura 1. Proceso general de producción de cemento.

1.1 Molienda de crudo

El crudo es una mezcla homogénea principalmente de caliza con adiciones en menor cantidad de mineral de hierro y puzolana. El crudo debe tener una finura de 80% pasante en $75 \mu\text{m}$ ⁽¹³⁾ para facilitar la reacción en la siguiente etapa. Para esta tarea la planta caracolito cuenta con un molino vertical LOESCHE que actúa sobre la mezcla hasta obtener el tamaño requerido y posteriormente es almacenada en un silo de 25.000 toneladas.

1.2 Clinkerización

El clinker es un mineral sintético conformado principalmente por silicatos de calcio hidráulicos, aluminato tricálcico y ferrialuminato tetracálcico. Es producto de la reacción de combustión de la caliza con aditivos como el mineral de hierro y la puzolana ⁽¹⁴⁾.

El clinker del cemento portland contiene, de forma aproximado, los siguientes componentes químicos ⁽¹⁵⁾:

Componente	% p/p	Componente	% p/p
SiO ₂	16 – 26	CaO	58 – 67
Al ₂ O ₃	4 – 8	MgO	1 – 5
Fe ₂ O ₃	2 – 5	K ₂ O + Na ₂ O	0 – 1
Mn ₂ O ₃	0 – 3	SO ₃	0.1 – 2,5
TiO ₂	0 – 0.5	P ₂ O ₃	0 – 1,5

Tabla 1. Composición típica del clinker

Los hornos de la planta caracolito tiene dos entradas de combustible: directamente por la boquilla del quemador y por el piroclón que constituye el último ciclón de la torre precalentadora, ver figura 2 ⁽¹⁶⁾.

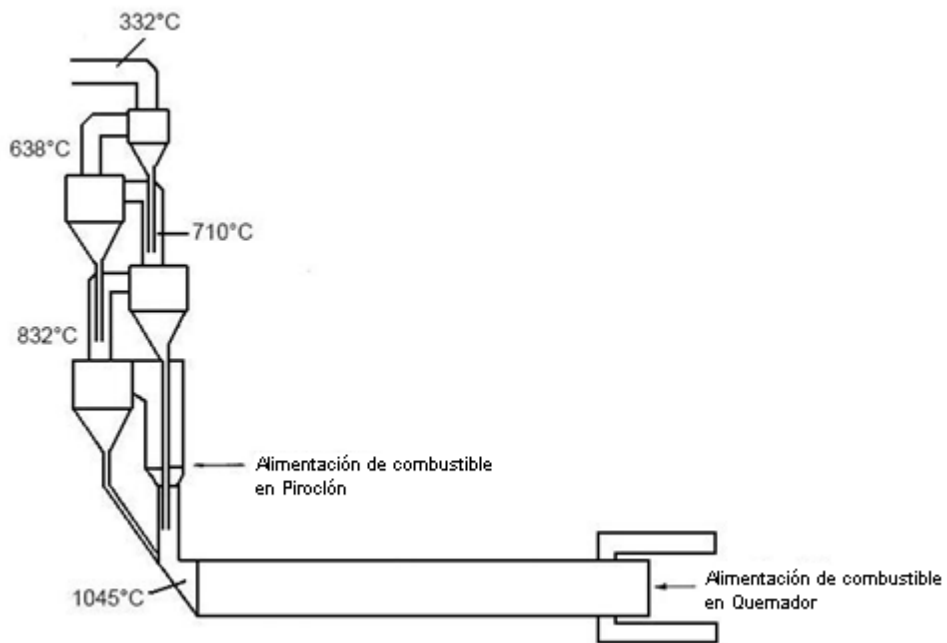


Figura 2. Suministro de combustible al horno.

En el proceso de calcinación de la planta Caracolito se alimenta el 60% del combustible suministrado al horno por el Piroclón y los 40% restantes son alimentados por el Quemador.

El proceso de calcinación consta de cinco zonas, la primera es la de descarbonatación. En esta zona, el carbonato de calcio (CaCO_3) se disocia en dióxido de carbono (CO_2) y en óxido de calcio (CaO) que constituyen aproximadamente el 80% del crudo. Este proceso es endotérmico, y comienza a partir de una temperatura de 650°C ⁽¹⁷⁾.

La zona de calentamiento se caracteriza por un incremento rápido de temperatura en el material que forma la carga del horno, debido a que el requerimiento de calor para la descarbonatación ha terminado ⁽¹⁷⁾.

La zona líquida empieza a 1.300°C . La formación de fase líquida es muy rápida debido al efecto eutéctico que se tiene con la relación existente entre el Fe_2O_3 y Al_2O_3 . El punto eutéctico se tendrá con la relación $A/F = 1.38$. ⁽¹⁸⁾

En la zona de temperatura máxima se alcanzan los 1.450°C y se localiza donde la flama tiene la máxima radiación hacia el material, por último está la zona de enfriamiento donde el clinker se solidifica. ⁽¹⁸⁾

Una vez es enfriado el clinker es almacenado en un silo de 60.000 toneladas.

1.3 Molienda de cemento

En el proceso de molienda de cemento se estipula el tipo de cemento que se desea producir y es determinado por las cantidades de clinker, yeso y puzolana que se adicionen a la mezcla final. El objetivo de la molienda es reducir el tamaño de las partículas hasta lograr un 45% pasante de malla $32\ \mu\text{m}$ ⁽¹⁹⁾, para esto la empresa utiliza un molino de bolas que opera en estado continuo, finalmente se deposita el cemento terminado en un silo de almacenamiento.

