

ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL USO DE RESIDUOS ACEITOSOS COMO
COMBUSTIBLE ALTERNO DE UN HORNO CEMENTERO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS

Director del trabajo de grado:

GUSTAVO MOLINA

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y ECONÓMICAS
MBA GLOBAL
BOGOTA, MAYO DE 2014

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	1
Palabras Claves	1
Introducción.....	2
Objetivos	5
Objetivo General.....	5
1. Capítulo I.....	6
1.1 Industria Petrolera	6
1.2 Proceso de tratamiento de residuos aceitosos	7
2. Capítulo II.....	11
2.1 Industria Cementera	11
2.2 Proceso de Fabricación del cemento.....	12
2.3 Consumo energético en la fabricación de cemento	15
2.4 Costos de energía como costo de producción.....	16
3. Capítulo III - Valoración energética del residuo aceitoso para la industria cementera	18
3.1 Resultados de laboratorio de la sub-borra	18
3.2 Potencial de aprovechamiento para la alimentación del horno.....	19
3.3 ¿Por qué aprovechar el residuo dentro del horno cementero?.....	21

3.4 ¿Cómo se puede anular la peligrosidad del residuo?	23
4. Capítulo IV – Marco Legal Aplicable	24
4.1 Marco Legal	24
4.2 Responsabilidades del productor de residuos	26
5. Capítulo V. Propuesta de proceso para el reaprovechamiento de residuos aceitosos	30
5.1 Condiciones de aceptación del residuo	30
5.2 Logística de transporte	31
5.3 Logística de almacenamiento	32
5.4 Co-procesamiento de residuo	33
6. Capítulo VI Análisis de viabilidad económica	35
6.1 Costos para el productor de las sub-borras	35
6.2 Costos para el consumidor del aceite residual	36
7. Capítulo VII Conclusiones	38
8. Capítulo VIII Recomendaciones	40
9. Bibliografía	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica del aceite residual.....	18
Tabla 2. Normatividad vigente para manejo de residuos peligrosos.....	28
Tabla 3. Relación de costos de transporte y tratamiento de Sub-borras.....	34
Tabla 4. Comparativo de costos.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de tratamiento de lodos aceitosos.....	7
Figura 2. Aspecto del residuo de producción petrolera.....	9
Figura 3. Proceso de fabricación de cemento.....	14
Figura 4. Potencial de reciclaje de materiales en una planta de cemento.....	33

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Georreferenciación ruta de transporte	31
---	----

Resumen

Este trabajo evalúa la viabilidad técnica y económica del uso de residuos de producción petrolera como combustible alternativo en hornos cementeros. Se trabaja con muestras de crudos pesados provenientes de campo Rubiales, en el departamento del Meta, con procedimientos basados en pruebas de laboratorio y soporte teórico en investigaciones existentes sobre la materia. Se logra validar la viabilidad técnica del uso sugerido y se comprueba el alto potencial que tienen los aceites residuales dentro de las industrias con procesos intensivos de calor. También se proponen recomendaciones prácticas para generar un caso de negocio atractivo para el remplazo parcial de combustibles tradicionales por combustibles alternos.

Palabras Clave: 1) Borrás 2) Sub-borrás 3) Aceite residual 4) Clinker 5) Co-procesamiento 6) Regulación ambiental

Introducción

Desde hace aproximadamente cuatro décadas se viene haciendo más frecuente la preocupación por el calentamiento global. Para nadie es un secreto que la contaminación generada por el aumento en la población y por los procesos industriales asociados al entorno económico de la sociedad han impactado de manera negativa el medio ambiente, deteriorando el equilibrio del planeta.

El mundo parece estar haciendo esfuerzos para contrarrestar la problemática, por ejemplo a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su protocolo de Kioto, <http://www.un.org/es/climatechange/kyoto.shtml>, buscando disminuir la generación de gases invernadero, e incentivando iniciativas de desarrollo limpio en diferentes industrias.

Lo anterior está alineado perfectamente con la tendencia de las industrias por buscar un incremento en su competitividad, las cuales al verse envueltas en entornos cada vez más exigentes buscan mecanismos diferentes para generar valor, así como disminuir y optimizar sus costos de producción. Es aquí donde el reaprovechamiento energético de residuos ha encontrado una gran oportunidad, al encontrarse industrias donde excedentes y necesidades son complementarios, presentándose espacios para la innovación, y en la búsqueda de nuevas fuentes energéticas aparecen los combustibles alternos como una opción para la

generación de energía térmica.

Actualmente la industria cementera en Colombia, consume en su gran mayoría combustibles fósiles convencionales como materia prima para sus hornos, restringiéndose estos a carbón, gas y diesel. Han sido contados los esfuerzos por vincular otro tipo de combustibles para la generación de energía térmica, y a la fecha la sustitución de combustibles convencionales por combustibles alternos provenientes de desechos es incipiente y poco desarrollada presentándose una oportunidad para el uso en la industria cementera, que es el objetivo del presente proyecto.

Las ventajas y beneficios del uso de combustibles alternos en hornos cementeros provenientes de residuos son variados, entre los más relevantes se pueden destacar:

- Evitar la disposición final de residuos contaminantes disminuyendo el impacto sobre el suelo.
- Conseguir la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, gracias a la disminución del consumo de combustible fósil.
- Disminuir la demanda por combustibles fósiles, lo que significa disminuir el impacto ambiental de la explotación de hidrocarburos.
- Lograr la neutralización de estos residuos peligrosos.
- Buscar una disminución en costos de producción.

Durante el presente documento se pretende determinar la viabilidad de usar un residuo de la producción petrolera, dentro del proceso de producción de energía térmica en la industria cementera.

Objetivos

Objetivo General

Determinar la viabilidad del uso de residuos de producción petrolera, en la sustitución parcial de combustibles fósiles empleados en los hornos de la industria cementera.

