

01178

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA**



**CONVERSIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN
EN ENERGÍA Y MATERIA PRIMA PARA LA INDUSTRIA DEL CEMENTO**

T E S I S

201043

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA ENERGETICA
P R E S E N T A
HEBERTO RAMOS RODRIGUEZ



México, D. F., 1988



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Resumen	4
Prefacio	7
Introducción	8
1. Problemática ambiental de la Región Sur	11
1.1. Aspectos generales	11
1.2. Marco teórico (Una nueva actitud).....	15
1.3. Objetivos de la investigación	19
1.4. Metodología aplicada.....	20
2. Desarrollo del proceso alterno	23
2.1. Planteamiento del problema	23
2.2. Recolección y análisis de muestras.....	24
2.3. Resultados de análisis, muestreos y pruebas	27
2.4. Logros más recientes	31
2.5. Desarrollo comercial.....	32
3. Análisis CRETIB de recortes y fluidos de perforación	34
3.1. Antecedentes.....	34
3.2. Identificación del residuo peligroso.....	36
3.3. Evaluación cuantitativa de los contaminantes	37
3.4. Caracterización del riesgo de exposición	41
3.5. Alternativas de confinamiento temporal, tratamiento, uso o confinamiento final de los materiales y residuos peligrosos.....	47

3.6. Conclusiones de los análisis CRETIB.....	52
4. Pruebas de destrucción térmica de recortes de perforación y sólidos	
impregnados con aceites y grasas	54
4.1. Gestiones gubernamentales.....	54
4.2. Objetivo	56
4.3. Antecedentes.....	57
4.4. Proceso de fabricación del cemento.....	59
4.5. Métodos y procedimientos de muestreo y análisis	63
4.6. Desarrollo del monitoreo.....	65
4.7. Equipos utilizados.....	68
4.8. Resumen de datos de muestreo.....	72
4.9. Análisis de resultados.....	74
4.10. Conclusiones del protocolo de pruebas.....	90
5. Costos por manejo, tratamiento y disposición de recortes	94
5.1. Costos históricos	94
5.2. Comparación de costos por proceso empleado	96
5.3. Areas de oportunidad y ahorros futuros.....	98
Conclusiones generales.....	101
Bibliografía	104
Siglas y abreviaturas	109
Apéndice A: Figuras, Tablas y Gráficas.....	113

Resumen

En la industria petrolera, la perforación de pozos es una de las actividades que pueden ocasionar mayor impacto en los ecosistemas y afectar al medio ambiente. Durante la perforación de un pozo se genera un significativo volumen de recortes y fluidos base aceite y otros sólidos impregnados, que la normatividad ambiental considera como residuos peligrosos, por lo que la industria petrolera ha visto la necesidad de realizar acciones preventivas y correctivas que le permitan reducir o eliminar el impacto ecológico de sus actividades, con el fin de trabajar de manera armónica con el entorno y lograr un desarrollo sustentable.

Desde hace algunos años se han probado y aplicado diversos métodos para el tratamiento de los recortes de perforación impregnados con fluidos base agua y base aceite (emulsión inversa), tales como el microencapsulado, el confinamiento controlado y la biorremediación, entre otros; técnicas que fueron desarrolladas hace ya tiempo, cuando la presión de los grupos ecologistas sobre las compañías petroleras no era tan persistente. Sin embargo, su aplicación no ha resuelto el problema ambiental en forma definitiva, pues sólo lo trasladan en el tiempo y el espacio, y las erogaciones que hace la empresa por estos conceptos son bastante significativas, que bien pueden considerarse como áreas de oportunidad. En forma general, se estima que los costos relacionados con el manejo, tratamiento y transporte de los recortes de perforación en la Región Sur de Pemex Exploración y Producción, durante 1995, ascienden a un monto cercano a los 80 millones de pesos.

La Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, en la Región Sur de Pemex Exploración y Producción, comprometida con las políticas ambientales de este organismo subsidiario de Petróleos Mexicanos, al buscar nuevas áreas de oportunidad y de mejora para elevar su rentabilidad y eficiencia, visualizó una alternativa para solucionar esta problemática, a partir de una hipótesis de trabajo que propone el tratamiento térmico de los recortes y fluidos de la perforación en hornos donde se fabrica el cemento. La documentación de este proceso industrial innovador y ya patentado, modifica el concepto actual que considera los recortes de perforación como residuos peligrosos, por otro que los visualiza como energía y materia prima para la industria del cemento.

En este proceso industrial se conjugan positivamente factores técnicos, económicos, logísticos y sociales en la solución de la problemática ambiental de la industria petrolera; sin embargo, sus alcances van más allá, al vincular dos cadenas productivas relacionadas bajo el esquema cliente-proveedor, ya que Cementos Apasco es la única empresa que fabrica un cemento especial para Pemex. El uso de los hornos de cemento para eliminar los residuos peligrosos que se generan en la industria petrolera, amplía las posibilidades de colaboración entre ambas industrias.

Para probar esta hipótesis, se comenzó a indagar con los directivos de la planta de Cementos Apasco en Macuspana, los requerimientos para realizar pruebas de incineración de los recortes de perforación en sus hornos de cemento. La metodología para realizar estas pruebas se ajustó a las recomendaciones de la Dirección General de Residuos Peligrosos y Riesgo, del Instituto Nacional de Ecología, teniendo como base

la caracterización física y química de los recortes de perforación, mediante los análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, y Biológicos infecciosos) de 14 muestras tomadas en diferentes pozos de la Región Sur. A lo largo de este trabajo se presentan los resultados de dichos análisis, de los muestreos que se realizaron en chimenea para observar las variaciones en la emisión de partículas a la atmósfera, así como de los análisis químicos para identificar compuestos químicos y metales en la combustión.

La factibilidad técnica de este proceso térmico para el tratamiento de recortes y fluidos de perforación y de otros sólidos impregnados, queda demostrada mediante los resultados de los análisis CRETIB, los muestreos de partículas enviadas a la atmósfera en chimenea y los análisis de compuestos químicos y metales, efectuados por laboratorios competentes y certificados debidamente por instituciones de reconocido prestigio, que se presentan en las tablas y gráficas del Apéndice A.

Para demostrar la factibilidad económica y financiera del proceso industrial propuesto, en el capítulo cinco se analizan los costos asociados al manejo, tratamiento y disposición final de los recortes y fluidos de perforación, se comparan los costos actuales por el uso de las técnicas más comunes en el mercado, y se presentan los ahorros que pueden obtenerse en el futuro con la implementación de este proceso alternativo, con base en un eventual convenio entre Petróleos Mexicanos y Cementos Apasco, para explotar la patente mancomunada que protege este invento en los ámbitos nacional e internacional.

Prefacio

El proceso industrial que se expone en este trabajo fue desarrollado exitosamente gracias a la estrecha colaboración entre las industrias petrolera y del cemento. Para mayor satisfacción nuestra, y seguridad de las empresas que apoyaron esta iniciativa, el proceso denominado "conversión de recortes de perforación en materia prima para la industria cementera" ya está protegido por una patente nacional y mundial, cuyos propietarios son Pemex Exploración y Producción, organismo subsidiario de Petróleos Mexicanos, y la compañía Cementos Apasco, S. A.

Mi reconocimiento y profunda gratitud al ingeniero César García Vidrio, gerente de desarrollo, y al ingeniero Denzil Cotera, director de la planta Macuspana, ambos de la compañía Cementos Apasco, por el interés, entusiasmo e invaluable colaboración para realizar los trabajos que permitieron probar la viabilidad de esta idea, gracias a la cual la Región Sur de Pemex Exploración y Producción se coloca a la vanguardia en materia tecnológica, mostrando con hechos su preocupación por proteger el medio ambiente y lograr el desarrollo sustentable de la industria petrolera.

Introducción

En esta investigación se analiza la generación de los recortes de perforación impregnados con fluidos base aceite o de emulsión inversa, considerados como residuos peligrosos en la normatividad ecológica, y se propone el tratamiento térmico a altas temperaturas como un proceso alternativo para su eliminación final, caracterizándolos como materia prima para la industria cementera. Este proceso industrial elimina en forma definitiva un problema ambiental de la industria petrolera, y da lugar a una vinculación más estrecha y provechosa entre ambas cadenas productivas.

La problemática ambiental que enfrenta Petróleos Mexicanos tiene como uno de sus orígenes la generación de recortes de perforación impregnados con fluidos base agua y base aceite, y la acumulación de otros sólidos impregnados, para cuyo manejo, tratamiento y disposición final se ha recurrido a diversos métodos de eliminación con resultados parciales y poco satisfactorios.

En el primer capítulo se presentan algunos aspectos generales de la problemática ambiental asociada al proceso de perforación, los problemas ambientales relacionados con el manejo y disposición de los desechos que genera, se propone como marco teórico una nueva actitud hacia el medio ambiente a partir de una preocupación proactiva de las empresas petroleras por la protección ambiental; se enuncian los objetivos de esta investigación; así como la metodología aplicada, cuyo formato académico corresponde al modelo de "dispositivo tecnológico".

En el capítulo dos se describen en forma resumida las acciones que permitieron desarrollar el proceso alternativo para convertir los recortes de perforación en materia prima para la industria del cemento, desde el nacimiento de la idea, el análisis composicional del núcleo de un pozo, los análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, y Biológicos infecciosos) practicados a 14 muestras de recortes impregnados con fluidos de perforación extraídos de diversos pozos, los resultados del monitoreo de emisiones a la atmósfera en la planta Macuspana de Cementos Apasco, y las conclusiones de las pruebas de incineración de recortes en el horno de cemento.

En el capítulo tres se presentan detalladamente los análisis CRETIB practicados a las 14 muestras de recortes impregnados con fluidos de perforación, con los que se determinaron las sustancias o residuos peligrosos que pudieran estar presentes en ellos, caracterizaron el riesgo de exposición, y definieron las alternativas más recomendadas para su manejo, con base en las prácticas internacionales.

En el capítulo cuatro se describe en forma genérica el proceso de manufactura del cemento, los métodos y procedimientos de muestreo y análisis, los equipos utilizados, los resultados del monitoreo de emisiones a la atmósfera y las conclusiones a que dicho estudio condujo. En virtud de los estrictos controles ecológicos y de calidad que operan en las instalaciones de Cementos Apasco, y dadas las características físico-químicas de los recortes y fluidos de perforación, fue necesario efectuar un monitoreo de emisiones a la atmósfera, con y sin la incorporación de los residuos de perforación, a fin de conocer las variaciones en las cantidades de gases y metales en chimenea, para así

probar –una vez cumplidos los requerimientos ambientales de las autoridades competentes– la viabilidad técnica del tratamiento térmico como una opción definitiva para eliminar los recortes de la perforación.

El capítulo cinco está orientado al análisis de los costos asociados a las actividades de manejo, tratamiento y disposición de los recortes de la perforación, se comparan los costos por proceso de eliminación empleado y se identifican las áreas de oportunidad y ahorros futuros que pueden generarse con la implementación del tratamiento térmico propuesto en este trabajo.

Finalmente, con base en la información generada por los análisis CRETIB, el monitoreo y análisis de emisiones a la atmósfera en chimenea, así como otros análisis efectuados en los propios laboratorios de la compañía Cementos Apasco, se formulan las conclusiones del estudio en términos del valor técnico, económico, ecológico y social que tiene este proceso para la industria petrolera.

Es oportuno comentar que este proceso es objeto de una patente de cobertura nacional e internacional, en favor de la compañía Cementos Apasco y de Pemex Exploración y Producción, organismo subsidiario de Petróleos Mexicanos; con lo que nuestra empresa se coloca a la vanguardia en acciones ecológicas para la protección del medio ambiente.

1. Problemática ambiental de la Región Sur

1.1. Aspectos generales

La industria petrolera básica, donde se realizan las actividades de exploración y de producción, proporciona los productos esenciales para mover los equipos de transporte, generar energía eléctrica, elaborar medicinas y muchos otros derivados de la petroquímica. Sin embargo, estas actividades pueden afectar al entorno al liberar desechos en concentraciones más allá de las normales: hidrocarburos, sólidos contaminados con hidrocarburos, agua contaminada con sólidos disueltos o suspendidos, y otros elementos químicos. Mientras algunos de estos desechos pueden tener efectos adversos sobre el ambiente, otros tienen poco impacto, otros más, incluso pueden resultar benéficos. En casi todos los casos, el efecto puede ser minimizado o eliminado mediante el empleo de un manejo adecuado de desechos, sometiéndolos a un tratamiento térmico con altas temperaturas, como el que se propone en este trabajo.