1.4 Empaque

El cemento tal como se conoce comercialmente es empacado según especificaciones del cliente ya sea en bolsas de 50 kg, en “big bags” de 1.000 kg o en vehículos tolva para la venta a granel. ⁽²⁰⁾

2. METODOLOGIA

La evaluación de las cinco fuentes de biomasa residual, como combustibles para el horno 2 de la planta Caracolito, se llevó a cabo de acuerdo a la metodología que se presenta en la figura 3:

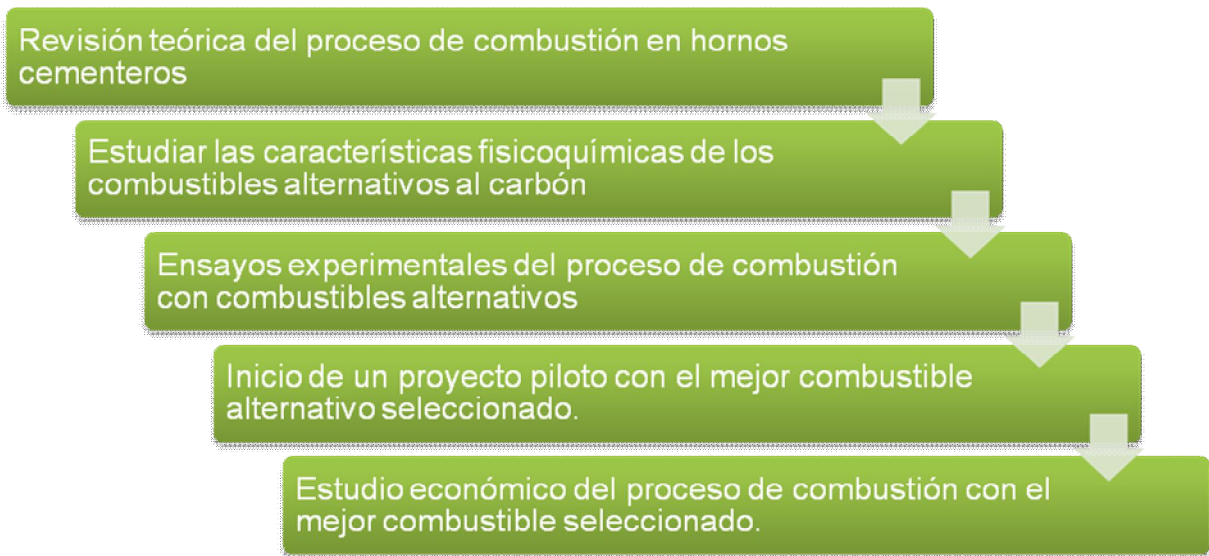


Figura 3. Diagrama de etapas de la metodología.

2.1 Revisión teórica del proceso de combustión en hornos cementeros:

Se estudió el proceso de producción de cemento, haciendo especial énfasis en la etapa de clinkerización, donde el carbón es utilizado para lograr la combustión que transforma el crudo en clinker.

2.2 Estudiar las características fisicoquímicas de los combustibles alternativos al carbón:

En la tabla 2 se indica la procedencia de las muestras de combustibles alternativos utilizadas en el estudio.

Fuente de Biomasa	Empresa	Ubicación
Lodos de PTAR	Acueducto de Bogotá	Bogotá D.C
Cascarilla de arroz	Molinos Roa S.A	Ibagué (Tolima)
Tallo de arroz	Finca productora	Ibagué (Tolima)
Aceite de Jatropha	Jatropha curcas S.A	Puerto Aceitico (Meta)
Cáscara de Jatropha	Jatropha curcas S.A	Puerto Aceitico (Meta)

Tabla 2. Entidades proveedoras de la biomasa para estudio.

A las muestras se les determinaron los parámetros que se indican en la tabla 3. Las tres propiedades medidas son los pilares decisivos para determinar si es factible o no el uso del combustible en la fábrica, debido a que el comportamiento del carbón en el horno está históricamente definido por estas variables. Para la caracterización fisicoquímica se tomaron dos muestras por biomasa, cada una en días diferentes para lograr resultados representativos. Las pruebas se realizaron en laboratorio de aseguramiento de la calidad de la planta Caracolito de Cemex.

Tipo de análisis	Instructivo de ensayo	Formato de registro
Humedad	COI-ASC-IT-14	COI-ASC-IT-44/1 - SICA
Cenizas	COI-ASC-IT-21	
Poder Calorífico Inferior (PCI)	COI-ASC-IT-50	

Tabla 3. Ensayos fisicoquímicos realizados a la biomasa de estudio.¹

El PCI se determinó con un calorímetro PARR 6200, el cual utiliza una bomba de vacío y oxígeno para realizar la combustión del material.

2.3 Ensayos experimentales de combustión con los combustibles alternativos.

En el mes de Mayo de 2009 se realizaron los ensayos experimentales del proceso de combustión. La finalidad fue analizar la composición de los óxidos de las

¹ Fuente: Proceso de aseguramiento de la calidad de Cemex Colombia

cenizas de las fuentes de biomasa estudiadas, esto porque finalmente después de la combustión se mezclan con el clinker producido para formar el producto final. Para tal fin se utilizó un equipo fluorescencia de rayos x (PANALYTICAL), el cuál determina los óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 , Mn_2O_3 , SrO y ZnO , en las muestras de biomasa, siendo éstos los que afectan directamente la calidad del clinker.