Para cumplir el objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Describir el proceso de tratamiento de residuos aceitosos y el proceso de elaboración de cemento
- Identificar el marco legal aplicable en los procesos realizados para el desarrollo del objetivo
- Realizar pruebas de laboratorio para determinar el poder calorífico de los residuos aceitosos como combustible alternativo
- Proponer un proceso para el uso de residuos aceitosos como combustible alternativo dentro del proceso de producción de cemento

1. Capítulo I

1.1 Industria Petrolera

Es innegable que el petróleo constituye hoy en día el motor de la economía colombiana, por ser el principal generador de renta externa por encima incluso del café, nuestro producto tradicional de exportación, y por ser la fuente principal de rentas para las regiones, bien a título de regalías por su explotación o por contribuciones fiscales en las distintas fases de su proceso, de acuerdo con Mayorga García Fernando, en su artículo de la revista Credencial Historia, La Industria Petrolera en Colombia (2002), recuperado de <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/julio2002/laindustria.htm>

De acuerdo con las cifras de la DIVISIÓN DE IMPUESTOS NACIONALES – DIAN-, el sector petrolero genera el 24 por ciento de los ingresos que por concepto de impuesto de renta percibe el gobierno nacional, con la relación más alta de impuesto causado sobre renta ordinaria (32% aproximadamente), siendo la tasa efectiva más alta del país.

Lo anterior, sumado a que la producción diaria de petróleo en Colombia a Diciembre de 2013 fue de 980.558 barriles, (Asociación Colombiana de Ingenieros de Petróleos ACIPET, 2014), ubicando a Colombia en el cuarto lugar entre los

países que más petróleo producen en Latinoamérica y en el puesto veintidós a nivel mundial, de acuerdo con la Organization of the Petroleum Exporting Countries OPEC, recuperado de: <http://opec.org/>, constituye un antecedente de interés para el objetivo del presente trabajo.

1.2 Proceso de tratamiento de residuos aceitosos

Los residuos aceitosos del proceso de producción de petróleo, también conocidos como borras, son el desecho más importante que genera la industria petrolera. Son en esencia una emulsión de varios hidrocarburos, agua, metales pesados y partículas sólidas. Debido a su naturaleza peligrosa y la creciente tendencia de aumento en los volúmenes generados no solo en Colombia sino a nivel mundial, el tratamiento efectivo de este residuo ha atraído una amplia atención por parte de entes de control en las áreas de influencia.

El proceso de tratamiento utilizado por compañías líderes en la industria inicia con la extracción del agua libre de los residuos aceitosos a tratar. Esta agua se envía al sistema de tratamiento de agua en campo y los residuos aceitosos se someten a un aumento de temperatura hasta alcanzar los 120 °C, con el propósito de evaporar el agua que queda emulsionada. Seguidamente se incrementa la temperatura de la emulsión existente hasta llegar a los 160 °C, con el fin de evaporar el agua emulsionada que haya quedado en el residuo, y extraer el crudo remanente.

Este volumen evaporado se condensa para luego pasarlo por una centrifuga vertical dando como resultado final:

- Liberación de componentes livianos del crudo.
- Agua y polímeros que son devueltos al sistema de tratamiento de agua en campo.
- Subproductos sólidos para relleno.

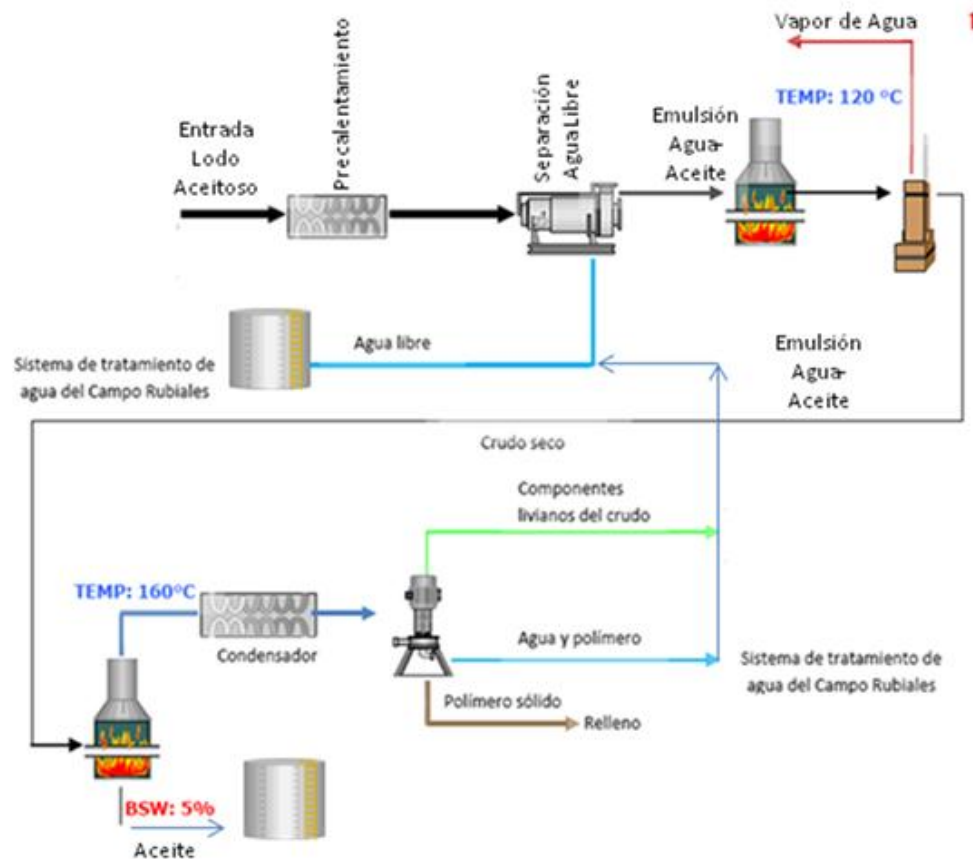


Figura 1 – Proceso de tratamiento de lodos aceitosos (Fuente: Memoria Corporativa de Pacific Rubiales Energy Corp.)

El subproducto resultante del proceso anterior, se conoce como sub-borra, y es el insumo principal del análisis de viabilidad que motiva el presente trabajo. Se trata de una mezcla de agua, sólidos y crudo en proporción promedio de 30, 60 y 10 por ciento respectivamente. Estudios de la Organization of the Petroleum Exporting Countries OPEC (2002), han estimado que la relación entre crudo procesado y sub-borras es de 500 a 1, y teniendo en cuenta la producción actual de campo Rubiales, principal campo del país en tamaño y producción diaria, que asciende a un promedio de 250.000 barriles/día, estamos hablando de un volumen aproximado de sub-borras de 500 barriles/día que representa un reto operacional importante. En el caso de Pacific Rubiales Energy, operadora de campo Rubiales, y por limitaciones de licencia ambiental como se verá en el capítulo IV del presente documento, se debe entregar dicho subproducto a un tercero licenciado, para su transporte, tratamiento y disposición final, incrementando los costos del proceso productivo que allí se desarrolla, los cuales pueden ascender en promedio a 65.000 pesos por barril tratado, según información suministrada por la compañía operadora del campo.