Los primeros pasos que debe dar la industria petrolera para reducir o eliminar su impacto adverso al medio ambiente, es adoptar un enfoque proactivo en la administración de sus operaciones, y estar mejor preparada en aquellas actividades que puedan dañar potencialmente el entorno. El enfoque proactivo involucra la adopción de una actitud ambientalmente responsable que vaya más allá del sólo cumplir con las normas, y proteja realmente el entorno durante la realización de su negocio.

Entre los desechos de la perforación se incluyen los recortes de la formación y los fluidos para perforar. Estos residuos salen del pozo contaminados en forma general con

materiales como aceites minerales, diesel, naftas, asfaltos, sílicas y arcillas organofílicas, que son usados como densificantes, emulsificantes, dispersantes, reductores de pérdida de fluidez y viscosificantes. Los fluidos base aceite también contienen hidrocarburos y químicos para mantener su emulsión agua-en-aceite. El hidrocarburo más usado es el diesel, seguido por otros aceites minerales y sintéticos menos tóxicos. Los fluidos para perforación contienen normalmente metales pesados como bario, cromo, cadmio, mercurio y plomo. Estos metales pueden entrar al sistema de perforación por medio de materiales agregados al fluido, o proceder de la formación misma que está siendo perforada.

Otros desechos asociados incluyen trozos de metales y sólidos que se recolectan en el equipo superficial y en el fondo de los tanques, las presas de desechos, las aguas blandas, los desechos del lavado y de las estimulaciones de fracturamiento y acidificación, los desechos de la deshidratación y el endulzamiento del gas natural, el transporte de desperdicios y los suelos contaminados por derrames accidentales de aceite y otras descargas.

Otro factor que impacta el ambiente es el almacenamiento de recortes y fluidos de perforación en presas de desecho construidas en las localizaciones de perforación, ya que éstos también pueden causar impactos ambientales en zonas de alta precipitación fluvial, como es el caso del territorio donde opera la Región Sur de Pemex Exploración y Producción (PEP).

El tratamiento de los recortes y residuos peligrosos generados durante la perforación de pozos, siempre ha representado un problema para la industria petrolera. Esta

situación se ha agudizado a partir de la entrada en vigor de nuevas leyes ecológicas y normas técnicas más estrictas en materia de protección ambiental. Ante tal circunstancia, la Región Sur de PEP ha venido aplicando en los años recientes diversas técnicas para cumplir con su responsabilidad ambiental, buscando al mismo tiempo mayor eficacia y eficiencia en costos.

En virtud de que la perforación de pozos petroleros es una actividad que data de hace muchos años, en la Región Sur se ha visto la acumulación de grandes volúmenes de recortes de perforación en las localizaciones intervenidas, las cuales generan el riesgo de contaminación de suelos por infiltración de contaminantes. Esto ha ocasionado el descontento de comunidades aledañas, que se ha traducido en el bloqueo de instalaciones, así como la solicitud de autoridades ambientales para remediar esta situación.

La perforación petrolera en la Región Sur es relevante, ya que se han perforado los pozos más profundos de México y América Latina, como se refiere en los anuarios estadísticos. En la década de 1986 a 1996 se perforaron 380 pozos, con incrementos muy importante en los últimos cuatro años (6, 25, 36 y 32 pozos, respectivamente). Se estima que durante la perforación de un pozo se generan entre 1,000 y 1,200 toneladas de recortes (dependiendo de su profundidad y diámetros de cada etapa del pozo), los cuales son considerados como residuos peligrosos. Estos volúmenes dan una idea aproximada del problema que enfrenta la empresa.

Aun cuando los esfuerzos de la dependencia en pro de la protección ambiental han logrado avances considerables en el desarrollo e instalación de sistemas preventivos de

la contaminación, el carácter industrial de esta actividad obliga a ver más allá de su cadena productiva, a fin de vislumbrar soluciones integrales que satisfagan plenamente las demandas ambientales, ya que las tecnologías convencionales y no convencionales de perforación siguen arrojando un significativo volumen de desechos que debe manejarse y tratarse adecuadamente hasta hacerlos inocuos e inofensivos para la exposición humana.

Actualmente, existen diversos métodos para el tratamiento y disposición de los recortes y residuos de perforación impregnados con fluidos base agua y base aceite: confinamientos controlados, microencapsulamiento, biorremediación, lavado y centrifugado, incineración, destilación, destilación al vacío, destilación a alta temperatura, inyección a cuerpos receptores y extracción con solventes. Desde luego, cada una de estas opciones significa una erogación para la empresa que oscila entre 400 y 1,400 pesos por tonelada de residuos; además de los costos que representan el transporte, la construcción de presas, el movimiento de residuos dentro de la localización, etc., que prácticamente los duplican. En forma general, se estima que los costos relacionados con el manejo, tratamiento, transporte y disposición final de recortes y desechos, entre 1994 y 1997, ascendieron a 270 millones de pesos.

El área de Perforación y Mantenimiento de Pozos de la Región Sur, comprometida con las políticas ambientales de Petróleos Mexicanos e interesada en buscar áreas de oportunidad para mejorar su rentabilidad, se dio a la tarea de desarrollar un proceso alternativo para resolver este problema, que conjugara positivamente factores técnicos, económicos, logísticos y sociales. Dicho proceso alternativo consiste en el uso de los

recortes de perforación como materia prima en la industria cementera.

1.2. Marco teórico (Una nueva actitud)

Todos somos ambientalistas. Queremos un lugar limpio para vivir, agua limpia para beber, aire puro para respirar, vivir en un mundo más placentero y a salvo de peligros tóxicos. Pero, también queremos los beneficios de una energía barata, transportarnos en coche, volar en aviones, tener luz eléctrica en nuestros hogares, conservar nuestras casas calientes en invierno y frías en verano. Queremos medicinas y plásticos que se hacen a partir de los hidrocarburos. Pero a veces, nuestro deseo de un ambiente prístino y los beneficios de una energía barata están en conflicto. Para manejar nuestros coches necesitamos encontrar, producir y transportar petróleo. Para mantener los beneficios de una energía barata necesitamos una industria petrolera nacional fuerte.

Sabemos que siempre estará ahí el riesgo de dañar el ambiente durante las actividades de exploración y producción. Existen riesgos asociados a todas las actividades humanas, de ahí que sea necesario efectuar un balance entre los riesgos y los beneficios que aportan dichas actividades. Afortunadamente, casi todas las actividades de la industria petrolera básica disponen de opciones técnicas efectivas que pueden minimizar o eliminar el riesgo ambiental. Pero, desafortunadamente, muchas de esas opciones son caras y no son económicamente posibles.

Una de las claves para producir petróleo en formas ambientalmente responsables, es

tomar consciencia de cualquier peligro potencial para planear formas efectivas de minimizarlo antes de iniciar cualquier proyecto en particular. El primer paso en este proceso es la educación. Los ingenieros petroleros, geólogos y administradores debemos entender el lugar que ocupa nuestra industria en la sociedad. Todas las compañías, incluyendo a las petroleras, existen por gracia y voluntad de la gente. Si ésta no quiere que una industria exista, la puede cerrar ya sea mediante la legislación, los litigios o boicoteos económicos. Desgraciadamente, las presiones sociales impuestas sobre una industria no se basan necesariamente en información científica y tecnológica. Muchas normas existentes están basadas en cuestiones políticas y hacen muy poco por proteger la salud humana y el ambiente, aunque sí agregan un costo considerable al negocio que debe cumplirlas.

El movimiento ambientalista surgido en las dos últimas décadas ha generado normas que tienen un profundo efecto en las operaciones de la industria petrolera básica. Estas normas han sido impuestas porque el público ya no cree que la industria pueda regularse a sí misma y proteger el ambiente. Desde luego que esta pérdida de confianza se justifica en parte, pero la mayoría de las veces es resultado de la desinformación que difunden los ecologista extremistas y los medios escritos, que tergiversan la realidad o informan parcialmente con tal de vender sus ejemplares.

Independientemente de cual haya sido la causa de que el público perdiera su confianza en la industria petrolera para operar en forma ambientalmente responsable, lo cierto es que ésta debe aprender a vivir en un ambiente normativo ambiental cada vez más estrecho si quiere sobrevivir. Este cambio fundamental que se ha iniciado al asumir

una actitud proactiva hacia la protección ambiental, debe continuar. Las formas antiguas de hacer negocios se han ido para siempre y no volverán. No es suficiente con cumplir con la norma vigente; debemos comprometernos con la protección ambiental en todas las actividades, a pesar de las normas.

Históricamente, la industria petrolera ha reaccionado a veces a las nuevas normas realizando cambios en sus prácticas operacionales apenas suficientes para cumplir al pie de la letra la normatividad. Pero, debido a la complejidad y rapidez de los cambios regulatorios, este enfoque ya no sea funcional. Quizá lo más importante que puede hacer la industria petrolera sea adoptar una actitud de trabajo en armonía con la voluntad del público; pero más aún con el interés de la sociedad. Las agencias normativas no deben ser vistas como enemigas, sino como aliadas en el esfuerzo por producir petróleo tanto en forma económica como limpia desde el punto de vista ambiental. Por su parte, las agencias reguladoras pueden realizar su parte imponiendo normas basadas en información científica, no en las presiones políticas prevalecientes. La educación mutua entre los reguladores, la industria petrolera y el público a todos niveles, es un paso importante para lograr operaciones efectivas en costo y ambientalmente responsables.

Esta asociación requiere cooperación, trabajo en equipo, compromiso, credibilidad y confianza entre todas las partes involucradas en la exploración y producción de petróleo, incluyendo a los administradores de las compañías operadoras, ingenieros, geólogos, contratistas, tripulantes, normativos, ministerios públicos y legisladores. Las actividades ambientalmente relacionadas deben orientarse a mejorar la protección y la

conciencia ambiental, no a evitar la responsabilidad por la protección ambiental. La conciencia ambiental debe ser una parte integral del trabajo diario de todos.

Este tipo de actitud hacia la responsabilidad ambiental ha sido adoptado formalmente como un conjunto de principios por las compañías miembros del Instituto Americano del Petróleo. Estos principios se conocen como la "Declaración de principios para las operaciones petroleras ambientalmente responsables", y que a la letra dicen:

**Declaración de principios para las operaciones petroleras
ambientalmente responsables***

- Reconozca y responda a las preocupaciones de la comunidad acerca de las materias primas, productos y operaciones.
- Opere plantas e instalaciones y maneje las materias primas y productos en forma tal que proteja el ambiente, la seguridad y la salud de todos los empleados y el público en general.
- Haga que las consideraciones sobre seguridad, salud y ambiente tengan una alta prioridad en la planeación y desarrollo de nuevos productos y procesos.
- Avise rápida y apropiadamente a las autoridades, empleados clientes, y público en general, de la información importante de la industria referente a seguridad, salud y peligros ambientales, recomendando medidas de protección.
- Aconseje a clientes, transportistas y a todos los involucrados sobre el uso seguro, la transportación y disposición de materias primas, productos y materiales de desperdicio.
- Desarrolle y produzca económicamente los recursos naturales para conservarlos, utilizando la energía adecuada y eficientemente.
- Haga del conocimiento público su apoyo y conducción de investigaciones sobre seguridad, salud, y efectos ambientales de materias primas, productos, procesos y materiales de desperdicio.
- Reduzca completamente las emisiones y desperdicios de energía.
- Trabaje con otros para resolver problemas creados en la disposición de sustancias

peligrosas en las operaciones.

- Participe con el gobierno y otras empresas en la creación de leyes responsables, reglamentos y estándares para salvaguardar la comunidad, los lugares de trabajo y el entorno ambiental.
- Promueva estos principios y prácticas compartiendo experiencias y ofreciendo asistencia a otros que produzcan, manejen o dispongan de materias primas similares, productos petroleros y desperdicios.