2.4 Inicio de un proyecto piloto con el mejor combustible alternativo seleccionado.

Con los resultados obtenidos, se comparó cual de los combustibles estudiados tenía el mayor PCI y el menor porcentaje de cenizas y humedad. Luego, se comparó cuales cenizas afectaban menos la composición del clinker. Estas observaciones tenían como fin escoger a una de las fuentes renovables de energía para iniciar un proyecto piloto.

Teniendo en cuenta los anteriores parámetros, se seleccionó la *Jatropha curcas* como el combustible más conveniente, con el cual se inició el proyecto piloto con las siguientes etapas: germinación y siembra, trasplante a campo y alimentación al sistema, las cuales iniciaron en el mes de junio 2009 y se espera terminar en el mes de Abril 2010.

El alcance del proyecto piloto en la práctica empresarial fue la primera etapa.

Este proyecto inició con la compra de las semillas suministradas por la empresa *Jatropha Curcas S.A* ubicada en el departamento del Meta. Se hicieron dos grupos de semillas de igual cantidad para realizar dos tipos de siembra, uno fue el uso de bancos germinadores, los cuales se le aplicaron los nutrientes, insecticidas y herbicidas que describe la literatura ⁽²¹⁾ y el otro fue el uso de bandejas germinadoras para facilitar el proceso y optimizar los recursos, debido a que el uso de humus por este método es menor.

El mantenimiento y seguimiento de las plántulas fue hecho de manera continua de tal forma que al final de la práctica empresarial, estas estaban listas para su trasplante a campo.

2.5 Estudio económico del proceso de combustión con el mejor combustible seleccionado.

Una vez el proyecto piloto termine, la compañía desea extender la siembra de *Jatropha curcas* a la totalidad de los terrenos adscritos a la empresa. Por lo tanto se tuvo en cuenta el rendimiento del cultivo de *Jatropha* año por año, la energía requerida por el sistema de combustión y el carbón utilizado para llevar a cabo dicha combustión, para poder calcular cual sería el porcentaje de sustitución de carbón alcanzado con la biomasa obtenida.

Con la producción anual de biomasa, se establecieron los flujos máxicos a manejar por el sistema de extracción y alimentación al horno de cáscara y aceite de *Jatropha*. Luego, se realizó el diseño básico de ingeniería para determinar el valor de los equipos y accesorios necesarios. Con estos datos se determinaron los costos, para calcular el retorno de la inversión por medio del VPN, TIR y PAY BACK.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Estudio de las características fisicoquímicas de los combustibles alternativos

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas realizadas a las biomásas consideradas en este estudio.

Tipo de Biomasa	Humedad % p/p	Poder calorífico inferior kcal/kg	Cenizas % p/p
Lodos de PTAR	69,80	1.516	63,4
Cascarilla de arroz	9,64	3.719	18,4
Tallo de arroz	10,72	3.472	19,8
Cascarilla de <i>Jatropha curcas</i>	19,85	3.214	20,4
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	NR	8.160	0,0
Carbón	9,21	6.791	19,23

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa.

De la tabla anterior es importante observar que los lodos de PTAR tienen una humedad bastante alta 69,8%, lo que deduce que se necesita un tratamiento térmico para eliminar el agua contenida y así poder ser usado como combustible, disminuyendo su potencial energético considerablemente. Adicionalmente se observó que estos lodos presentan el menor valor de PCI, lo cual incide en la capacidad de entregar energía al proceso.

El aceite de *Jatropha* es la biomasa estudiada con mejores características fisicoquímicas, para la producción de cemento se destaca el hecho de que su PCI

es el más alto. Se deduce que este aceite produce totalmente material volátil garantizando que los residuos sólidos de la combustión sean mínimos con tendencia a 0% de cenizas.

Cabe señalar que las propiedades fisicoquímicas de la cascarilla y del tallo de arroz son similares, lo que supone que el comportamiento en la combustión sea semejante.

Se puede decir que la *Jatropha curcas* es la biomasa estudiada con las mejores características fisicoquímicas para la implementación en hornos cementeros, seguida de la cascarilla y tallo de arroz, y por último los lodos de PTAR, que no poseen las propiedades necesarias para garantizar una combustión ecológica y rentable.

3.2 Composición de las cenizas:

Una vez el biocombustible es utilizado en el horno, se genera un residuo o cenizas las cuales se mezclan con el producto (clinker). La tabla 5 expone la composición de las cenizas obtenidas de la combustión en el horno.

Óxidos		CENIZAS					
		Lodos de PTAR	Cascarilla de arroz	Tallo de arroz	Cáscara de <i>Jatropha</i>	Aceite de <i>Jatropha</i>	Carbón
SiO ₂	% p/p	57,76	80,20	80,93	79,95	0,0	61,90
Al ₂ O ₃	% p/p	11,25	0,18	0,41	0,17	0,0	21,95
Fe ₂ O ₃	% p/p	12,02	0,10	0,24	0,10	0,0	7,36
CaO	% p/p	4,18	0,25	5,73	3,32	0,0	0,40
MgO	% p/p	1,09	0,30	1,16	0,90	0,0	1,15

SO₃	% p/p	0,06	0,11	0,32	0,09	0,0	0,05
Na₂O	% p/p	0,29	0,16	0,32	0,28	0,0	0,33
K₂O	% p/p	0,79	1,27	4,03	1,76	0,0	2,25
P₂O₅	% p/p	6,06	0,46	0,85	0,55	0,0	0,17
TiO₂	% p/p	0,72	0,01	0,02	0,10	0,0	0,92
Mn₂O₃	% p/p	0,05	0,21	0,45	0,20	0,0	0,01
SrO	% p/p	0,03	0,00	0,04	0,03	0,0	0,02
ZnO	% p/p	0,21	0,02	0,02	0,02	0,0	0,02

Tabla 5. Composición química de las cenizas de los combustibles.