Figura 2 – Aspecto del residuo de producción petrolera (Fuente: Memoria Corporativa de Pacific Rubiales Energy Corp.)

2. Capítulo II

2.1 Industria Cementera

El cemento es el material más utilizado en la industria de la construcción a nivel mundial, en 2012 la producción mundial de cemento fue calculada en 3.6 Billones de toneladas, de acuerdo con The European Cement Association, recuperado de: <http://www.cembureau.eu/about-cement/key-facts-figures/> (2013). El cemento es un polvo muy fino que se obtiene después de un proceso de calcinación de roca caliza, este polvo al mezclarse con agua produce una reacción exotérmica que conlleva al endurecimiento del material permitiéndole adquirir propiedades muy útiles para la industria de la construcción.

El principal componente del cemento es el Clinker, el cual es obtenido después de la calcinación de roca caliza y arcillas a temperaturas superiores a los 1.200°C, proceso que permite obtener la materia prima del cemento, compuesta por silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferritoaluminato tetracálcico. Por las características propias del proceso que incluyen un horno que es llevado de manera permanente a altas temperaturas, la producción de Clinker demanda altas cantidades de energía calórica, la cual, especialmente en Latinoamérica, es generada en su mayoría a través de la combustión de combustibles fósiles.

El cemento es el componente principal del concreto, material que dentro de sus propiedades destaca la capacidad de absorber esfuerzos a la compresión, su durabilidad y capacidad estética para diferentes aplicaciones en la industria de la construcción. Entre las aplicaciones más frecuentes se encuentran la construcción de edificaciones para todo uso, carreteras y obras de infraestructura tales como acueductos, alcantarillados, sistemas de riego, presas, y centrales generadores de energía entre otras.

Actualmente en Colombia existen 8 compañías cementeras con producción en varias regiones del país para abastecer el mercado nacional, el cual según recientes mediciones, tiene un tamaño de once millones doscientas cincuenta y un mil novecientas toneladas (11.251.900.00 de acuerdo con el DANE (2014), recuperado de <http://www.dane.gov.co/index.php/construccion-alias/estadisticas-de-cemento-gris-ecg>

2.2 Proceso de Fabricación del cemento

El proceso de fabricación de cemento puede resumirse de manera muy general en diez pasos, los cuales son:

1. .Explotación de materias primas. De las canteras de piedra se extrae la caliza y la arcilla a través de perforación, instalación 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.
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. Pre homogenización. La pre homogenización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla, caliza o cualquier otro material que se requiera.
5. Almacenamiento de materias primas. Cada una de las materias primas es transportada por separado a silos en 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 mediante la presión que ejercen tres rodillos cónicos al rodar sobre una mesa giratoria de molienda. Se utilizan también para esta fase molinos horizontales, en cuyo interior el material es pulverizado por medio de bolas de acero.

7. Homogenización de harina cruda. Se realiza en los 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 en cuyo interior, a 1400°C la harina se transforma en Clinker, que son pequeños módulos de color gris oscuro 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 las dos cámaras del molino, agregando el yeso para alargar el tiempo de fraguado del cemento.
10. Envase y embarque del cemento. El cemento es enviado a los silos de almacenamiento; de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado a donde será empacado en sacos de papel, o surtido directamente a granel. En ambos casos se puede despachar en camiones, tolvas de ferrocarril o barcos.

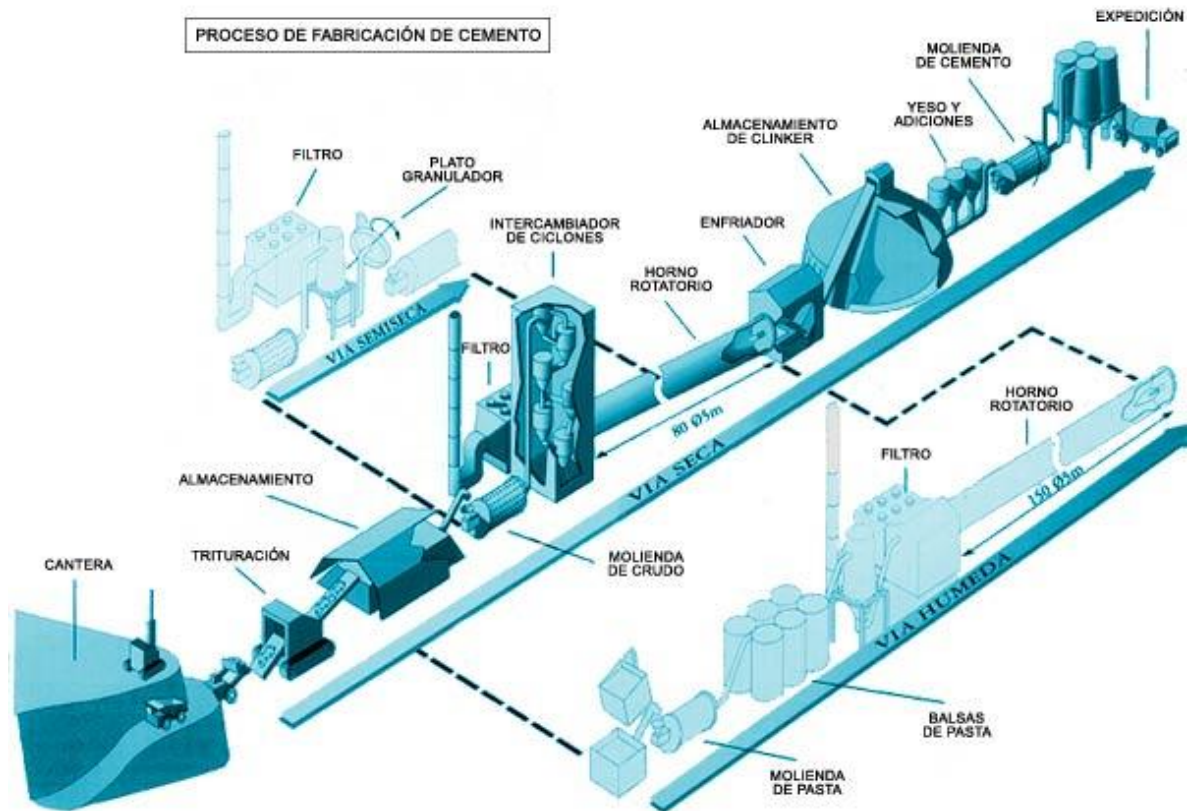


Figura 3 – Proceso de Fabricación de Cemento

(Fuente: <http://www.cementosdeandalucia.org/index.php?cPath=fabricacion&op=2>)