* Fuente: Instituto Americano del Petróleo, 1992

Los beneficios de ser proactivo en la protección del medio ambiente, en oposición al simple reaccionar a la legislación, las normas u ordenamientos de las dependencias correspondientes, pueden reducir efectivamente los costos a largo plazo del negocio.

1.3. Objetivos de la investigación

Dado el carácter pragmático de esta investigación, cuyo resultado es el desarrollo de un proceso alternativo para el manejo, tratamiento y disposición final de los recortes y fluidos de la perforación petrolera, los objetivos propuestos para la misma están enfocados a su puesta en práctica por las dos empresas involucradas, para beneficio de ambas industrias. Así, los objetivos de este documento pueden ser expresados en los siguientes términos:

1. Demostrar la viabilidad de un proceso térmico para eliminar los residuos de la perforación petrolera.
2. Modificar la idea que prevalece en la perforación, de manejar residuos peligrosos

a generar materia prima aprovechable en la industria cementera, para beneficio de dos industrias poco relacionadas.

3. Eliminar el requerimiento de espacios para confinamiento de recortes de perforación, para evitar el riesgo de contaminación por infiltraciones.
4. Reducir los costos por manejo, tratamiento y disposición final de los recortes y fluidos de la perforación petrolera, para mejorar la rentabilidad de esta actividad.
5. Abatir el pasivo ambiental en antiguas localizaciones de perforación, para evitar el descontento y las reclamaciones de las comunidades.
6. Eliminar las descargas contaminantes en las localizaciones de perforación, para evitar reclamaciones, mejorar el desempeño ambiental y mejorar la imagen social de la empresa.
7. Cumplir con la normatividad ecológica para preservar el medio ambiente.

1.4. Metodología aplicada

De acuerdo con la naturaleza del problema, la metodología aplicada al desarrollo de esta investigación corresponde a la documentación de un "dispositivo tecnológico", en tanto que se refiere a un proceso industrial innovador muy fértil y de gran potencial, que nació pequeño y fue creciendo en alcances hasta lograr su protección mediante una patente de cobertura nacional e internacional.

El punto de partida de este trabajo fue la detección de un área de oportunidad económica para ahorrar dinero, que surgió a partir de una visita técnica a las

instalaciones de la planta de la compañía Cementos Apasco, en Macuspana. La primera acción emprendida fue el envío a los laboratorios de una muestra del núcleo de un pozo para saber si sus componentes eran compatibles con las arcillas y calizas que usa la industria del cemento como materia prima.

Confirmada esa compatibilidad, el siguiente paso fue ordenar un muestreo más amplio de los recortes y fluidos de perforación usados en la Región Sur, para efectuar los análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, y Biológicos infecciosos) y caracterizarlos mejor, de acuerdo con las normas NOM-052-ECOL/93 y NOM-053-ECOL/93 de la Secretaría de Desarrollo Social.

Una vez descartada su peligrosidad por los análisis CRETIB, se enviaron varios lotes de recortes impregnados con fluidos de perforación para ser incinerados en la planta de Cementos Apasco, efectuando para ello un monitoreo muy estricto, con base en un protocolo de pruebas autorizado por la Dirección de Residuos, Materiales y Riesgo del Instituto Nacional de Ecología, con la participación del Instituto Mexicano del Petróleo, y teniendo como órgano certificador a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Atzacotalco.

Una vez comprobada la factibilidad técnica de este proceso alternativo para la incineración de los desechos industriales de la perforación, se procedió a gestionar la obtención de una patente de cobertura nacional e internacional, cuya explotación puede ser la base para una alianza estratégica entre dos empresas comprometidas con una filosofía de desarrollo industria sustentable.

Debido también a su carácter pragmático, este trabajo de investigación no incluye

notas, citas o referencias bibliográficas cruzadas, que caracterizan el instrumental metodológico de una tesis. Por lo tanto, sólo se mencionan documentos internos, protocolos de trabajo, normas generales y libros como referencias documentales y bibliográficas.

2. Desarrollo del proceso alterno

2.1. Planteamiento del problema

Como se ha comentado, en la Región Sur se usan diversas técnicas para el manejo, tratamiento y disposición final de los recortes y fluidos de perforación, entre las que destacan: confinamientos controlados, encapsulados, biorremediación, lavado y centrifugado, incineración, destilación, destilación al vacío, destilación a alta temperatura, inyección a cuerpos receptores y extracción con solventes. Sin embargo, muchas de ellas han aportado resultados parciales y poco satisfactorios desde los puntos de vista técnico, económico y ecológico.

Con esta problemática en mente, durante una visita a la planta de Cementos Apasco en Macuspana, Tabasco, se observó que el proceso de fabricación de cemento utiliza hornos de gran capacidad que trabajan a temperaturas cercanas a los 2,000 °C, y que además, utiliza como materia prima arcillas y calizas que también encontramos como subproductos de la perforación.

Esta observación permitió visualizar el proceso de fabricación del cemento como una posibilidad para dar un destino final a los residuos de la industria petrolera, eliminando así el problema ambiental que tanto cuesta a la empresa y afecta su imagen social.

Con esta idea en mente, se inició una serie de acciones que tuvieron por objeto probar la viabilidad del tratamiento térmico de los recortes de perforación en hornos de la industria cementera, como una alternativa a los usados regularmente, buscando al

mismo tiempo identificar los mecanismos técnicos, económicos, legales y administrativos para desarrollarlo comercialmente.

Las acciones emprendidas tuvieron por objeto probar la viabilidad del tratamiento térmico de los recortes de perforación en hornos de la industria cementera, como un proceso alternativo a los usados regularmente, buscando al mismo tiempo identificar los mecanismos técnicos, económicos, legales y administrativos para desarrollarlo comercialmente.

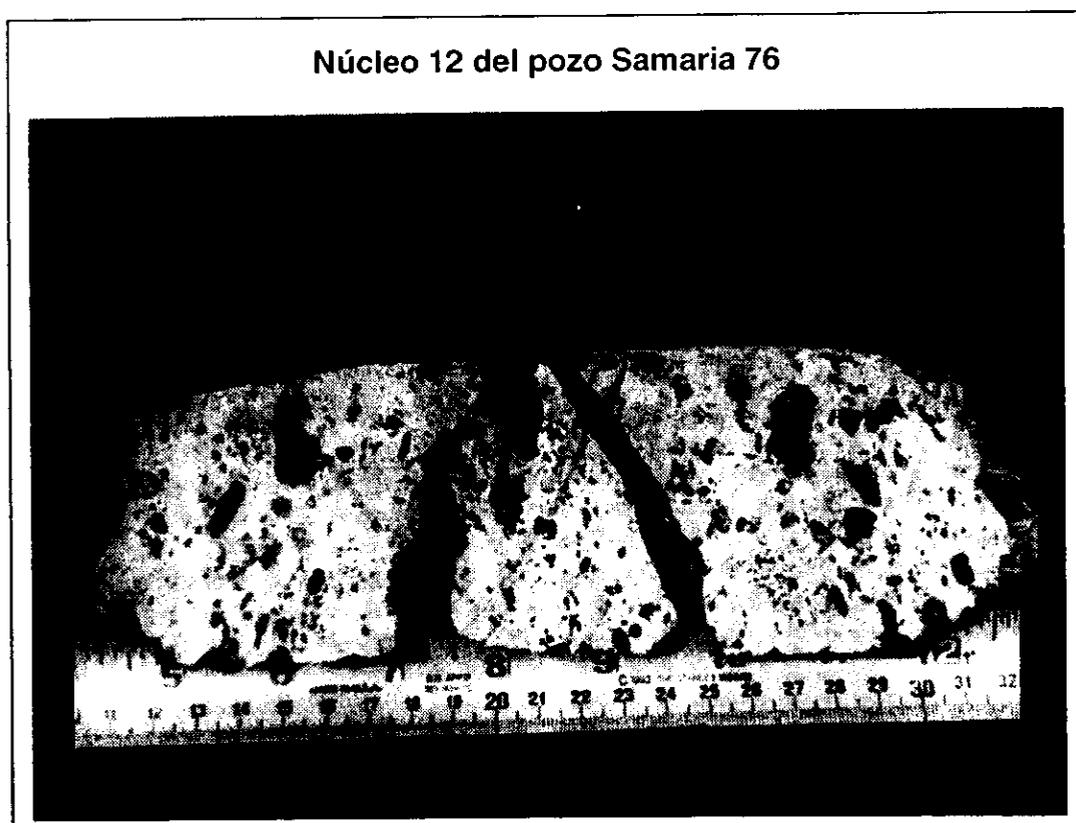
Para tal efecto, primero se recolectaron muestras de las arcillas y fluidos de emulsión inversa que se generan en la perforación de pozos, se enviaron a los Laboratorios ABC para que se les aplicaran los análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, y Biológicos infecciosos), a fin de caracterizar su naturaleza y composición química, evaluar su peligrosidad y conocer la factibilidad de incorporar estos materiales al proceso de fabricación del cemento.

2.2. Recolección y análisis de muestras

Para tener una referencia del tipo de arcilla que se perfora en los petroleros, y su posible compatibilidad con las que usa como materia prima la industria cementera, se envió para su análisis un núcleo del pozo Sen 121, cuya composición se muestra en la **Tabla 2.1.**

Tabla 3.1. Análisis por difracción de rayos X del núcleo de 2,570-2,579 m, formación Eoceno, extraído del pozo Sen 121.

Constitución	Porcentaje
Smectita	67
Illita	25
Cuarzo	3
Calcita	2
Clorita	2
Feldepatos	1
Siderita	Trazas



Dada esta composición del núcleo, se demuestra que sus componentes son totalmente compatibles con los requeridos por la industria cementera. Se procedió entonces a realizar un muestreo de recortes de perforación impregnados con emulsión

inversa en diversos pozos de la Región Sur. Se recolectaron catorce muestras en total, a las que se practicaron los análisis CRETIB. Los resultados de dichos análisis, descritos en el capítulo cuatro, fueron satisfactorios, pues mostraron una total compatibilidad de los recortes de perforación con los usados en el proceso de fabricación del cemento.

Sin embargo, existían otros obstáculos que tenían que ser superados para poder llevar a cabo una prueba piloto de incineración en el horno de la planta cementera. Estos se referían básicamente las estrictas medidas ambientales que rigen la operación de estas plantas con relación a la emisión de partículas a la atmósfera. Se recurrió al Instituto Mexicano del Petróleo para que efectuara la medición y análisis de partículas enviadas a la atmósfera por chimenea, con la participación de una compañía canadiense, contratada por Cementos Apasco, para certificar la objetividad e imparcialidad de las mediciones efectuadas por esta institución.

Las pruebas se realizaron de la siguiente manera:

1. La primera etapa fue el monitoreo de emisión de partículas en blanco; es decir, en el proceso normal de la planta cementera.
2. El monitoreo de emisiones de partículas incorporando al horno de cemento los recortes de perforación con emulsión inversa, a un promedio de 4 toneladas por hora, variando hasta 7 toneladas por hora como máximo.
3. Finalmente, con la planta operando en sus condiciones normales.

Los resultados obtenidos en estas pruebas piloto fueron altamente satisfactorios, ya

que la emisión de partículas a la atmósfera no sobrepasó los estándares establecidos por las normas, dando por viable el tratamiento térmico de los recortes y residuos de la perforación petrolera en hornos que alcanzan altas temperaturas.

2.3. Resultados de análisis, muestreos y pruebas

Los análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, y Biológicos infecciosos) que se practicaron a catorce muestras de fluidos de perforación, con base en la normatividad aplicable para la identificación y clasificación de materiales y residuos peligrosos (NOM-052-ECOL-1993 y NOM-053 ECOL-1993), tuvieron como objetivo determinar con exactitud si los residuos pueden ser clasificados como peligrosos, y si las cantidades que se observan en dichas muestras rebasan los límites máximos permisibles marcados por la normatividad ambiental y de salud pública.

Con base en los resultados de dichos análisis se concluye que los fluidos de perforación, aunque están clasificados como residuos peligrosos, en las muestras analizadas *los contaminantes presentes no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-052-ECOL-1994*; asimismo, se observó que *no presentan las características extremas de los residuos peligrosos*, en los rubros de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad al ambiente, inflamabilidad y biológico infeccioso; aunque es innegable el efecto negativo de éstos al medio natural, como consecuencia de su composición, concentración y volumen. Estos análisis se comentan

detalladamente en el capítulo tercero.