La significativa presencia de óxido de sílice en las cenizas de la cascarilla de arroz, el tallo de arroz y la cáscara de *Jatropha* ocasiona un incremento en sílice libre; esto puede aumentar el consumo de combustible debido a que se requiere temperaturas más altas para acelerar el proceso de reacción y permitir la adecuada combinación de este óxido.

La presencia de K₂O en el tallo de arroz actúa como catalizador facilitando la formación a fase líquida, implicando que la reacción de clinkerización ocurra a temperaturas menores.

El alto contenido de P₂O₅ en los lodos de PTAR acelera la reacción de clinkerización debido a que actúa como catalizador en la formación de los silicatos cálcicos. Igualmente el silicato tricálcico formado puede presentar tendencia a descomponerse en el proceso de enfriamiento. Este último efecto se magnifica teniendo en cuenta que el contenido de cenizas en los lodos de PTAR asciende a 69,8 %.

Las cenizas de los residuos agrícolas estudiados tienen características químicas similares. Así, se podría aplicar el mismo diseño de harina cruda para cualquiera de los tres biocombustibles.

El hecho de que la combustión del aceite de *Jatropha* no produzca residuos sólidos, es una ventaja para el proceso, ya que es una variable menos para controlar y al utilizarse al mismo tiempo con la cáscara se espera estabilidad en la composición final del clinker.

De lo anterior se puede descartar los lodos de PTAR como una fuente de energía alternativa al carbón en la planta Caracolito. Mientras que la biomasa de origen vegetal tiene las condiciones técnicas para su implementación; pero en especial la *Jatropha* es de la que se espera un mejor comportamiento en el proceso.

Por lo tanto se selecciona la *Jatropha* como la mejor opción para iniciar el proyecto piloto de sustitución de carbón.

3.3 Inicio de un proyecto piloto con el mejor combustible alternativo seleccionado.

La tabla 7 muestra la evolución de las plántulas de *Jatropha curcas* con relación a la edad de las mismas, utilizando los bancos germinadores para la siembra inicial.

Edad de la Plántula	Altura [cm]	Riego	Observaciones
Semana 1	0	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	No se observa brote de alguna semilla.
Semana 2	0 – 3	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	El 80% de las semillas han germinado.
Semana 3	3 – 9.5	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	El rendimiento de la semilla fue de 89%, las plántulas más grandes tienen sus hojas totalmente formadas.
Semana 4	9 – 20	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	Los bancos germinadores se encuentran totalmente llenos y las plántulas están listas para su trasplante a bolsa.

Trasplante a bolsa de 15 x 20 cm			
Semana 5	9 – 20	Diario – antes de 7 am	Las plántulas recienten la manipulación y detienen su crecimiento. Pierden su color verde característico y algunas hojas.
Semana 6	10 – 23	Diario – antes de 7 am	Todas las plántulas toman de nuevo color, y vitalidad
Semana 7	19 – 32	Diario – antes de 7 am	Esta fue la semana en la que el crecimiento fue mayor.
Semana 8	28 – 40	Diario – antes de 7 am	Con rendimiento de 100% de plántulas germinadas, estas están en las condiciones para su trasplante a campo abierto.

Tabla 6. Evolución del crecimiento de las plántulas de *Jatropha* utilizando bancos germinadores.

La tabla 8 muestra la evolución de las plántulas durante el proceso de germinación en bandeja.

Edad de la Plántula	Altura [cm]	Riego	Observaciones
Semana 1	0	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	No se observa brote de alguna semilla.
Semana 2	0 – 2	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	El 55% de las semillas han germinado, pero su tamaño es reducido.
Semana 3	2 – 5	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	El rendimiento de la semilla fue de 70%, la mayoría tienen sus hojas formadas.
Trasplante a bolsa de 15 x 20 cm			
Semana 4	4 – 5	Diario – antes de 7 am	Las plántulas más grandes recienten la manipulación, pero las más pequeñas continúan su crecimiento normal.
Semana 5	7 – 12	Dos veces diario, antes de 7 am y después de 6 pm	El crecimiento es lento
Semana 6	11 – 18	Diario – antes de 7 am	Todas las plántulas toman de nuevo color, y vitalidad.
Semana 7	16 – 26	Diario – antes de 7 am	Esta fue la semana en la que el crecimiento fue mayor.

Semana 8	19 – 31	Diario – antes de 7 am	Las plántulas continúan su crecimiento normal.
Semana 9	27 – 38	Diario – antes de 7 am	Las plántulas están listas para ser sembradas a campo abierto.

Tabla 7. Evolución del crecimiento de las plántulas de Jatropha utilizando bandejas germinadoras.