2.3 Consumo energético en la fabricación de cemento

El proceso de producción de cemento demanda altas cantidades de energía, tanto eléctrica como térmica. Es práctica común en la industria especialmente en países en vías de desarrollo como Colombia el uso de combustibles fósiles tradicionales, entre los cuales se destacan el carbón y el gas.

El consumo de energía térmica por tonelada producida de Clinker en Latinoamérica no ha variado mucho desde 2007. Para ese año el indicador se situaba en unos 3.700 MJ/Ton de Clinker producido, y solo ha presentado una pequeña disminución de un 2% desde entonces, llegando a un consumo aproximado para 2012 de 3.623 MJ/ton, de acuerdo con el informe estadístico de la Federación Interamericana del Cemento, recuperado de http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf (2013), ubicándose un 1,7% por encima del promedio mundial.

Aproximadamente el 5% de la totalidad de emisiones de gases tipo invernadero proviene de la producción de cemento, como consecuencia de la utilización de combustibles fósiles, lo que soporta el importante impacto ambiental y social que puede generar cualquier mejoramiento en las fuentes calóricas del proceso.

2.4 Costos de energía como costo de producción

De acuerdo con el trabajo de Wendell de Queiroz Lamas, Jose Carlos Fortes Palau y Jose Rubens de Camargo (2012) en su artículo *Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse*, actualmente las plantas de tecnología moderna están en su mayoría en capacidad de producir más de un millón de toneladas (1.000.000.00 Tn) de cemento al año, y para producir una tonelada de cemento(1 Tn), se estima el consumo de combustibles entre sesenta kilogramos (60 kg) y ciento treinta kilogramos (130 kg),

así como unos ciento diez kilowatts hora (110 kWh) de consumo energético, lo cual se transforma en un porcentaje del costo de producción superior al 30%.

Actualmente el consumo anual de combustibles para la industria cementera está en una cantidad estimada de unos mil cuatrocientos millones de toneladas anuales (1.440.000.000.00 Tn/año), entre los que más se destacan lignitos, hullas, y carbones como combustibles sólidos. Por parte de los combustibles líquidos están los diferentes tipos de fuel y crudos; como también el gas natural como principal combustible gaseoso.

En la actualidad en Colombia se pueden destacar dos ejercicios relevantes en el reaprovechamiento de residuos, el primero es el de la compañía HOLCIM, que en su planta ubicada en Nobsa, Boyacá realiza el co-procesamiento de residuos peligrosos a través de un tercero, que se encarga de brindar soluciones de disposición de residuos peligrosos de la industria en general, tales como aceites usados, grasas, lubricantes y medicamentos. De otro lado CEMEX Colombia desde hace varios años viene aprovechando residuos agroindustriales tales como la cascarilla y el vano de arroz, brindando soluciones al manejo de pasivos ambientales de la industria arrocera.

Respecto a las demás empresas de la industria cementera en Colombia, no existe información de consulta pública que permita evidenciar la incorporación de residuos dentro de sus procesos productivos.

3. Capítulo III - Valoración energética del residuo aceitoso para la industria cementera

Este capítulo pretende identificar las propiedades caloríficas de los residuos aceitosos de la industria petrolera, a través de pruebas de laboratorio, que permitan establecer beneficios y restricciones del uso de este material como combustible alterno.

3.1 Resultados de laboratorio de la sub-borra

Como se vio en el capítulo I, aunque la sub-borra tiene un alto contenido de crudo, su contenido de agua y sólidos hace que sea necesario realizar un proceso de preparación previo que genera como resultado un aceite residual, con la siguiente ficha técnica:

Sección 1: Producto Químico e Identificación	
Nombre Químico:	Aceite residual
Nombre Comercial:	Aceite residual, aceite recuperado
Familia Química:	N/A
Sección 2: Descripción	
Líquido de color negro brillante producto de los procesos de recuperación de hidrocarburos en planta de tratamiento de residuos industriales con características variadas.	

Sección 3: Usos				
Este tipo de productos puede ser utilizado para la preparación de combustibles para calderas o barcos de cargue.				
Sección 4: Especificaciones técnicas				
Análisis	Unidades	Norma	Especificaciones	
			Mínimo	Máximo
Agua por destilación	%vol	ASTM95	0	0.6
Agua y sedimentos	%vol	ASTM96	0	0.8
Contenido de azufre	%P/P	ASTM129	0.6	1.2
Gravedad API a 60°F	°API	ASTM287	12	19
Poder calorífico	BTU/LB	ASTM240	15000	19000
Residuo carbonoso conradson	%P/P	ASTM189	5	10
Viscosidad cinemática a 40°C	Cst	ASTM445	150	350
Punto de inflamación pensky martens	°C	ASTM93	60	
Cenizas	%P/P	ASTM482	0	0.6

Tabla 1- Ficha técnica del aceite residual (Fuente: Eco planta procesos de residuos industriales SAS., 2014)

3.2 Potencial de aprovechamiento para la alimentación del horno

Teniendo en cuenta los análisis de laboratorio presentados anteriormente, las sub-borras, después de un proceso de acondicionamiento, presentan unas

propiedades fisicoquímicas atractivas para realizar sustitución parcial de combustibles fósiles (dada la capacidad limitada de suministro del material), pudiéndose utilizar como un combustible alternativo. De acuerdo con Wendell de Queiroz Lamas *et al.* (2012), son usados de manera frecuente en la industria cementera residuos de producción petrolera conocidos como *oily sludge* lo cual está directamente relacionado con el objetivo del presente proyecto. Los autores del artículo en mención, proponen que las técnicas de co-procesamiento proveen menores costos de producción, así como la reducción del impacto ambiental generado por la disposición de residuos de manera inapropiada, de igual manera evidencian que el co-procesamiento es una fuente de doble ganancia para la industria cementera.