A continuación se presenta un resumen de los resultados del monitoreo de emisiones a la atmósfera en chimenea, efectuado durante las pruebas de incineración de recortes de perforación en el horno de cemento. Los resultados de dicho estudio se presentan detalladamente en el capítulo cuatro.

La **Tabla 2.2** presenta la alimentación al horno de fabricación de cemento, la alimentación de recortes de perforación y sólidos impregnados, en toneladas por hora, así como el consumo de gas combustible en m³/h, durante los días de prueba.

Tabla 2.2. Consumo de combustible y carga de proceso en horno de fabricación de cemento

No.	Fecha	Alimentación t/h		Alimentación t/h		Consumo de gas m ³ /h	
		horno	clinker	recortes	sólidos	Precal.	horno
1	20/08/97	166	96	3.0	0.0	4020	4223
2	21/08/97	170	102	3.0	0.0	1830	1722
3	22/08/97	177	106	0.0	0.1	5277	3907
4	23/08/97	178	107	0.0	0.0	5420	3922

La Tabla 2.3 presenta la concentración promedio de emisiones contaminantes detectadas por los analizadores en el transcurso del monitoreo, generadas por el horno de fabricación de cemento de CO, SO₂, NO_x, HCt, HCl expresadas en partes por millón, y CO₂, O₂, expresadas en porcentaje, así como la opacidad de cada monitoreo en porcentaje y los miligramos por metro cúbico normal de partículas emitidas a la atmósfera, comparadas con la norma oficial mexicana NOM-040-ECOL-1993.

Tabla 2.3. Concentración promedio de emisiones contaminantes a 250c, 760 mmHg y base seca. Chimenea del horno de fabricación de cemento

No	Fecha	Alimentación t/h		NOx ppm	SO ₂ ppm	CO ppm	CO ₂ % vol.	O ₂ % vol.	PST		
		recortes	sólidos						real mg/m ³	real kg/h	norma kg/h
1	20/08/97	3.0	0.0	225.5	114.7	500.8	7.1	15.6	52.5	14.7	41.2
2	21/08/97	3.0	0.0	167.7	167.2	725.5	12.7	13.1	60.8	16.5	42.4
3	22/08/97	0.0	0.1	206.8	251.7	773.9	13.3	12.3	45.9	12.6	43.7
4	23/08/97	0.0	0.0	225.5	244.2	949.8	14.1	11.3	45.4	12.2	43.9

La **Tabla 2.4** presenta la concentración promedio de emisiones contaminantes registradas por los analizadores durante el monitoreo, corregidas al 7% de oxígeno y repetidas a 760 mmHg, 25 °C y base seca, el CO, SO₂, Nox, HCl expresadas en partes por millón, y el O₂ en porcentaje y los miligramos por metro cúbico normal de partículas emitidas a la atmósfera comparadas con la norma oficial mexicana NOM-040-ECOL-1993.

Tabla 2.4: Concentración promedio de emisiones contaminantes. Corridas a 7% de O₂ base seca y a 760 mmHg y 25 °C. Chimenea del horno de fabricación de cemento

No	Fecha	Alimentación t/h		Alimentación t/h		NOx ppm	SO ₂ ppm	CO ppm	O ₂ % vol.	PST		
		horno	clinker	recortes	sólidos					real mg/m ³	real kg/h	norma kg/h
1	20/08/97	166	96	3.0	0.0	589.9	2946.7	1300.8	15.6	136.3	38.1	41.2
2	21/08/97	170	102	3.0	0.0	297.8	296.4	1287.4	13.1	120.2	32.2	42.4
3	22/08/97	177	106	0.0	0.1	345.4	406.8	1242.4	12.3	73.6	20.2	43.7
4	23/08/97	178	107	0.0	0.0	326.3	349.5	1368.1	11.3	65.4	17.6	43.9

De acuerdo con los resultados obtenidos en los monitoreos realizados en la chimenea del horno rotatorio de fabricación de cemento, en la planta Macuspana de Cementos Apasco, se concluye lo siguiente:

- La concentración de emisiones de NOx, SO₂ y HCl es muy constante durante la

incorporación de recortes de perforación y sólidos impregnados, y las variaciones en el CO, HCt y partículas, se debe más a cambios en las condiciones de operación durante las pruebas, que a efectos de la adición de recortes de perforación y sólidos impregnados.

- El volumen de residuos incorporados al proceso de fabricación de cemento en esta planta, para su destrucción térmica, es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados al proceso, por lo que su efecto es imperceptible.
- En ningún caso se rebasó el máximo valor permisible estipulado por la norma oficial mexicana NOM-040-ECOL-1993 para la emisión de partículas.
- La emisión de hidrocarburos totales refleja un incremento al incorporar recortes de perforación y sólidos impregnados; sin embargo, también se presentaron cambios en las condiciones de operación de la planta.
- Las pruebas realizadas durante todos los monitoreos con y sin adición de recortes de perforación y sólidos impregnados, se realizaron a condiciones de 25 °C, 760 mmHg y base seca.
- La variación en las emisiones promedio registradas de bióxido de carbono y de oxígeno durante los monitoreos se debió a cambios en las condiciones de operación.

En resumen, la concentración de metales y cloro es muy constante antes y durante la incorporación de recortes de perforación y sólidos impregnados, y las variaciones no resultan significativas, debiéndose más a cambios en las condiciones de operación durante las pruebas que a efectos de la adición de recortes de perforación y sólidos

impregnados. El volumen de residuos incorporados al proceso de fabricación de cemento en esta planta para su destrucción térmica, es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados al proceso, por lo que su efecto es imperceptible. En ningún caso se rebasó el valor máximo permisible estipulado por la NOM-040-ECOL-1993 para la emisión de partículas.

2.4. Logros más recientes

Con toda la información obtenida durante las pruebas, se tramitaron los permisos correspondientes ante el Instituto Nacional de Ecología, y se procedió a realizar la prueba definitiva de tratamiento térmico de recortes a mediados de 1997.

Hasta mediados de 1998 ya se había dado tratamiento a más de 1,500 toneladas de este tipo de material, el cual ha sido incorporado al clinker de cemento, con lo que se logra eliminar los residuos de la perforación de manera eficiente, limpia, a bajo costo, y sin generar residuos que requieran disposición final. En suma, la incineración de recortes de perforación a altas temperaturas en hornos de fabricación de cemento, es un proceso rápido y de resultados inmediatos; y, lo más importante, logra conjugar los procesos de dos industrias en la resolución de un problema ambiental.

Con este proceso para el tratamiento de recortes de perforación, se logra:

- Integrar las arcillas y calizas al proceso de fabricación del cemento.
- Eliminar un buen porcentaje del pasivo ambiental de la Región Sur.
- Entregar a producción localizaciones libres de residuos contaminantes.

- Disminuir los costos por manejo de residuos peligrosos.
- Cumplir la normatividad ambiental aplicable a este renglón.
- Mejorar la imagen de PEP.
- Armonizar una operación petrolera con el entorno social.

Actualmente, se tiene un programa para continuar con esta práctica de manera más amplia, en el que se contemplan acciones como: continuar con la incineración en la planta de Macuspana; iniciar pruebas de tratamiento en las plantas de Orizaba y Ramos Arizpe; iniciar tratamiento a recortes en hornos de destrucción térmica; e iniciar prueba de tratamiento de aguas aceitosas en la planta Macuspana.

2.5. Desarrollo comercial

Una vez cubiertos los requisitos legales de la normatividad ambiental, que permitió dar como viable el tratamiento térmico de los recortes de perforación, a partir de los análisis, muestreos y pruebas efectuados, quedaba pendiente la justificación económica y el establecimiento de los mecanismos administrativos para desarrollar comercialmente este proceso.

En principio, Cementos Apasco formó la compañía ECOLTEC, con el propósito de manejar, transportar, formular y almacenar residuos peligrosos susceptibles de ser destruidos térmicamente en los hornos de cemento. Esta empresa del Grupo Apasco fue un factor clave en el desarrollo del proceso descrito en este trabajo, ya que a través

de ella se efectuaron los estudios técnico-económicos del proceso de fabricación del cemento, se gestionaron los permisos necesarios ante las autoridades ambientales para efectuar las pruebas de tratamiento térmico, y se practicaron análisis complementarios de los fluidos y recortes de la perforación.

Por otra parte, a través de ECOLTEC se procedió a gestionar las patentes nacionales e internacionales para proteger el nuevo proceso, requisito indispensable para el desarrollo comercial de este servicio.

En la Región Sur de Pemex Exploración y Producción se efectuaron los análisis económicos para determinar los posibles ahorros que podría obtener la empresa con el aprovechamiento de esta invención, así como definir los mecanismos administrativos para aprovechar esta patente conjunta, con una visión de largo plazo.

3. Análisis CRETIB de recortes y fluidos de perforación

3.1. Antecedentes

Los fluidos y recortes de perforación han sido considerados como residuos peligrosos, sin conocer con certidumbre si lo son o no. La composición real de un residuo (peligroso o no), no sólo es diferente entre sectores industriales, sino que puede ser apreciablemente distinto aun dentro de diferentes plantas o procesos de una misma rama industrial. En un primer intento por abordar el problema derivado de la generación de residuos peligrosos, se debe partir de una clasificación, tanto de las fuentes generadoras como de los tipos de residuos que se producen.

En el caso especial de la perforación, en la mayor parte del proceso se manejan materiales tóxicos e inflamables, con características semisólidas, constituidos principalmente por recortes de perforación impregnados con fluidos de emulsión inversa y aguas de proceso.

Los residuos que se generan tienen características peligrosas, principalmente por su alto contenido de metales pesados como plomo y cadmio, metaloides como arsénico y selenio, y sustancias cáusticas. Por lo tanto, la importancia de manejarlos adecuadamente se deriva de la necesidad de controlar sus efectos adversos para la salud humana y los ecosistemas. Desafortunadamente, estas implicaciones no fueron tomadas en consideración sino hasta muy recientemente.

Los problemas ambientales y de salud pública que acarrea su disposición final

inadecuada, son de tal magnitud que puede decirse que constituyen uno de los desafíos más importantes que enfrenta la sociedad moderna.

Partiendo de la importancia de una acertada identificación y clasificación de los residuos generados en el proceso de perforación, la Región Sur de PEP, a través de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, ha retomado este planteamiento, y de esta preocupación surge la necesidad de analizar más a fondo esta problemática, para lo cual se procedió a la toma de 14 muestras de recortes de perforación de los pozos Gualas 1, Tecominoacán 119, Samaria 1170, Puerto Ceiba 113, Catedral 75, Iride 1118, Chinchorro 2, Bellota 114, Puerto Ceiba 101-B, Catedral 41 y Samaria 1173, ubicados en las áreas norte, noreste, noroeste, oeste del estado de Tabasco y norte del estado de Chiapas.

Con base en la normatividad aplicable para la identificación y clasificación de materiales y residuos peligrosos (NOM-052-ECOL-1993 y NOM-053 ECOL-1993), se procedió a efectuar los análisis CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológicos infecciosos), para determinar con exactitud si estos residuos pueden ser clasificados como peligrosos, y si están fuera de los límites máximos permisibles que marca la normatividad ambiental vigente, así como en materia de salud pública.

El proceso de evaluación de estos recortes tiene como objetivo expresar en forma cuantitativa el perjuicio al ambiente y a la salud que causan estos residuos peligrosos en los sitios de estudio. Este proceso de evaluación consistió de cuatro etapas:

1. Identificación del residuo peligroso.

2. Evaluación cuantitativa de los contaminantes presentes en los materiales y residuo peligroso.
3. Caracterización del riesgo de exposición ante materiales y residuos peligrosos.
4. Alternativas de confinamiento temporal, tratamiento, uso, eliminación o confinamiento final de los residuos peligrosos.

3.2. Identificación del residuo peligroso

Los residuos peligrosos son, de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), reformada en diciembre de 1996: "Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente".