Los anteriores resultados dan prueba que utilizando bancos germinadores para iniciar el proceso de siembra dan mayor rendimiento en tiempo, logrando que a la semana 8 las plántulas tengan las condiciones para iniciar la segunda etapa. Asimismo, es de gran importancia destacar que el rendimiento de siembra resultó mayor usando los bancos, llegando a un 11% de mortalidad en comparación al 30% que se obtuvo con las bandejas.

Al utilizar las bandejas germinadoras se observa que el crecimiento se ve limitado, resulta válido afirmar que debido al pequeño espacio ocupado por cada semilla restringe esta facultad.

3.4 Estudio Económico del proceso de combustión con el mejor combustible seleccionado.

El rendimiento del aceite y cáscara de Jatropha utilizado en la tabla 9, se obtuvo previamente y se puede observar en la tabla 8.

Cultivo	Residuo generado	rendimiento de residuo %p/p
Jatropha curcas (Variedad Cabo verde)	Aceite	19,25 (del fruto)
	Cáscara	45 (del fruto)

Tabla 8. Rendimiento del fruto de Jatropha Curcas variedad cabo verde.

Con base en la energía requerida por el sistema de combustión de línea 2 y teniendo en cuenta el rendimiento del cultivo de Jatropha para la totalidad de los terrenos disponibles de la empresa, se presenta la tabla 9 con una proyección a 6 años de la capacidad de sustitución de carbón por biomasa.

CONCEPTO		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6
Frutos cosechados de Jatropha curcas	Ton/año	942	4.710	9.420	14.130	23.550	28.260
Energía requerida para la producción objetivo de clinker en horno 2 ²	Mcal/día	2.858.520	2.858.520	2.858.520	2.858.520	2.858.520	2.858.520
Carbón requerido para la producción objetivo de clinker en horno 2	Ton/año	147.809,3	147.809,3	147.809,3	147.809,3	147.809,3	147.809,3
Sustitución de carbón en el Quemador del horno por Aceite de Jatropha (ver figura 2).							
Carbón alimentado en Quemador para la producción objetivo de clinker en horno 2.	Ton/año	59.123,7	59.123,7	59.123,7	59.123,7	59.123,7	59.123,7
Aceite de Jatropha extraído de los frutos cosechados.	Ton	181,3	906,7	1.813,4	2.720,0	4.533,4	5.440
Total de carbón reemplazado con aceite de Jatropha en Quemador	% p/p	0,48	2,42	4,84	7,26	12,10	14,52
Sustitución de carbón en el Piroclón por cáscara de Jatropha (ver figura 2).							
Carbón alimentado en el Piroclón para la producción objetivo de clinker en horno 2.	Ton/año	88.685,6	88.685,6	88.685,6	88.685,6	88.685,6	88.685,6
Cáscara de Jatropha extraída de los frutos cosechados.	Ton	423,9	2.119,5	4.239	6.358,5	10.597,5	12.717
Total de carbón reemplazado con cáscara de Jatropha en Piroclón.	% p/p	0,43	2,15	4,30	6,45	10,75	12,90
Total de carbón sustituido por aceite y cascarilla de Jatropha.	Ton/año	667,7	3.338,6	6.677,1	10.015,8	16.692,9	20.031,51
PORCENTAJE DE CARBÓN SUSTITUIDO POR JATROPHA.	% p/p	0,5	2,3	4,5	6,8	11,3	13,6

Tabla 9. Sustitución anual de carbón por cáscara y aceite de Jatropha curcas para horno 2.

² Fuente: Gerencia de proceso de Cemex Colombia

A partir del año 6 la producción de Jatropha y la capacidad de sustitución se mantienen constantes hasta que termine la vida productiva de la plantación, aproximadamente 45 años.

Es importante resaltar que el proyecto no resulta eficiente en los primeros años de implementación teniendo en cuenta el bajo porcentaje de sustitución que se alcanza, pero una vez el cultivo se estabiliza y las cosechas se hacen de forma más continua, la sustitución de carbón alcanza el 13,55%, lo que equivale al ahorro en la compra de 20.031,5 toneladas de carbón, que a precios del 2009 representan para la compañía aproximadamente 2.604 millones de pesos y una reducción de emisiones de 73.448,8 toneladas de CO₂ para reducir así la contaminación.

3.4.1 Análisis financiero del proyecto

La figura 4 muestra el diagrama diseñado para la alimentación de biomasa al horno de la planta caracolito.