De los aspectos más relevantes que hacen atractivo este combustible alternativo se encuentra su alto poder calorífico, pudiendo fácilmente alcanzar valores que duplican la capacidad calorífica de combustibles convencionales como el carbón térmico, la cual se encuentra alrededor de seis mil seiscientas kilocalorías por kilogramo (6.600 Kcal/kg). De lo anterior se puede inferir que si se evalúan únicamente los aspectos técnicos, el potencial para la relación de sustitución por tonelada de carbón térmico podría ser de dos partes de aceite residual por una de carbón térmico. Evaluando esta propiedad a la luz de las investigaciones de Azad Rahman, M.G. Rasul, M.M.K. Khan, S. Sharma (2013), en su documento *Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview*, la

capacidad calorífica supera los 14.0 MJ/kg planteados como parámetro mínimo por parte de los autores antes mencionados para su uso como combustible alternativo.

Lo anterior permite entender que el adicionar este tipo de combustible no afectará de manera alguna el rendimiento del horno cementero, dado el bajo volumen disponible del combustible alternativo. También se descartan riesgos de caídas de curvas de temperaturas dentro del horno, las cuales de darse, podrían afectar la calidad del Clinker. La incorporación de aceite residual dentro del proceso de combustión permitiría mejorar las capacidades del combustible tradicional de manera significativa, y los riesgos de una variación en las emisiones producidas por el horno se descartarán por la ausencia de metales pesados. Reforzando este análisis, existen estudios previos como los realizados por M. Prisciandaro, G. Mazziotti, F. Veglió (2002), en su documento titulado *Effect of burning supplementary waste fuels on the pollutant emissions by cement plants: a statistical analysis of process data*, donde se demostró de manera estadística que realizando un sustitución parcial de los combustibles convencionales en una proporción menor al 30% no se sufría ninguna alteración en la calidad del Clinker producido.

3.3 ¿Por qué aprovechar el residuo dentro del horno cementero?

El co-procesamiento de residuos, o reaprovechamiento energético de combustibles alternos, muestra beneficios tangibles tanto para la industria cementera, como para los productores de residuo. Según Wendell de Queiroz Lamas *et al.* (2012), los principales beneficios del co-procesamiento son:

- La reducción y mayor control de emisiones contaminantes.
- Reemplazo de combustibles convencionales hasta en un 30%.
- Reducción en consumo de energía proveniente de fuentes convencionales.
- Aumento de inversiones en áreas ambientales.
- Incremento en la competitividad.
- Mejora de la imagen de las compañías ante la comunidad y otros grupos de interés.

Entrando a un análisis de manera más minuciosa, es altamente conveniente para la industria cementera realizar los esfuerzos necesarios para garantizar su sostenibilidad en el tiempo. El poder desarrollar y ampliar la base de combustibles alternos día a día, le permite disminuir de manera cuantiosa el impacto ambiental generado por la producción de Clinker, y de igual manera libera presión sobre el impacto de la producción de combustibles fósiles, especialmente los provenientes de explotación de minas a cielo a abierto.

Si bien el componente ambiental es muy relevante en esta situación, no se puede desconocer que hoy las industrias funcionan en su gran mayoría con combustibles fósiles convencionales, cumpliendo los respectivos marcos regulatorios, por lo tanto la motivación de usar combustibles alternos obedece también a un interés por disminuir sus costos energéticos y obtener una estructura de costos más liviana y eficiente.

3.4 ¿Cómo se puede anular la peligrosidad del residuo?

Actualmente las sub-borras provenientes del proceso de producción petrolera son consideradas residuos peligrosos por la normatividad colombiana vigente, esto debido a sus componentes contaminantes de carácter ácido. La producción de Clinker de otro lado se realiza en un ambiente alcalino, lo que permite neutralizar en gran medida los contaminantes contenidos en las sub-borras. Lo anterior sumado a las altas temperaturas y los prologados tiempos de estadía dentro del horno permiten neutralizar en gran medida la peligrosidad de los residuos mencionados.

Investigaciones como las de Azad Rahman *et al.* (2013), describen de manera específica las propiedades que tiene los hornos cementeros para quemar una gran variedad de residuos, neutralizando de manera eficiente sus componentes contaminantes dañinos para el medio ambiente. El análisis realizado por los autores revela que las emisiones de dióxido de carbono CO₂, óxidos

nitrosos NO_x y dióxido de azufre SO_2 se reducen usando combustible alternos, de otro lado se puede reducir el consumo de energía térmica de la planta.

4. Capítulo IV – Marco Legal Aplicable

4.1 Marco Legal

De acuerdo con la naturaleza del producto final resultado del proceso de adecuación de las sub-borras, se obtiene un material catalogado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible como Aceite Residual, bajo la resolución 1446 de 2005, donde se reglamenta en el artículo 1º que este producto debe

clasificarse como “mezcla o *blending*”, dado que cumple con la siguiente descripción consignada en la resolución antes mencionada:

“...Mezcla o Blending: Hace relación a la mezcla de aceite usado con otros tipos de combustible como fuel oil (diésel, combustóleo) o crudos con bajas concentraciones de azufre, que permiten una mayor fluidez y ganancia calorífica.”

Adicionalmente la resolución 1446 de 2005, en su artículo 2º, establece los requisitos y condiciones para aprovechar el aceite de desecho o usado generado en el país como combustible, y permite inclusive el uso de aceite usado sin tratar bajo las siguientes circunstancias:

“...b) En hornos cementeros, en la industria metalúrgica o en plantas de generación de energía, siempre y cuando tengan sistemas de control de emisiones de material particulado de alta eficiencia (mayor al 95%), como combustible único o mezclado con otros tipos de combustibles en cualquier proporción...”

Siempre y cuando se respete el nivel de concentraciones de bifenilos policlorados (PCB) o terfenilos policlorados (PCT) menores a 50 ppm ni concentración de halógenos totales (expresado como HCl) mayores a 1.000 ppm., según literal c del artículo y resolución antes mencionados pudiera darse la comercialidad del aceite residual objeto de estudio.