En el proceso de perforación de pozos para la extracción de petróleo y gas, se utilizan materias primas como los fluidos de perforación, los cuales no deben ser clasificados como *residuos peligrosos* sino como *materiales peligrosos*, por su alto contenido de aditivos químicos, y porque son el material a utilizar en el proceso. En tanto los recortes de perforación *son residuos peligrosos* resultantes del proceso de utilizar fluidos (base agua o base aceite, los cuales contienen un alto porcentaje de aditivos químicos, que sirven para darles densidad, viscosidad, resistencia a altas temperaturas, etc.), combinados con el material parental obtenido en el proceso de perforación.

La importancia de manejar adecuadamente los residuos peligrosos se deriva de la necesidad de controlar sus efectos adversos para la salud y los ecosistemas, así como su impacto negativo sobre el bienestar social.

Una vez realizada la diferenciación entre materiales y residuos peligrosos utilizados y generados en el proceso de perforación, es necesario considerar lo que señala la LGEEPA y el reglamento en materia de residuos y materiales peligrosos, y las normas oficiales mexicanas (NOM's), documentos que contienen los criterios y listados que clasifican los materiales y residuos peligrosos como tales, y los identifican por su grado de peligrosidad y volúmenes; además, debe considerarse que el Título IV, Capítulo VI, Art. 151 de la LGEEPA, se señala que: "La responsabilidad del manejo y disposición final de los *residuos peligrosos* corresponde a quien los genera". Por lo tanto, es responsabilidad de Pemex Exploración y Producción identificar el grado de peligrosidad y las características de los materiales y residuos peligrosos, así como planear un adecuado manejo y disposición final de los mismos.

3.3. Evaluación cuantitativa de los contaminantes

Como se señaló anteriormente, se tomaron 14 muestras de recortes de perforación de los pozos mencionados, aplicándose para el análisis correspondiente la NOM-052-ECOL-1993 para identificación, clasificación y evaluación, y la NOM-053-ECOL-1993 para determinar la toxicidad de estos al ambiente.

Para familiarizar al lector con las determinaciones de cada una de esas 14 muestras,

presento a continuación los resultados de las dos primeras, correspondientes al pozo Gualas 1.

MUESTRA N° 1

Para la muestra N° 1 (entrada) que corresponde al fluido base aceite a usar en el pozo Gualas I, el valor de corrosividad no rebasa el límite permisible (menor de 2 ó mayor o igual a 12.5), ya que al efectuar el análisis de pH del fluido en disposición acuosa al 10%, presentó un valor de 8.93, lo que indica que el fluido es ligeramente alcalino; y este valor, de acuerdo a la norma, se encuentra dentro de los límites.

En referencia a la reactividad, se realizaron las pruebas que marca la norma, como son: someter el fluido a presión, golpes, altas temperaturas, etc., y no se presentó inestabilidad; tampoco reaccionó con el agua en forma violenta (relación 5:1, 5:3 y 5:5), ni formó gases, vapores o humos.

La explosividad fue evaluada también, El fluido, al someterlo a fricción y golpes, no presentó reacción o respuesta iguales o similares del nitrobenzeno; tampoco produce reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 °C y a 1.3 kg /cm² de presión.

En materia de toxicidad, ésta fue evaluada con base en la prueba de lixiviado y los contaminantes, evaluados de acuerdo con la norma, no sobrepasan el límite máximo permisible.

La inflamabilidad fue medida y tampoco se presentó, pues el fluido no es capaz de causar fuego por fricción. Tampoco contiene más del 24% de alcohol etílico, ni presenta punto de inflamabilidad de acuerdo al método de copa cerrada (Pensky-Martens).

Para el caso del análisis biológico infeccioso, actualmente se desconoce el método y los límites máximos permisibles de coliformes totales y fecales cuantificables en materiales y residuos peligrosos, por lo cual no se detectaron.

En la muestra se detectaron hidrocarburos lineales y compuestos aromáticos y, de acuerdo a la cromatografía de gases compuestos, como el 2-fluorofenol, fenol, biclorobenceno, nitrobenceno, naftaleno, fluorobifenilo, 2-4 dinitrotolueno, tribromofenol, lindano, fenantreno, y terfenilo D14, no cumplen con los cualificadores; y comparando los valores con NOM-010-STPS-1994, éstos rebasan los límites máximos permisibles de exposición.

De acuerdo al análisis CRETIB, se concluye que este fluido NO ES CORROSIVO, NO ES REACTIVO, NO ES EXPLOSIVO, NO ES TOXICO, NO ES INFLAMABLE.

MUESTRA N° 2

La muestra N° 2 (salida), corresponde al recorte base aceite obtenido del proceso de perforación del pozo Gualas I.

Para la corrosividad se midió el pH en la muestra en dispersión acuosa al 10%, y el resultado obtenido es de 8.54, el cual no rebasa los límites permisibles (menor de 2 ó mayor o igual a 12.5), lo que indica que el recorte es ligeramente alcalino; y este valor, de acuerdo a norma, se encuentra dentro de los límites.

En referencia a la reactividad, se realizaron las pruebas que marca la norma, como son: someter el recorte a presión, golpes, temperaturas altas, etc., y no se presenta inestabilidad, tampoco reacciona con el agua en forma violenta (relación 5:1, 5:3 y 5:5),

ni forma gases, vapores, humos.

La explosividad fue evaluada también y el recorte, al someterlo a fricción y golpes, no presenta reacción o respuestas iguales o similares al nitrobenceno, tampoco produce reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 °C y a 1.3 Kg/cm² de presión.

En materia de toxicidad, ésta fue evaluada en base a la prueba de lixiviado y los contaminantes evaluados de acuerdo a la norma (NOM-053-ECOL-1994) no sobrepasan el límite máximo permisible.

La inflamabilidad fue medida y tampoco se presentó, pues el recorte no es capaz de causar fuego por fricción. Tampoco contiene más del 24% de alcohol etílico, ni presenta punto de inflamabilidad de acuerdo al método de copa cerrada (Pensky-Martens).

Para el caso del análisis biológico infeccioso, actualmente no fueron determinados por ausencia de metodología apropiada para la evaluación de estos en residuos peligrosos.

En la muestra se detectaron hidrocarburos lineales y compuestos aromáticos y, de acuerdo a la cromatografía de gases compuestos, como el 2-fluorofenol, fenol, biclorobenceno, nitrobenceno, naftaleno, fluorobifenilo, tribromofenol, lindano, fenantreno, y terfenilo D14, no cumplen con los cualificadores; y comparando los valores con NOM-010-STPS-1994, éstos rebasan los límites máximos permisibles de exposición.

De acuerdo al análisis CRETIB, se concluye que este fluido **NO ES CORROSIVO, NO ES REACTIVO, NO ES EXPLOSIVO, NO ES TOXICO, NO ES INFLAMABLE.**

3.4. Caracterización del riesgo de exposición

Para la caracterización del riesgo de exposición ante materiales y residuos peligrosos, resulta indispensable identificar el nivel de riesgo, y determinar los mecanismos y rutas de exposición, con el fin de desarrollar las estrategias y medidas de protección más eficientes.

La evaluación de riesgos para la salud humana por exposición a materiales y residuos peligrosos consta de cuatro pasos:

1. Identificar el peligro y recolección de datos.
2. Evaluar la exposición (dosis-respuesta).
3. Evaluar la exposición y los riesgos para la salud.
4. Caracterizar el riesgo.

3.4.1. Identificación del peligro y recolección de datos

La identificación del peligro y recolección de datos, se refiere básicamente a una caracterización analítica del material y/o residuos peligrosos, con la finalidad de determinar los agentes dañinos que están presentes en éste y determinar el efecto hacia la salud.

La evaluación de la exposición va acompañada de una evaluación de la toxicidad, y se determinan conjuntamente para obtener una expresión cuantitativa del riesgo al humano (dosis-respuesta) asociado a determinado sitio, considerando la normatividad existente.

Cuando se habla de la necesidad de clasificar los materiales y residuos peligrosos, tomando en cuenta el daño que pueden ocasionar en el ser humano, es necesario recordar las posibles rutas de exposición a estos agentes para caracterizar el riesgo. El daño puede obtenerse por la exposición de un individuo a un material o residuo peligroso por inhalación, vía oral, contacto por piel o mucosas y penetración. El material o residuo peligroso puede absorberse, eliminarse o acumularse, de acuerdo con el medio en que se encuentra el individuo y la exposición que exista.

La *absorción* consiste en el paso del material o residuo peligroso a través de las membranas biológicas correspondientes a la circulación sistemática. En la sangre las sustancias que lo componen se solubilizan en el plasma y/o se unen a las proteínas plasmáticas o a los glóbulos rojos.

La *eliminación* ocurre ya sea por la excreción urinaria y/o intestinal y por biotransformación. En términos globales, el metabolismo tiende a generar sustancias menos activas y fácilmente excretables.

La *acumulación* se da de acuerdo a las características físico-químicas del material o residuo, el cual puede llegar a fijarse en ciertos tejidos y acumularse en ellos e interactuar con las macromoléculas celulares, transformando el funcionamiento de éstas o alterando la fisiología celular.

Para el caso particular de las sustancias que se encontraron en los fluidos y recortes de perforación, que pueden tener un efecto sobre la salud son: 2-fluorofenol, fenol, biclorobenceno, nitrobenceno, hexacloroetano, naftaleno, fluorobifenilo, tribromofenol, lindano, fenantreno, terfenilo y 2,4 dinitrotolueno.

3.4.2. Evaluación de la exposición (dosis-respuesta)

Las áreas de exposición a estas sustancias están: en las presas de elaboración y recirculación del fluido, en las temblorinas de recuperación de recortes y fluido, y en las áreas de confinamiento temporal de los residuos peligrosos y almacenamiento temporal de fluidos. El número de trabajadores expuestos a estas sustancias varía de acuerdo, al número de cuadrillas y los tiempos de perforación. De este modo, la evaluación dosis-respuesta se rige por lo establecido en la NOM-010 STPS-1994, y para cada uno de estos compuestos se presenta en esta norma las concentraciones máximas permisibles por tiempo de exposición; expresándola en mg/m³ ó ppm (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Concentraciones de compuestos

COMPUESTO	CPT*1		CCT*2	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
2 Fluorofenol	No reportado		No reportado	
Fenol	5	19	10	38
Biclorobenceno	No reportado		No reportado	
Nitrobenceno	1	5	2	10
Hexacloroetano	10	100		
Naftaleno	10	50	15	75
Fluorobifenilo	No reportado		No reportado	
Tribromofenol	No reportado		No reportado	
Lindano	----	0.5	1	5
Fenantreno	No reportado		No reportado	
Terfenilo hidrogenado	0.5	5	---	---
2,4 Dinitrotolueno	---	1.5	---	5

CPT.- Concentración Ponderada en Tiempo (8 horas de exposición)
 CCT.- Concentración para Exposición a Corto Tiempo (15 minutos)

Cada uno de estos compuestos en la Norma-010-STPS-1994 y en el Control of Substances Hazardous to Health (COSHH), están reportados como carcinógenos

potenciales, pues en su mayoría se presentan en el ambiente de trabajo como partículas policíclicas de hidrocarburos aromáticos, como bencenos solubles.

Para el caso de sustancias asociadas con procesos industriales, reconocidas como carcinógenos potenciales, sin asignarles un valor máximo permisible, no se debe permitir la exposición del trabajador por ninguna vía; para la cual se deben utilizar los métodos de control específicos, como es el caso del: 2-fluorofenol, biclorobenceno, fluorobifenilo, tribromofenol y fenantreno.

La evaluación de la exposición deberá realizarse por medio del muestreo para cuantificar periódicamente los niveles de concentración, aplicándose los métodos que marcan las normas oficiales mexicanas y/o normas internacionales. En el ámbito internacional existen dos tipos de límites de exposición ocupacional. Estos son, de acuerdo al COSHH:

- a) Límites máximos de exposición (MEL's)
- b) Estándares de exposición ocupacional (OES's)

Para los MEL's, el único compuesto reportado como peligroso por su potencial cancerígeno es el biclorobenceno, con: 5ppm y $16\text{mg}/\text{m}^3$ por 8 horas de exposición. Los estándares de exposición ocupacional reportados para este caso son:

Tabla 3.2. Estándares de exposición ocupacional

	(8 Hrs)		(15 min)	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
2 fluorófenol	2	8	10	40
Biclorobenceno			50	300
Nitrobenceno	1	5	2	10 SK
Hexacloroetano (vapor)	5	50		
Polvo total inhalable		10		
Polvo respirable,		5		
Lindano		0.1		-SK

Los estándares de exposición ocupacional son parámetros que no indican el riesgo a la salud de estos compuestos; en tanto que los límites máximos de exposición muestran un riesgo existente a la salud, los cuales toman en consideración los aspectos sociales de la exposición.