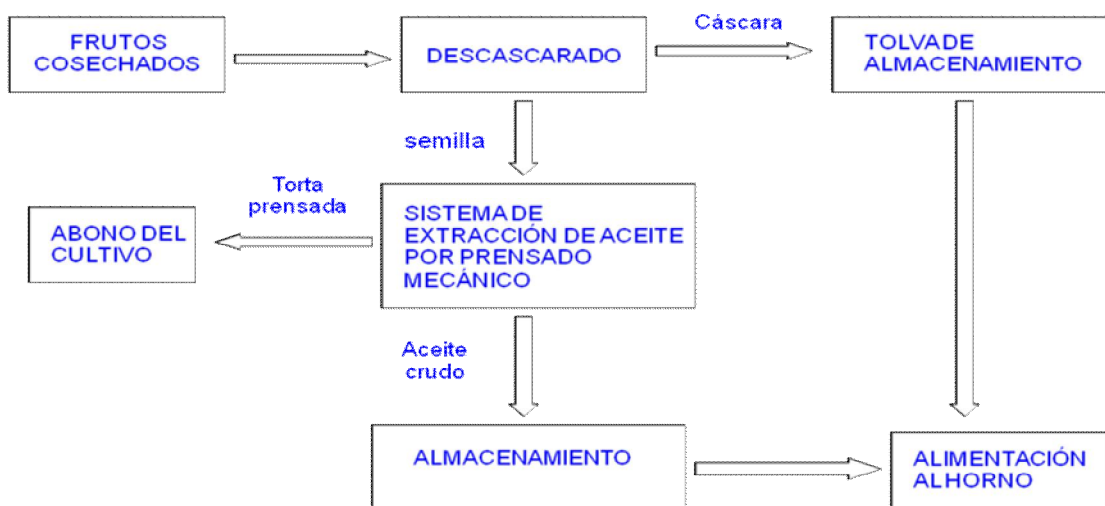


Figura 4. Diagrama de alimentación de cáscara y aceite de Jatropha al horno.

La tabla 10 muestra el capital de inversión planteado para el proyecto, a precios del año 2009.

Concepto	Unidad	Total
Siembra		
Semillas de <i>Jatropha curcas</i> (variedad cabo verde)	Pesos	\$ 200.175.000 ³
Mano de obra para la siembra	Pesos	\$ 1.507.200.000
Equipos de transformación		
Tolva de dosificación y almacenamiento de 6000 toneladas	Pesos	\$102.700.000 ⁴
Sistema de extracción de cáscara 3000 L/h	Pesos	\$216.650.000 ⁴
Prensa mecánica de 3000 L/h	Pesos	\$155.400.000 ⁴
Tanque de almacenamiento de 4000 toneladas	Pesos	\$81.800.000 ⁴
Filtro prensa de 3000 L/h	Pesos	\$39.400.000 ⁴
Tuberías, bombas y accesorios	Pesos	\$204.200.000 ⁴
Instalación y Puesta en marcha	Pesos	\$427.350.000 ⁴

Tabla 10. Capital de inversión inicial para el proyecto de sustitución de carbón.

Se definió como ingresos la suma del dinero que se ahorra por la no compra de carbón y la venta de los bonos de carbón que se obtienen por la sustitución realizada en el respectivo año.

El flujo de caja que se muestra en la tabla 11, se determinó teniendo en cuenta que el tiempo proyectado para el montaje y ejecución es de 9 años y la evaluación financiera está hecha en pesos colombianos.

³ Fuente: *Jatropha curcas* Plantations of Australia.

⁴ Fuente: Industrias Espinel S.A.

Inversión 2.934.875.000	COSTOS	INGRESOS	FLUJO DE CAJA
Año 1	4.459.475.374	126.366.458	- 4.333.108.916
Año 2	2.857.027.305	673.063.819	- 2.183.963.486
Año 3	1.861.919.111	1.428.590.698	- 433.328.414
Año 4	1.245.230.639	2.266.580.635	1.021.349.995
Año 5	885.860.418	3.983.792.038	3.097.931.620
Año 6	905.833.173	5.027.939.622	4.122.106.449
Año 7	905.833.173	5.275.328.798	4.369.495.625
Año 8	905.833.173	5.522.717.975	4.616.884.801
Año 9	905.833.173	5.770.107.151	4.864.273.978

Tabla 11. Costos e ingresos del proyecto a nueve años.

Es de notable importancia observar que el proyecto en los primeros tres años produce pérdidas económicas como resultado por la poca cosecha que se puede realizar en este tiempo y el excelente mantenimiento que debe tener la plantación para garantizar la calidad de los frutos. A partir del cuarto año el flujo de caja es positivo y este va incrementando año a año alcanzando así en el noveno año la diferencia más alta.

El rigor del mantenimiento disminuye con el tiempo hasta que en el sexto año las necesidades del cultivo se limitan a los respectivos plateos, fertilización y riego mínimo. Por el contrario los ingresos aumentan hasta el año 6 que la producción de biomasa se hace constante, el incremento que se ve en los años siguientes es el producto del aumento del precio del carbón para dichos períodos.

3.4.2 Análisis del VPN, TIR y PAY BACK

La tabla 12 muestra el cálculo del retorno de la inversión si el proyecto es iniciado hasta finales año 2010.

PARÁMETRO	ESTIMADO
TASA	9,50%
PAYBACK	6,4 AÑOS
VPN	5.658.875.147
TIR	24%

Tabla 12. Retorno de la inversión.

Al paso de 6.4 años el dinero bruto invertido es recuperado, pero sin contar con la inflación anual.

El valor presente neto (VPN) derivado de la evaluación financiera del proyecto se estimó con una tasa de inflación anual del 9,5%, con un resultado de 5.658.875.147 pesos, siendo éste valor positivo el proyecto tiende a ser atractivo.

Con base en el VPN estimado, se puede calcular que la tasa interna de retorno del proyecto es del 24%, un valor no muy alto para un proyecto de tan grande inversión, pero se garantiza el auto sostenimiento energético parcial de la planta cementera por un periodo igual a la vida productiva del cultivo.

Es relevante aclarar que el proyecto en general es económicamente factible si se analiza a largo tiempo, ya que los primeros años el saldo resulta siempre negativo.

4. CONCLUSIONES

La biomasa como la cascarilla de arroz, el tallo de arroz, el aceite y la cáscara de *Jatropha* tienen características fisicoquímicas aptas para su implementación en hornos cementeros y así sustituir parte de los combustibles tradicionales utilizados.