4.2 Responsabilidades del productor de residuos

En el manejo de borras, la autoridad ambiental estableció para el campo Rubiales la siguiente obligación:

“...k) las borras, suelos o arenas y lodos contaminados con hidrocarburos serán entregados a empresas especializadas que cuenten con el permiso ambiental para el manejo y disposición final de este tipo de residuos y materiales. El transporte, desde la fuente hacia el sitio destino, se deberá realizar bajo condiciones herméticas e impermeables cumpliendo con lo establecido en la normatividad ambiental vigente.”

Las propiedades peligrosas del residuo de producción petrolera (toxicidad, inflamabilidad, reactividad química, corrosividad, explosividad, reactividad o de cualquier otra naturaleza que provoque daño a la salud humana o medio ambiente) hacen necesario que las actividades de producción petrolera en Colombia en relación al manejo de residuos peligrosos estén enmarcadas dentro de la siguiente reglamentación:

NORMATIVIDAD LEGAL VIGENTE	BREVE DESCRIPCIÓN
DE CARÁCTER GENERAL	
Ley 1252 de 2008 del MAVDT	Deroga la ley 430 de 1998 y establece normas prohibitivas referentes a los residuos peligrosos y otras disposiciones.

Ley 1196 de 2008 del MAVDT	Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes.
Ley 253 de 1996 del Congreso de Colombia	Por medio del cual se aprueba en Colombia el Convenio de Basilea sobre el control de movimientos transfronterizos de los residuos peligrosos y su eliminación.
Decreto 351 de 2014 Ministerio de protección social	Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en la atención en salud y otras actividades.
Decreto 1609 de 2002 del Ministerio de Transporte	Reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.
Decreto 4741 de 2005 del MAVDT	Reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
Decreto 2820 del 2010 del MAVDT	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales". El inciso 10 del artículo 9 reglamenta la licencia ambiental para proyectos relacionados con residuos peligrosos.
Resolución 2309 de 1986 de Min. Salud.	Dicta normas para el cumplimiento del contenido del Título III de la Parte 4a. del Libro 1º del Decreto-Ley N. 2811 de 1974 y de los Títulos I, III y XI de la Ley 09 de 1979, en cuanto a Residuos Especiales.
Resolución No. 189 de 1994 del MAVDT	Dicta regulaciones para impedir la introducción al territorio nacional de residuos peligrosos.

Resolución No. 415 de 1998 del MAVDT	Establecen los casos en los cuales se permite la combustión de los aceites de desechos y las condiciones técnicas para realizar la misma.
Resolución No. 1146 del 2005 del MAVDT	Modifica parcialmente la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998, que establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma.
Resolución No. 1164 de 2002 del MAVDT	Establece el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de los residuos hospitalarios y similares.
Resolución No. 1446 de 2005 de MAVDT.	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998, que establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma.
Resolución No. 1402 de 2006 de MAVDT	Desarrolla parcialmente el decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, en materia de residuos o desechos peligrosos”
Resolución 1362 de 2007 del MAVDT	Establece los requisitos y procedimiento para el registro de generadores de residuos peligrosos a que hace referencia los art. 27 y 28 del Dec. 4741/2005.
Ley 1453 de 2011 de la Presidencia de la Republica	ARTÍCULO 35. Se adiciona al Título XI del Código Penal el siguiente artículo: Artículo 332 A. Contaminación ambiental por residuos sólidos peligrosos. El que con incumplimiento de la normatividad existente almacene, transporte o disponga inadecuadamente, residuo sólido, peligroso o escombros, de tal manera que

	ponga en peligro la calidad de los cuerpos de agua, el suelo o el subsuelo tendrá prisión de dos (2) a nueve (9) años y multa de ciento treinta y tres punto treinta y tres (133.33) a cincuenta mil (50.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes.
--	--

Tabla 2- Normatividad vigente para manejo de residuos peligrosos (Fuente: Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA. Consolidado por los autores del presente documento)

5. Capítulo V. Propuesta de proceso para el reaprovechamiento de residuos aceitosos

De acuerdo con los resultados del capítulo III se evalúa la incorporación del residuo aceitoso al proceso productivo del horno cementero.

5.1 Condiciones de aceptación del residuo

Para que el residuo pueda ser aceptado debe entregarse en condiciones líquidas en las instalaciones de CEMEX Colombia S.A., potencial aprovechador de este residuo, cumpliendo con la caracterización mencionada anteriormente en el capítulo III, certificando el debido tratamiento necesario para satisfacer los parámetros de estabilidad requeridos por el material, y dando cabal cumplimiento a todos los aspectos del marco regulatorio expuesto en el capítulo IV. Dentro de los parámetros relevantes de aceptación se destacan:

- Capacidad calorífica superior a 14.0 Mj/Kg.
- Ausencia de cenizas y compuestos volátiles.
- Ausencia de metales pesados.
- Contenido de cloro inferior a 0.2%.
- Contenido de azufre inferior a 2.5%.

5.2 Logística de transporte

El Transporte y suministro del residuo aceitoso se realizará usando carro-tanques de capacidad de 50.000 galones desde las instalaciones de Campo Rubiales ubicadas en el departamento del Meta o desde las instalaciones de un tercero que realice el proceso de adecuación del residuo, que para efectos de eficiencia logística, sería el más cercano al campo de producción petrolera y a las instalaciones del eventual aprovechador del residuo, ubicadas en el municipio de Payandé, Tolima.

Por tratarse de un material catalogado como peligroso, el aceite residual debe transportarse asegurando condiciones mínimas de hermeticidad, impermeabilidad y otras precauciones establecidas en el Decreto 1609 de 2002 del Ministerio de Transporte por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera. Existen en Colombia alrededor de 30 compañías de transporte terrestre que tienen vehículos adaptados para cumplir con los requerimientos establecidos en el decreto anteriormente mencionado.



Imagen 1. Georreferenciación ruta de transporte de residuo aceitoso (Fuente: Google maps)

5.3 Logística de almacenamiento

El almacenamiento del residuo aceitoso puede realizarse en los mismos tanques estacionarios utilizados para almacenamiento de combustible, cumpliendo con las condiciones físicas y de seguridad industrial a las que hace referencia la normatividad listada en el capítulo anterior.