3.4.3. Evaluación de la exposición y los riesgos para la salud

A continuación se presentan las evaluaciones realizadas a cada uno de los compuestos reportados en la cromatografía de semivolátiles, los cuales no cumplen con los cualificadores existentes. Para el caso específico de hidrocarburos lineales y compuestos aromáticos, éstos no se reportan ni se comparan con alguna norma en particular, ya que el análisis de los mismos no reporta en forma clara la concentración exacta del compuesto encontrado. Partiendo de éste entendido, sólo presentamos los resultados y análisis comparativo para compuestos semivolátiles correspondientes a dos de las muestras analizadas, y las ppm que sobrepasan la NOM-010-STPS-1994, y el efecto o riesgo que conlleva el uso y manejo de estos compuestos, tanto en los

fluidos de perforación como en los recortes.

Tabla 3.3. Resultados del análisis CRETIB de las 14 muestras

MUESTRA 1

Compuestos semivolátiles	Concentración mg/l	Limite max. Perm Cpt ppm	Diferencia con norma ppm	Riesgo
2 Flourofenol	74.50	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Fenol	74.13	5	14.82	Cancerígeno
Biclorobenceno	54.40	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Nitrobenzeno D-5	87.00	1	87.00	Cancerígeno
Naftaleno	50.60	10	5.06	Cancerígeno
Fluorobifenilo	38.10	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Tribromofenol	23.27	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Fenantreno	39.80	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Terfenilo D14	420.7	0.5	814.40	Cancerígeno

MUESTRA 2

Compuestos semivolátiles	Concentración mg/l	Limite max. Perm Cpt ppm	Diferencia con norma ppm	Riesgo
Flourofenol	112.5	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Fenol	108.9	5	21.78	Cancerígeno
Biclorobenceno	54.40	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Nitrobenzeno	103.6	1	103.6	Cancerígeno
Naftaleno	50.60	10	5.06	Cancerígeno
Fluorobifenilo	49.50	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Tribromofenol	32.18	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Lindano	15.55	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Fenantreno	39.80	N.A.	N.A.	Cancerígeno
Terfenilo D14	170	0.5	340	Cancerígeno

3.4.4. Caracterización del riesgo

Los principales riesgos que se presentan a la salud por los compuestos semivolátiles, son sus posibles efectos carcinogénicos. Los efectos de la exposición se manifiestan en la alteración y degeneración de hígado y riñones, problemas cardiovasculares, dificultad para respirar, taquicardia, trombopenia, etc. Se encontró que existen compuestos que

no tienen relación con el proceso de perforación. Estos compuestos son plaguicidas organoclorados, como el hexacloroetano y el lindano, acompañados ocasionalmente por hexaclorobenceno.

3.5. Alternativas de confinamiento temporal, tratamiento, uso o confinamiento final de los materiales y residuos peligrosos

Al tomar decisiones sobre las acciones tendientes a evitar la exposición humana y las alternativas de confinamiento temporal, tratamiento, uso o confinamiento final de los materiales y residuos peligrosos, hay que examinar cuidadosamente todos los datos conocidos del sitio, el tipo y grado de contaminación, las rutas ambientales identificadas como causantes de exposición, las rutas potenciales de exposición, las poblaciones en riesgo y las características peligrosas de las sustancias.

El personal que maneja materiales y residuos peligrosos, ya sea en su transportación, almacenamiento, tratamiento o eliminación, está en mayor riesgo. Para prevenir la exposición del personal a estos materiales y residuos peligrosos, ya sea por inhalación, ingestión o absorción por la piel (a través de lesiones en la piel o por salpicadura en los ojos), se deben implantar programas de seguridad con medidas de protección. Como primer paso para el manejo adecuado de estos programas de seguridad, deberán cubrirse los siguientes aspectos: información, entrenamiento, organización en el trabajo, protección personal, higiene personal, vigilancia médica y monitoreo ambiental. De estos puntos destacan:

Información: A todo el personal se le debe informar de los riesgos relacionados con los diferentes residuos, junto con las medidas que deben ser tomadas cuando ocurra la exposición. El personal debe estar consiente de las consecuencias de no seguir los procedimientos de seguridad indicados.

Entrenamiento: El personal que entre en contacto con materiales y residuos peligrosos deberá recibir entrenamiento en el manejo de los mismos por parte de personal capacitado. También se les darán por escrito las instrucciones claras de los procedimientos normales, las medidas de seguridad y las acciones que deberán tomarse en caso de algún accidente.

Protección personal: El personal debe estar protegido de la inhalación de gases o polvos tóxicos por equipos de respiración adecuados. La protección de ojos y piel puede darse con lentes y ropa adecuada.

Vigilancia médica: Todo el personal que trabaje con materiales y residuos peligrosos debe estar bajo vigilancia médica y se les deberá practicar con regularidad un análisis clínico, para determinar los niveles de contaminantes en la sangre y chequeos detallados de hígado, riñones, pulmones y corazón.

Monitoreo ambiental: Cuando se manejan ciertos materiales y residuos peligrosos, es deseable monitorear el ambiente laboral con alguna periodicidad, con el fin de asegurar que no se alcancen niveles peligrosos de los contaminantes en el ambiente.

El segundo paso a seguir es plantear las alternativas de confinamiento temporal, tratamiento, uso o confinamiento final de los materiales y residuos peligrosos. Estas alternativas son diversas. Son recomendables las siguientes operaciones tentativas

para el tratamiento integral de los residuos peligrosos.

- La utilización de desechos ácidos y alcalinos para neutralizarse entre sí.
- La utilización de desechos oxidantes para tratar cianuros y contaminantes orgánicos
- La utilización de materiales orgánicos separados del agua y lodos usados como combustible para incineradores y calderas de vapor.
- La utilización de iones metálicos para formar flóculos en procesos de precipitación.
- La utilización de ácidos para romper emulsiones.
- La utilización de algunos residuos para enriquecimiento energético de combustibles.

A continuación se presenta una breve descripción de las principales tecnologías utilizadas para el tratamiento de residuos peligrosos, y que pueden ser consideradas como alternativas viables para el tratamiento de los recortes de perforación de Pemex Exploración y Producción.

Pretratamiento para la separación de fases líquido-sólido: La sedimentación es el proceso que utiliza la fuerza de gravedad, en el cual las partículas de mayor peso van al fondo de un tanque, y son recolectadas para separarlas del fluido en suspensión. Para el caso particular que nos atañe, este proceso es importante, ya que muchas de las aguas de proceso o los recortes impregnados con fluido o con agua, después de lavar el hoyo, presentan esta fase de líquido-sólido; y para dar el tratamiento idóneo es necesario que se separen las fases de los diferentes residuos para tratarlas

adecuadamente.

Lavado de suelos: Este proceso se desarrolla in situ, y es la forma de extraer compuestos inorgánicos y/o orgánicos del suelo, donde se utilizan diferentes solventes en un proceso de inyección-recirculación. Esto sería útil para los recortes de perforación y para el tratamiento a suelos contaminados por hidrocarburos o por los fluidos de perforación.

Separación avanzada: Existen tres tipos de separación y estas son: separación entre líquidos, separación líquido-gas, destilación y evaporación. De esta última, la precipitación química representa una alternativa, ya que un ajuste de pH o de adición de reactivos, hace que los constituyentes contaminantes tengan mayor solubilidad y sean más fáciles de diluir o eliminar.

Destrucción y/o neutralización: La pirólisis es el proceso por el cual, a través de una descomposición química de los residuos mediante la aplicación de calor en ausencia de oxígeno, ya sea utilizando combustible en un quemador o mediante resistencias eléctricas, se calientan los residuos para separar los compuestos volátiles (gases combustibles, vapor de agua, etc.) de las cenizas (metales y sales), y posteriormente sean pasados a otra cámara, donde los compuestos orgánicos sean quemados bajo condiciones apropiadas de temperatura, tiempo y turbulencia, hasta destruir cualquier remanente peligroso. Dentro de este proceso existe un paso más, que es el de fijación-estabilización, el cual propone que después de realizar pirólisis, los desechos de esta mezcla y suelos contaminados se les adicione materiales sílicos combinados con agentes que favorezcan la cementación (cal, yeso o cemento) hasta

que se obtenga un sólido estabilizado.

Finalmente, es necesario considerar que:

1. La instalación de un sistema integral de tratamiento de residuos peligrosos requiere una cuidadosa selección de la ubicación de la planta, de tal forma que cumpla con los requisitos de sitio para disposición de residuos peligrosos (NOM-054-ECOL-19943), pero que no esté muy alejada de los centros industriales, y se tengan suficientes vías de comunicación.
2. Deberá existir un cuidadoso programa para atender contingencias y prevenir accidentes, que se fundamente en auditorías ambientales.
3. Deberán realizarse monitoreos estrictos de descargas, desechos, emisiones, etc., de los residuos peligrosos.
4. El personal que labore en el sistema deberá reunir los más altos niveles de capacitación en las funciones por desempeñar, además de contar con la capacitación permanente para el manejo de residuos y del equipo que se requiere, debido a la rapidez de cambios tecnológicos, tanto en la generación de residuos como en los equipos y técnicas de tratamiento, manejo y control de residuos peligrosos.
5. Deberá existir un sistema de higiene laboral y seguridad para el personal (que considere también al transportista que traslada e ingresa los residuos, el que descarga, el que opera los procesos de tratamiento), que asegure la mínima exposición del personal al residuo peligroso y, por lo tanto, su protección y salud en el ambiente laboral.

3.6. Conclusiones de los análisis CRETIB

Después de efectuar los análisis CRETIB a 14 muestras de fluidos y recortes de perforación, y determinar que éstos, aunque están clasificados como residuos peligrosos, en las muestras analizadas *los contaminantes presentes no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-052-ECOL-1994*. Se observó que *no presentan las características extremas de los residuos peligrosos* en los rubros de: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad al ambiente, inflamabilidad y biológico infeccioso; pero es innegable el efecto negativo de éstos al medio natural, como consecuencia de su composición, concentración y volumen.

El efecto negativo más conspicuo se observa sobre la salud humana, como consecuencia de la exposición permanente a estos materiales y residuos peligrosos.

Entre los compuestos más peligrosos, encontramos los compuestos aromáticos, hidrocarburos lineales y compuestos semivolátiles. Entre los compuestos aromáticos tenemos al m,p xileno, o-xileno, tetracloruro de carbono, bromoclorometano, cloruro de metileno y acetona. Estos compuestos, aunque se encuentran reportados en los análisis CRETIB como dato complementario, no fueron cuantificados con exactitud, por lo que no fue posible hacer la evaluación correspondiente con respecto al análisis comparativo con normas, con lo cual conoceríamos exactamente en cuánto rebasan o no las normas que regulan la exposición a este tipo de contaminantes; sin embargo, no era esta la finalidad de los análisis.

Con referencia a los compuestos volátiles, los cuales pueden mantenerse en cierta proporción en algún sustrato (como el suelo) o bien evaporarse y/o mantenerse

suspendidos en la atmósfera, es factible encontrar trazas de ellos en los recortes de perforación mediante los análisis CRETIB. Los compuestos volátiles encontrados son: 2 fluorofenol, fenol, biclorobenceno, nitrobenceno, naftaleno, fluorobifenilo, tribromofenol, fenantreno y terfenilo D14; los cuales, en la mayoría de las muestras rebasan los límites máximos permisibles para exposiciones a concentraciones ponderadas de tiempo (8 horas), y considerando que la gran mayoría de estos compuestos están reportados como carcinógenos potenciales, es de relevante importancia considerar la protección inmediata del personal que tiene contacto directo con ellos.

Con referencia a los aspectos ambientales, deberán considerarse los factores geohidrológicos, hidrológicos, ecológicos, climáticos, poblacionales, topográficos y de acceso, en la planeación de un sistema de tratamiento integral de residuos peligrosos para conservar el ambiente.