La composición de las cenizas de los combustibles alternativos analizados contienen exceso de óxido de sílice, componente que puede ocasionar daños a los equipos y deteriorar la calidad del clinker, pero esto es fácilmente controlado al momento del diseño de la harina cruda eliminando su componente de sílice libre antes de ser calcinada.

La primera etapa del proyecto piloto piloto demuestra que es posible realizar el proceso de germinación de semillas de *Jatropha* (variedad cabo verde) en vivero, utilizando bandejas y bancos germinadores, siendo este último el recurso más eficiente para la actividad.

El análisis económico muestra que la implementación de un cultivo de *Jatropha* curcas de 942 hectáreas y de tecnologías para la extracción de aceite y cáscara, son rentables a largo plazo, porque a pesar del balance negativo de los primeros años a partir del sexto período, se tiene un buen margen de utilidad.

5. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que los hornos de la planta caracolito trabajan de forma continua, es recomendable para el proyecto de sustitución de carbón, realizar una siembra “escalonada” en el tiempo de manera que todos los meses se pueda recolectar frutos y garantizar que los equipos de extracción de biomasa funcionen en estado estable.

Debido a las políticas institucionales de incentivar el estudio de fuentes alternativas de energía para sus procesos. Es recomendable diseñar un formato para llevar los diferentes registros con la información técnica y económica de los combustibles analizados.

6. BIBLIOGRAFIA

1. UNITED NATIONS. Acta. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto, Diciembre 1997.
2. CEMEX CENTRAL. Informe corporativo. *Como se produce el Cemento Portland*. México D.F, Noviembre 2006.
3. CEMEX CENTRAL. Informe corporativo. *Introducción a la Producción de Clinker*. Bogotá, Junio 1995.
4. CEMEX COLOMBIA. *Registro MOP anual Planta Caracolito*. Ibagué, 2008.
5. CEMEX MÉXICO. Informe corporativo. *Estrategia de Consumo de Lodos*. Monterrey, Noviembre 2007.
6. [Citado el: 15 de Septiembre de 2009.]
http://www.cemex.com/espa/gl/gl_mx.asp.
7. ASOCIACIÓN DE CULTIVADORES DE CAÑA DE AZUCAR. Informe de la asociación. *Producción Mundial de la Caña*. Bogotá, 2007.
8. ESCALANTE, H. et al. *Oferta Energética de la Biomasa Residual en Colombia* . Centro De Estudio e Investigaciones ambientales CEIAM. Bucaramanga, pag 11, 2008.
9. CORREDOR, O. *Evaluación del Potencial Energético de la Masa Residual en Colombia*. Bucaramanga : UIS, Tesis de grado, 2009.
10. EMPRESA BIO+A. Informe corporativo. *Estudio de Cascarilla de Arroz y Cisco de Café en Colombia*. Bogotá, pag 7-8, 2008.

11. TORRES, C. *Ficha Técnica de la Jatropha Curcas, Cultivos energéticos S.A.* El Rosario Ltda., 2007.
12. LOZANO, M. *Evaluación de Factores Técnicos y Ambientales para la Sustitución de Combustibles Fósiles.* Bogotá : Tesis de grado. Universidad de los Andes, pag 37-45, Diciembre 2008.
13. CEMEX CENTRAL. Informe corporativo. *Prontuario de la Producción de cemento, Molienda de Crudo.* México D.F, pag 5. 2004.
14. CEMEX CENTRAL. Informe corporativo. *Cem01_Cemento Portland.* México D.F, 1997.
15. DUDA, W. *Manual Tecnológico del Cemento.* España : Editores Técnicos Asociados, 1967.
16. CEMEX CENTRAL. Informe corporativo. *Tecnología Cemex, Módulo de Calcinación.* México D.F, 1997.
17. LABAHM, O. *Prontuario Diagnóstico del Proceso de Cemento.* España : 5° Edición Española de B. Kohlhaas, 1985.
18. CEMEX CENTRAL. *Prontuario para la fabricación de Cemento, Módulo de Clinkerización.* México D.F, pag 5-10, 2004.
19. CEMEX CENTRAL. *Prontuario para la fabricación de Cemento, Módulo de Molienda de Cemento.* México D.F, pag 24, 2004.
20. CEMEX COLOMBIA. Informe corporativo. *Empaque y Servicio al Cliente.* Bogotá, pag 12, 2004.
21. JOERDENS, D. *Guía de Producción de Jatropha Curcas.* Lima, 2007.

ANEXO 1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO.



1. Explotación de materias primas:

De las canteras de piedra se extrae la caliza y la arcilla a través de barrenación y detonación con explosivos.



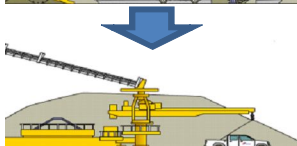
2. Transporte de materias primas:

Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se transportan a la planta en camiones o bandas mecánicas.



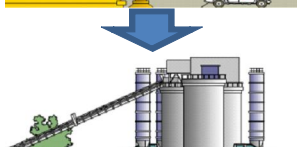
3. Trituración

El material de la cantera es fragmentado en los trituradores, cuya tolva recibe las materias primas, que por efecto de impacto y/o presión son reducidas a un tamaño máximo de una y media pulgadas.