5.4 Co-procesamiento de residuo

Como se ha visto durante el desarrollo del presente trabajo, la industria cementera tiene el potencial de reutilizar el residuo aceitoso de la industria petrolera como combustible sustituto, actividad conocida como co-procesamiento, que básicamente se define como la incineración llevada a cabo en hornos rotatorios para la producción del Clinker sin producción posterior de otro tipo de residuo, tal como fue mencionado durante el capítulo III.

Este co-procesamiento, además de eliminar el riesgo ambiental que tiene el residuo industrial per se, favorece el remplazo de combustibles tradicionales no renovables como el carbón, permitiendo la incorporación de compuestos minerales presentes en el residuo industrial dentro de la harina base del cemento, remplazando parte del combustible requerido para alimentar el horno y contribuyendo de esta forma a la disposición final de dicho residuo.

La disponibilidad de aceite residual para los volúmenes actuales de producción de campo Rubiales está en el orden de los doscientos treinta (230) barriles diarios, que en proporción a la producción nacional petrolera mencionada en el capítulo I se sumaría a otros seiscientos noventa (690) barriles diarios de residuo aproximadamente. Teniendo en cuenta el potencial de producción de sub-borras y el posterior proceso de acondicionamiento, que tiene como resultado el residuo aceitoso, la disponibilidad del material no es superior a un millón ochocientas mil toneladas por año (1.800.000 Tn/año), lo que en condiciones

óptimas alcanzaría solo a suplir aproximadamente el 0.24% de la demanda total de combustibles tradicionales para la industria cementera en el país. La evaluación realizada anteriormente corresponde a una planta con capacidad de producción de dos millones cuatrocientas mil toneladas por año (2.400.000 Tn/año).

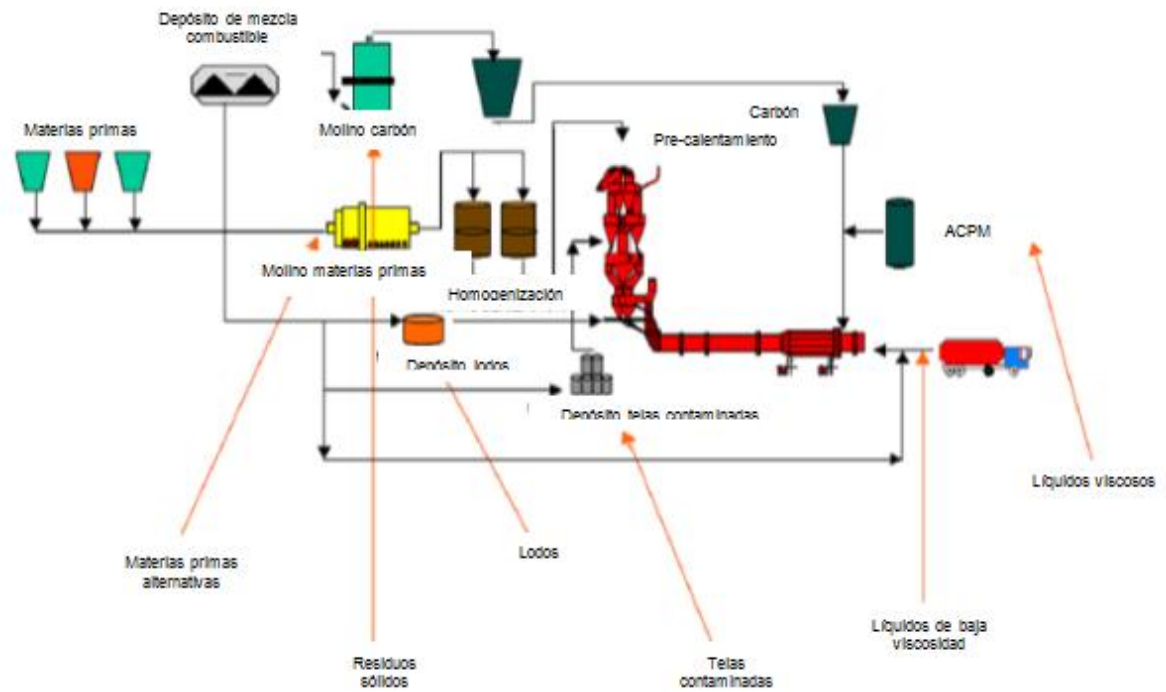


Figura 4. Potencial de reciclaje de materiales en una Planta de Cemento (Fuente: Wendell de Quiroz Lamas et al. (2012))

6. Capítulo VI Análisis de viabilidad económica

6.1 Costos para el productor de las sub-borras

En la actualidad y para el caso de Pacific Rubiales Energy se debe contratar con un tercero el transporte, tratamiento y disposición final de sus sub-borras para un flujo diario máximo de 230 barriles, con un desglose de costos que se presenta a continuación:

Concepto	Costo
Costo tratamiento de sub-borras	\$65.000 Pesos/Barril
Costo transporte de sub-borras	\$500 Pesos/Km/Barril

Tabla 3- Relación de costos de transporte y tratamiento de Sub-borras (Fuente: Pacific Rubiales Energy Corp.)

La planta de tratamiento más cercana a Campo Rubiales, punto de origen del residuo aceitoso objeto de análisis se encuentra en el municipio de Aguazul, departamento de Casanare a 309 Kilómetros lo cual representa hoy para la compañía un costo total aproximado de \$5.300.000.000 millones de pesos al año, de acuerdo con la información suministrada por Pacific Rubiales Energy Corp (2014)

Teniendo en cuenta que la compañía está obligada a tratar y disponer estos residuos de producción catalogados por la autoridad ambiental colombiana como peligrosos, la oportunidad de ahorro dentro del esquema propuesto en el objeto del presente trabajo sería muy cercana a cero (\$) dado que el único beneficio es poder disponer el residuo de acuerdo con la normatividad ambiental aplicable.