4. Pruebas de destrucción térmica de recortes de perforación y sólidos impregnados con aceites y grasas

4.1. Gestiones gubernamentales

Esta es una de las etapas más importantes para probar la factibilidad técnica del proceso alterno propuesto, el cual permitirá eliminar el problema ambiental de los recortes y fluidos de perforación en la industria petrolera. Para su realización se contó con el apoyo de los directivos de la planta Macuspana de Cementos Apasco, quienes gestionaron ante la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, del Instituto Nacional de Ecología, la autorización correspondiente para la disposición térmica de lodos impregnados con combustibles líquidos, llamados "recortes de perforación base aceite".

La dependencia gubernamental expidió su autorización para efectuar protocolo de prueba durante dos meses, de acuerdo con lo establecido en el Artículo 4°, Fracción IV, del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de residuos peligrosos, debiendo cumplir con las condiciones enunciadas a continuación:

1. Cementos Apasco deberá presentar un programa calendarizado de incineración, en el que se indiquen las cantidades diarias, tipo de residuo y el porcentaje que representa del volumen diario de combustible total empleado.

2. Cementos Apasco podrá sustituir, como máximo, el 30% del combustible normalmente empleado.
3. Cementos Apasco deberá enviar a esta Dirección general el resultado de sus emisiones antes y después de alimentar los combustibles alternos al horno. Los parámetros que deberá medir diariamente son de NO_x, CO₂, CO, O₂, HCl, HCl, SO_x, opacidad, y un análisis de metales, determinando: Cd, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn y Ni. Los análisis deberán estar referidos a una atmósfera de presión, 25 °C de temperatura, base seca y 7% de oxígeno. Las mediciones antes mencionadas deberán ser efectuadas por laboratorios acreditados ante el Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Pruebas (SINALP). Asimismo, deberá presentar ante esta Dirección General, al término del período de pruebas, la bitácora del protocolo debidamente avalado por un órgano colegiado o institución de investigación que tenga la facultad de certificar en todos los sentidos dichos resultados, así como el procedimiento empleado durante las pruebas.
4. Cementos Apasco no podrá incorporar residuos peligrosos contaminados con bifenilos policlorados, ni con compuestos órgano-hexaclorados.
5. Cementos Apasco deberá presentar a consideración de esta Dirección General, en un plazo de 30 días contados a partir de la fecha de recepción del presente oficio, un Programa Integral de Medidas de Seguridad, el cual incluya:
 - a) Programa de mantenimiento preventivo del equipo de control de emisiones a la atmósfera.

- b) Programa calendarizado de capacitación al personal en materia de seguridad, en el uso de equipos y dispositivos para el manejo de residuos peligrosos, así como en la prevención y control de posibles contingencias.
 - c) Medidas y dispositivos de seguridad que se emplearán en el manejo de residuos peligrosos.
 - d) Procedimiento de respuesta a contingencias que resulten, motivo de la actividad del manejo de los residuos peligrosos.
6. Cementos Apasco deberá efectuar un análisis por separado, a los residuos que se emplearán como combustible alternativo para determinar metales pesados, humedad, poder calorífico, y entregar los resultados a esta Dirección General al finalizar el protocolo de prueba.

Una vez cubiertos todos los requisitos establecidos por la autoridad competente, se procedió a realizar las pruebas de incineración de los recortes de perforación base aceite. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente protocolo de pruebas.

4.2. Objetivo

Este protocolo de pruebas tiene por objeto cumplir lo establecido en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en Materia de Residuos Peligrosos, en su artículo 4º, fracción IV, en la planta del Grupo Cementos Apasco S. A., de C. V., planta Macuspana, realizando el monitoreo de emisiones de

NO_x, CO₂, CO, O₂, HCl, HCl, SO_x, y opacidad, efectuando la determinación analítica de metales en polvo de Cd, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn y Ni, provenientes de la chimenea del horno de fabricación de cemento, antes y durante la incorporación de "recortes de perforación de pozos petroleros" y "sólidos como estopas, guantes, trapos, papel, plásticos, cartón, mascarillas, filtros y aserrín impregnados con combustibles líquidos como aceites, grasas y solventes", determinando a estos residuos metales pesados, humedad y poder calorífico, de acuerdo con la solicitud de prueba No. VU-132-MRP-1996, Autorización No. DOO. 800/5179 y aviso de pruebas del 14.08.97.

Lo anterior, con base en que la disposición de residuos en hornos de cemento ha sido reconocida como una de las mejores tecnologías para su destrucción, sin la creación de problemas ambientales adicionales; ya que actualmente algunas plantas cementeras en los Estados Unidos, Europa y desde 1994 en México, están utilizando esta tecnología de disposición de residuos, ofreciendo una solución al incremento de la demanda del tratamiento de residuos en México.

4.3. Antecedentes

La planta de Macuspana es parte del Grupo Apasco, junto con las plantas en Orizaba, Ver.; Apaxco, Edo. de México; Ramos Arizpe; Coah.; Acapulco, Gro. y Tecomán, Col. La planta de Macuspana inició su operación el 10 de febrero de 1982 y está ubicada en la carretera Villahermosa-Escárcega km 68.5, en el municipio de Macuspana, en el estado de Tabasco. Esta planta produce básicamente dos tipos de

cemento: tipo IP y clase H.

Cementos Apasco ha formado la compañía ECOLTEC, con el propósito de manejar, transportar, formular y almacenar residuos peligrosos susceptibles de ser destruidos térmicamente en los hornos de cemento.

Esta empresa del Grupo Apasco, responsable del protocolo de pruebas, en reunión del 10 de julio de 1997, presentó a la Coordinación de Tecnología Ambiental del IMP la relación de parámetros a evaluar: emisiones de chimenea, NO_x, CO₂, CO, O₂, HCl, HCl, SO₂, opacidad y PST; y metales Cd, Tl, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn y Ni, en molienda de crudo, alimentación al horno, polvo etapa IV, polvo etapa II, polvo electrofiltro, clinker, emisiones chimenea, cemento, recorte base aceite y sólidos impregnados. A estos dos últimos, determinar adicionalmente humedad y poder calorífico. Asimismo, durante las pruebas se solicitó incluir Cl₂ y metales en gases de salida.

El desarrollo de las pruebas de incorporación de los residuos, se efectuó con la participación de ECOLTEC del Grupo Apasco (EC), la Coordinación de Tecnología Ambiental del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), a través de sus laboratorios móviles de monitoreo de emisiones contaminantes en fuentes fijas, y la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco (UAM-AZC), participando como órgano colegiado de certificación.

4.4. Proceso de fabricación del cemento

La tecnología de fabricación de clinker es soportada por el grupo HOLDERBANK, como un proceso seco. La tecnología de control de proceso está basada en un sistema de control distribuido, operado por un "sistema experto", herramientas de tecnología de punta para el control de los procesos.

La planta Macuspana del Grupo APASCO produce básicamente dos tipos de cemento: tipo IP y clase H. El proceso general para la producción de cemento se encuentra seccionado por áreas, las cuales pueden ser, en un momento dado, independientes unas de otras (**Fig. 2** del Apéndice A). Las áreas desde extracción de materias primas hasta el envasado del producto son: extracción, trituración, molienda de crudo y fabricación de clinker.

Extracción. Para la producción de cemento se utilizan dos materias primas principales: caliza y arcilla. La planta cuenta con dos canteras de caliza y bancos de arcilla. La piedra caliza por su naturaleza es extraída de la cantera por explosivos para posteriormente alimentarla a la trituradora, a un tamaño promedio de $1/2 \text{ m}^3$ junto con la arcilla.

La arcilla es un material más suave y con mayor humedad, por lo cual se extrae con palas mecánicas y se combina con la caliza en una relación aproximada de 80% caliza y 20% arcilla, y se alimentan juntas a la quebradora.

Trituración. El material extraído de la cantera y la arcilla son transportados por camiones hasta la trituradora, el material que sale de la trituradora con un tamaño no mayor de 1 pulgada. (máximo 5% de retenido en la malla de 1-1/2 pulgadas), es transportado por un grupo de bandas hasta el patio de prehomogeneización, donde se apila el material de una manera longitudinal con una estructura a dos aguas (método Chevron) por medio de una pluma (apilador) que se mueve a lo largo del lecho.

Molienda de crudo. La mezcla de caliza y arcilla es recuperada del patio de prehomogeneización y alimentada al molino de crudo, donde el material es secado y molido por medio de bolas de acero especial hasta obtener un material fino llamado harina cruda. Se cuenta con dos silos para almacenar la harina cruda, contando éstos con un sistema de homogeneización.

Fabricación de clinker. La harina cruda almacenada en los silos es recuperada y alimentada al precalentador, el cual cuenta con cuatro etapas con un precalcinador. El material crudo es alimentado en la parte superior del precalentador, iniciándose de esta manera la transferencia de calor y preparación del material para su alimentación al horno rotatorio. Después de pasar el material por la última etapa, entra por la cuchara del horno a una temperatura aproximada de 980 °C, para posteriormente continuar dentro del horno pasando por las etapas de calcinación, transición y sintetización, alcanzándose en esta última etapa temperaturas alrededor de 1,450 °C, para transformarse finalmente en clinker.

Cabe señalar que en la etapa cuatro del precalentador del horno, se cuenta con un precalcinador constituido por quemadores secundarios, cuya función es ayudar al proceso de descarbonatación de la harina cruda, siendo en este punto en donde se alimentaron los residuos de recortes de perforación en forma semiautomática y los sólidos impregnados en forma manual a través de bolsas.

Los gases de combustión del quemador principal dentro del horno y del precalcinador, después de pasar por el precalentador son aprovechados para secar la materia prima dentro del proceso de la molienda del material crudo, siendo después llevados a un sistema de despolvamiento de gases para su limpieza, antes de ser descargados a la atmósfera. El polvo recuperado por estos sistemas es retornado a la alimentación del horno.

Datos técnicos de hornos:

Tipo de horno:	Rotatorio de Proceso vía Seca.
Combustible:	Gas Natural.
Consumo calorífico:	3,250 kiloJoule por kilogramo de clinker
Alimentación:	2,000 - 5,000 toneladas de crudo por día.
Producción:	1,300 - 3,000 toneladas de clinker por día.
Dimensiones:	Largo 58 metros con un diámetro de 4.1 metros.
Tipo de precalentador:	Cuatro etapas con precalcinador integrado.
Tipo de enfriador:	Parrillas.

Molienda de cemento. El clinker es recuperado de los silos y pulverizado en un molino de bolas junto con yeso. Para cada tipo de cemento (Tipo IP y Clase H) se utiliza clinker con diferente mineralogía. Para la producción del cemento tipo IP, en esta etapa se le adiciona puzolana natural. El cemento producido es almacenado en silos.

Envase y despacho. El cemento, de acuerdo con los requerimientos del cliente, es recuperado de los silos y despachado para venta en furgones de ferrocarril o camiones, en sacos o granel. El envase cuenta con dos líneas para despacho a granel (tolvas camiones y tolvas ferrocarril), al igual que dos líneas envasadoras. En ésta se utilizan dos equipos para carga automática en camiones llamados Caricamat, una línea para carga normal en camiones y dos líneas para carga de sacos en ferrocarril.

Parámetros de operación y control. Para asegurar la operación del sistema existen "interlocks" que detienen automáticamente la alimentación de los residuos, tales como:

- Paro del ventilador principal del horno.
- Paro del giro del horno
- Paro del combustible tradicional
- Caída de tensión en electrofiltro
- Mayor de 1.0 % de gases, antes del electrofiltro
- Temperatura de etapa IV, mayor a 950 °C

Parámetros de operación. La operación del horno fue supervisada de acuerdo con

los parámetros normales expuestos en la siguiente tabla:

Parámetros	Horno
Consumo calorífico del horno (kj/kg clinker)	3,250
Velocidad del horno (rpm)	2.9
Carga de los motores principales (amp)	338
Temperatura de los gases de salida del precalentador (°C)	361
Presión entrada del horno (mbar)	-4
Temperatura de la zona de calcinación (°C)	1,450
Peso volumétrico del clinker (g/L)	1,250
Cal libre de clinker (%)	1.2
Temperatura de entrada al electrofiltro (°C)	120

Parámetros de control. Los parámetros de control estuvieron soportados con el sistema de control experto llamado "LINKMAN".