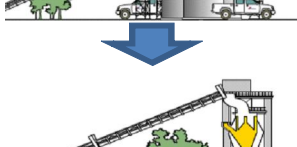
4. Prehomogenización

La Prehomogenización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla, caliza o cualquier otro material que lo requiera.



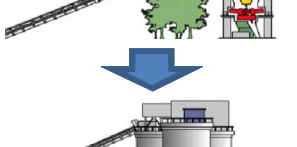
5. Almacenamiento

Cada una de las materias primas es transportada a silos, donde son dosificadas para la producción de diferentes tipos de cemento.



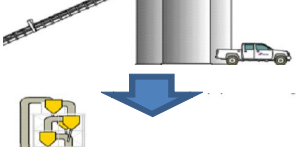
6. Molienda de materia prima

Se realiza por medio de un molino vertical de acero, que muele el material por la presión que ejercen tres rodillos cónicos al rodar sobre una mesa giratoria de molienda. Se utilizan también molinos horizontales, en cuyo interior el material es pulverizado por medio de bolas de acero.



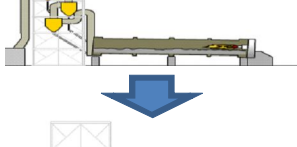
7. Homogenización de harina cruda

Se realiza en silos equipados para lograr una mezcla homogénea del material



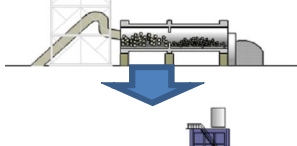
8. Calcinación

La calcinación es la parte medular del proceso, donde se emplean grandes hornos rotatorios que a 1450 °C, transforman la harina cruda en clinker con tamaño de 3 a 4 cm.



9. Molienda de cemento

El clinker es molido a través de bolas de acero de diferentes tamaños a su paso por el molino, agregando el yeso para aumentar el tiempo de fraguado del cemento.



10. Empaque y despacho del cemento

El cemento es enviado a los silos de almacenamiento, de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado hacia donde será empacado.

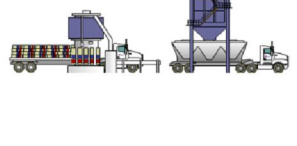


Figura 5. Proceso de producción de cemento

ANEXO 2. FLUORECENCIA DE RAYOS X (XRF).

La fluorescencia de rayos X es un método para determinar la composición química de toda clase de materiales, estos materiales pueden estar en estado líquido, sólido, en polvo, etc. El método es rápido, acertado y no destructivo, y usualmente requiere de solo una pequeña muestra para su análisis.

Los sistemas de espectrometría se dividen en dos grupos principales: sistemas de dispersión de energía (EDXRF, tienen un rango desde el Na hasta el U) y sistemas de dispersión de longitud de onda (utilizado en el estudio) (WDXRF, con un rango desde el Be hasta el U). El rango de concentración va en niveles de partes por millón al 100%. Generalmente los elementos con números atómicos más altos tienen mejores límites de detección que aquellos elementos livianos.

La precisión y reproducibilidad del análisis XRF es muy alta, en la figura 6 se observa un espectro común elaborado por el equipo.

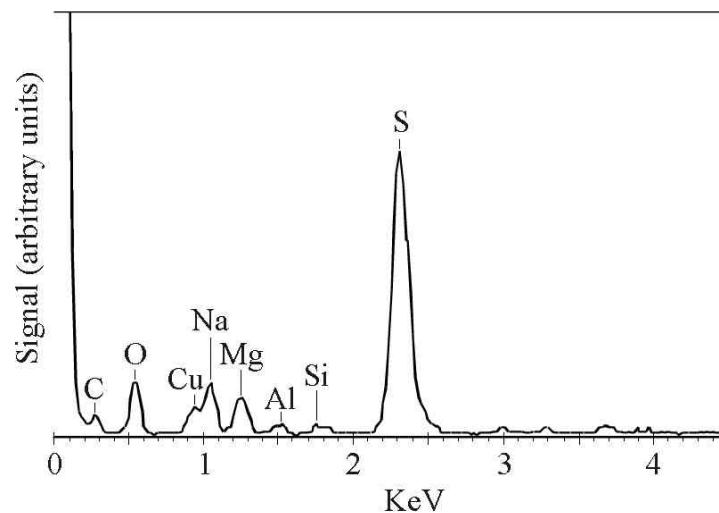


Figura 6. Espectro común elaborado por el equipo de XRF

Funcionamiento: Cuando los átomos de la muestra son irradiados por fotones de rayos X primarios de alta energía, los electrones son expulsados en forma de

fotodectrones. Esto crea “huecos” de electrones en uno o más orbitales, convirtiendo los átomos en iones, los cuales son inestables.

Para restaurar los átomos a su estado más estable, los huecos en los orbitales interiores son llenados con electrones de orbitales externos. Tal transición puede ser acompañada con una emisión de energía en forma de un fotón secundario de rayos X, fenómeno conocido como fluorescencia.

Los varios orbitales de electrones son llamados K, L, M, etc., donde K es el orbital más cercano al núcleo. Cada uno corresponde a un nivel diferente de energía y la energía (E) de los fotones fluorescentes emitidos es determinada por la diferencia de energía entre el orbital inicial y final para las transiciones individuales, esto es descrito por $E=hc/\lambda$, donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda del fotón. Por tanto la longitud de onda es inversamente proporcional a la energía y es característica de cada elemento. Además la intensidad de la emisión es proporcional a la concentración del elemento responsable en la muestra.