6.2 Costos para el consumidor del aceite residual

Un comparativo de costos asociados con el reaprovechamiento del material producido por un tercero actualmente involucrado en el transporte, tratamiento y disposición final del residuo aceitoso versus el combustible tradicional utilizado para alimentar hornos cementeros se encuentra resumido en la siguiente tabla:

Parámetro	Carbón Rajón	Aceite Residual
Costo material (\$ / ton)	\$110,000	\$774,980
Humedad	8%	0%
Poder Calorífico (Kcal/kg)	6,600	9,444
Costo Flete (\$/ton)	\$32,000	\$37.698
Ubicación	Ubaté	Aguazul
Remanejos (\$/ton)	\$18,000	\$0
Costo total base seca (\$/ ton)	\$173,913	\$810,894
Costo unit Mcal (\$/Mcal)	26.4	85.9

Tabla 4- Comparativo de Costos (Fuente: Cálculos propios)

Teniendo en cuenta el análisis anterior, el aceite residual no genera ningún ahorro por sustitución de carbón rajón. Los únicos beneficios que se tienen son desde la perspectiva de reducción de emisiones contaminantes, cuya medición es compleja dado el bajo volumen de aceite residual que reemplazaría el combustible convencional (por disponibilidad de este último).

Es importante resaltar que según los criterios para definir un combustible alternativo establecidos por Azad Rahman *et al.* (2013), es necesario que el uso del combustible evaluado sea financieramente viable y que su disponibilidad permita generar economías de escala para su reaprovechamiento.

7. Capítulo VII Conclusiones

- El material producido proveniente de sub-borras de petróleo es técnicamente viable para ser co-procesado en hornos cementeros, dadas sus características físico-químicas, en especial su alto poder calorífico.
- El aprovechamiento del aceite residual como combustible alternativo en hornos cementeros se encuentra dentro del marco legal aplicable según la legislación colombiana.
- Teniendo en cuenta estudios previos en relación a los beneficios del co-procesamiento, las condiciones de combustión de los hornos cementeros permiten neutralizar los residuos peligrosos provenientes de las sub-borras.
- Bajo el esquema de tratamiento y disposición actual de residuos aceitosos el reaprovechamiento del material no genera ningún ahorro o beneficio para el productor.
- Teniendo en cuenta el costo de adquisición del material tratado debido al bajo costo del carbón y el costo del flete desde el municipio de Aguazul, Casanare, hasta las instalaciones del horno cementero en Payandé, Tolima; el co-procesamiento del material no genera ningún ahorro para la industria cementera como sustituto de carbón rajón.

- Existe un gran potencial para el aprovechamiento de residuos aceitosos de la industria petrolera no solo en la industria del cemento, sino en general en industrias con procesos intensivos de calor, para las cuales el uso de aceites residuales resulta altamente provechoso por su poder calorífico, el cual supera ampliamente el de los combustibles fósiles tradicionales, sin generación de mayores emisiones contaminantes.

8. Capítulo VIII Recomendaciones

- Dada la naturaleza del acondicionamiento necesario para el residuo aceitoso y teniendo en cuenta los objetivos misionales de la empresa generadora de dicho residuo, así como aquellos de la empresa cementera que eventualmente lo utilizaría, se recomienda vincular a una tercera empresa para la preparación previa de este material directamente en campo para disminuir costos de flete.
- El productor del residuo podría realizar la recompra del aceite residual para comercializarlo como combustible a otras industrias, mediante un acuerdo con el tercero a cargo de su tratamiento, definiendo un valor que genere márgenes para los dos actores y que se traduzca finalmente en ahorros dentro del proceso productivo del petróleo.
- Dado el alto poder calorífico del material tratado proveniente del residuo aceitoso, éste puede ser tenido en cuenta como combustible de arranque de hornos cementeros, previo estudio y comparación de sus beneficios contra combustibles tipo diesel.
- Estudiar la opción de vender el residuo a otras industrias que involucren combustibles dentro de su proceso productivo, donde el costo de transporte permita ser más competitivo.

- El productor del residuo podría evaluar la idea de constituir una unidad de negocio complementaria que realice el aprovechamiento de las sub-borras y busque otros usos potenciales para las mismas.

9. Bibliografía

1. Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA
2. Asociación Colombiana de Ingenieros de Petróleos ACIPET., 2014
3. Banco de la República (2002), recuperado en Mayo de 2014. Disponible en [http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/julio2002/laindu
laind.htm](http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/julio2002/laindu%20laind.htm)
4. Cementos de Andalucía, recuperado en Mayo de 2014. Disponible en: <http://www.cementosdeandalucia.org/index.php?cPath=fabricacion&op=2>
5. Departamento Nacional de Estadística, estadísticas de cemento gris 2014. Recuperado en Mayo de 2014. Disponible en: [http://www.dane.gov.co/index.php/construccion-alias/estadisticas-de-
cemento-gris-ecg](http://www.dane.gov.co/index.php/construccion-alias/estadisticas-de-cemento-gris-ecg)

6. De Queiroz Lamas W., Fortes Palau J.C., y De Camargo J.R. (2012). Waste Materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. *Renewable and Sustainable Energy Revie.* 9, 200-207.
7. Ecoplanta procesos de residuos industriales SAS, Ficha Técnica aceite residual 2012
8. Ecoprocesamiento (2013), recuperado en Mayo de 2014. Disponible en <http://www.ecoprocesamiento.com/servicios-coprocesamiento.html>
9. Federación Interamericana del Cemento FICEM, Informe estadístico (2013), recuperado en Mayo de 2014. Disponible en http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
10. Mayorga García Fernando (2002), La industria petrolera en Colombia, *Revista Credencial Historia*, 151
11. Naciones Unidas, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático y el Protocolo de Kyoto, 1992
12. Organization of the Petroleum Exporting Countries OPEC, (2002), recuperado en Mayo del 2014. Disponible en: <http://opec.org/>

13. Prisciandaro M., Mazziotti G., y Veglió F. (2002). Effect of burning supplementary waste fuel on the pollutant emissions by cement plants: a statistical analysis of process data. *Resources, Conservation and Recycling*, 39, 161-184.
14. Rahman A., Rasul M.G., Khan M.M.K., y Sharma S. (2013). Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview. *Procedia Engineering*, 56, 413-420.
15. The European Cement Association, 2013, recuperado en Mayo de 2014.
Disponible en: <http://www.cembureau.eu/about-cement/key-facts-figures>
16. Wendell de Quiroz Lamas *et al.* (2012)