Los monitoreos y tomas de muestras se realizaron los días 20 y 23 de agosto de 1997 con los laboratorios móviles de monitoreo de emisiones contaminantes en fuentes fijas del IMP.

4.5. Métodos y procedimientos de muestreo y análisis

Los muestreos y determinaciones analíticas se realizaron conforme a las normas oficiales mexicanas y métodos de la EPA de referencia:

1. NOM-AA-9-1973: Determinación de flujo de gases por medio del Tubo Pitot.
2. NOM-AA-54-1978: Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un ducto.
3. NOM-085-ECOL-1994: Norma oficial mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

4. NOM-040-ECOL-1993: Norma oficial mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas, provenientes de las fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento.
5. DGN-AA-1-1972: Norma mexicana de método de prueba para determinar la densidad aparente visual del humo empleando la carta de Ringelmann (fuentes estacionarias).
6. EPA-Método 1: Determinación del sitio de muestreo y velocidad de los gases de chimenea provenientes de fuentes fijas. Code of Federal Regulation, Title 40, Part. 60, App. A, pag. 348.
7. EPA Método 2: Determinación de la velocidad de gases de chimenea y flujo volumétrico (tubo Pitot tipo S). Code of Federal Regulation, Title 40, Protection of Environmental Part 60, App. A, pag. 354-372.
8. EPA-Método 3: Análisis de gas para bióxido de carbono, oxígeno, monóxido de carbono, exceso de aire y peso molecular. Code of Federal Regulation, Title 40, Protección of Environmental, pag. 60, App. A, pag.372.
9. EPA-Método 3A: Determinación de las concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono en emisiones provenientes de fuentes fijas. Protection of Environmental, Part 60, App. A, pag. 372 (Procedimiento de analizador instrumental).
10. EPA-Método 4: Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea. Federal Register, Vol. 36, No. 247, Diciembre de 1971.
11. EPA-Método 5: Determinación de la emisión de partículas provenientes de fuentes fijas. Title 40, Protection of Environmental, Part 60, App A, Pag. 387.

12. EPA-Método 6C: Determinación de las emisiones de bióxido de azufre provenientes de fuentes fijas (procedimiento de analizador instrumental).
13. EPA-Método 7E: Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes de fuentes fijas (procedimiento de analizador instrumental).
14. EPA-Método 10: Determinación de las emisiones de monóxido de carbono provenientes de fuentes fijas (procedimiento de analizador instrumental).
15. EPA-Método 29: Determinación de metales en sólidos y en emisiones gaseosas de fuentes estacionarias.
16. Método SW-486 Modificado (3050A): Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.
17. Método SW-416 Modificado (3020): Digestión ácida de muestras acuosas y extractos para metales totales por espectroscopía de absorción atómica.
18. Método ASTM-D-240: Determinación de poder calorífico bruto.
19. NOM-AA-070-1980: Determinación de cloro y/o cloruros en los gases que fluyen por un conducto.

4.6. Desarrollo del monitoreo

A) Puertos y plataformas. El trabajo de monitoreo isocinético y de emisiones contaminantes provenientes de la chimenea del horno de fabricación de cemento, se llevó a cabo con el apoyo del personal de la planta Macuspana de Cementos Apasco. El monitoreo se realizó en una plataforma fija que permitió el acceso a los puertos de muestreo colocados a 66.5 metros, cumpliendo con el criterio de

estar a una distancia mayor a 8 veces el diámetro interno de la chimenea (3.0 metros), después de la última perturbación de flujo, en la cual se colocó el equipo necesario junto con el personal, con el fin de alcanzar la altura y posición de los puertos de muestreo.

B) Análisis de emisiones. Para efectuar la caracterización de las emisiones por uno de los puertos de muestreo, se colocó una sonda de 90 m de longitud de teflón TFE, con una resistencia eléctrica en espiral cubriendo toda la longitud de la misma y debidamente aislada, con el fin de mantener la temperatura de los gases a 110 °C y prevenir condensaciones de los gases en su trayectoria. A través de esta sonda circula la muestra extraída de la chimenea, para conducirla al laboratorio móvil donde es distribuida a los equipos analizadores para determinar la concentración de cada contaminante.

C) Monitoreo isocinético. Por el otro puerto de muestreo, colocado a 90 grados con respecto al anterior se efectúa el monitoreo isocinético, introduciendo una sonda con un tubo Pitot tipo "S", un termopar bimetálico y boquilla para realizar la determinación en condiciones isocinéticas de flujo volumétrico, humedad, temperatura y concentración de partículas; el muestreo isocinético se efectúa por ambos puertos de muestreo con el objeto de que sea representativo.

Siguiendo los lineamientos marcados por el INE en su instructivo para la instalación de puertos y plataformas (F-CCAT-001), y de acuerdo a la ubicación de los puertos de muestreo para lograr un monitoreo representativo, se maestrearón en ambos puertos 6 puntos para la chimenea del horno de

fabricación de cemento.

Se incorporaron 3 y 6 Ton/h de recortes de perforación los días 20 y 21 de agosto de 1997, respectivamente, mientras que el día 22 se incorporaron 0.096 Ton/hr de sólidos impregnados para su destrucción térmica, y el 23, sin la incorporación de ningún tipo de residuo, realizándose un monitoreo isocinético por día.

D) Muestreo de sólidos. Los muestreos para la determinación de metales y cloro en gases de salida, se realizaron del 20 al 23 de agosto de 1997 durante el desarrollo de 6 monitoreos isocinéticos definitivos, habiéndose obtenido un total de 12 muestras compuestas (soluciones de $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ y $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$) y 6 muestras simples (filtros), cuya toma, mezcla, homogeneización y preservación fue realizado por personal del IMP. Cada muestra obtenida se proporcionó al laboratorio central del IMP-sede, para efectuar los análisis correspondientes.

Los muestreos para determinación de metales y cloro en muestras sólidas, se realizaron del 20 al 23 de agosto de 1997, habiéndose obtenido un total de 24 muestras compuestas, cuya toma, mezcla, homogeneización y cuarteo fue realizado por el personal del laboratorio de la planta Macuspana. De cada muestra compuesta obtenida se proporcionó al IMP una fracción de 500 gr. aproximadamente para efectuar el análisis en laboratorio central del IMP-sede, conservando en la planta 2 muestras, una como testigo y la otra como una posible tercera, en caso de ser necesario.

Los muestreos para determinación de metales y cloro en cemento, recorte base

aceite y sólidos impregnados, se realizaron del 23 al 24 de agosto de 1997, habiéndose obtenido un total de 3 muestras compuestas, cuya toma, mezcla, homogeneización y cuarteo fue realizado por el personal de laboratorio de la planta Macuspana. De cada muestra compuesta obtenida se proporcionó al IMP una fracción de 500 g aproximadamente para efectuar análisis en el laboratorio central IMP-sede.

La obtención de muestras para determinación de metales Cd, Tl, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn y Ni, se realizó mediante la condensación del gas en los impactores números 2 y 3, empleando una solución de $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$.

La obtención de muestras para determinación de Hg se realizó mediante la condensación del gas en los impactores 5 y 6, empleando una solución de KMnO_2 .

E) Determinaciones analíticas. Las determinaciones analíticas fueron realizadas del 27 al 12 de septiembre de 1997 en el laboratorio central del IMP-sede, efectuándose un total de 507 determinaciones de metales, 45 análisis de cloro, 2 pruebas de poder calorífico y 2 determinaciones de % de humedad, para un gran total de 556 determinaciones analíticas efectuadas.

4.7. Equipos utilizados

Los equipos utilizados para la realización del monitoreo de emisiones contaminantes provenientes de la chimenea del horno de fabricación de cemento, planta Macuspana de Cementos Apasco, S.A. de C.V., son los siguientes:

- 1. Muestreador de chimeneas.** Para la determinación de flujo volumétrico, partículas, humedad y temperatura de los gases de chimenea. Para la determinación de la concentración de partículas totales se emplean filtros de fibra de vidrio. La medición indirecta del flujo de gases emitidos se efectúa con un tubo Pitot tipo S y un manómetro inclinado de precisión. La determinación de humedad es por medio de la condensación del gas en impactores con baño de hielo. Se emplea un termopar bimetálico para la medición de la temperatura de los gases de combustión. Este equipo cumple con los métodos 2 y 5 de la EPA.
- 2. Analizador de bióxido de azufre.** El principio de operación de este equipo, es la detección óptica de la fluorescencia emitida por las moléculas de bióxido de azufre, al ser excitadas por luz ultravioleta pulsante (fluorescencia pulsada). Este equipo cumple con el método 6C de la EPA.
- 3. Analizador de óxidos de nitrógeno para fuentes fijas.** El principio de operación de este equipo es la detección óptica de la luminiscencia derivada de la reacción química entre óxido nítrico y ozono (quimiluminiscencia). Este equipo cumple con el método 7E de la EPA.
- 4. Analizador de monóxido de carbono.** El principio de operación de este equipo es la detección de la luz infrarroja filtrada a través de dos celdas, una de referencia y otra de monóxido de carbono, que se hace pasar posteriormente por la muestra de gas a analizar (correlación de filtrado de gas utilizando luz infrarroja). Este equipo cumple con el método 10 de la EPA.
- 5. Analizador de bióxido de carbono.** El principio de operación es similar al del

equipo de monóxido de carbono (filtrado de luz infrarroja). Este equipo cumple con el método 3A de la EPA.

6. Analizador de oxígeno. El principio de operación es la detección de la diferencia en conductividad eléctrica producida al hacer pasar los gases a través de una celda de óxido de circonio (conductividad eléctrica). Este equipo cumple con el método 3A de la EPA.

7. Sistema de dilución y acondicionamiento de muestra. Este sistema es utilizado para proveer las condiciones adecuadas para el buen funcionamiento de los analizadores. Regula la presión, temperatura, contenido de partículas y flujo de operación para cada uno de los analizadores. Cabe hacer mención que finalmente para estas determinaciones se analizó la muestra de gas en forma directa, sin dilución.

8. Calibrador dinámico. Este equipo está diseñado para efectuar la calibración de los equipos analizadores bajo régimen de flujo; cuenta con múltiples entradas para alimentarle gas patrón de concentración conocida, así como para aire cero. El equipo mide y regula por medios electrónicos el flujo de estos gases descargando la mezcla con una dilución ajustada por el operador.

9. Analizador de hidrocarburos totales para fuentes fijas. El principio de operación de este equipo es la detección de la conductividad eléctrica de moléculas de hidrocarburos que son ionizadas (Ionización de flama). Este equipo cumple con el método 25a de la EPA.

10. Analizador de ácido clorhídrico. El principio de operación de este equipo es la

detección de la luz infrarroja filtrada a través de dos celdas, una de referencia y otra de HCl, que se hace pasar posteriormente por la muestra de gas a analizar (infrarrojo).

11. Opacímetro Bosch EFAW86A. Este aparato mide la opacidad de una superficie mediante una celda fotoeléctrica. La intensidad de corriente registrada se envía a un puente de Wheatston para su amplificación a una carátula graduada de 0 a 100%. El aparato se calibra previamente con patrones blanco y negro.

El equipo utilizado para la realización de las determinaciones analíticas de metales, cloro, poder calorífico y porcentaje de humedad en las 45 muestras obtenidas durante el protocolo de pruebas en la planta Macuspana de Cementos Apasco, S.A. de C.V., es el siguiente:

12. Espectrómetro de absorción atómica. Consta de un nebulizador, cámara de combustión, sistema de regulación de flujos de gas oxidante combustible para la flama, lámpara de descarga sin electrodo, específica para cada elemento, sistema óptico de doble haz y sistema automatizado de lectura (espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelos 2380 y 5000; espectrofotómetro de absorción atómica Varían, modelo Spectra 20 Plus); sistema para análisis de mercurio y sistema formador de hidruros para arsénico y selenio.

4.8. Resumen de datos de muestreo

Debido a que la información estadística recopilada durante el monitoreo de emisiones a la atmósfera y los análisis de laboratorio efectuados en la planta Macuspana, es abundante y requiere de un formato especial, hemos decidido concentrarla en las tablas que se presentan en el **Apéndice A** de este documento.

La **Tabla 1** describe la alimentación de harina cruda y las producciones del horno de fabricación de clinker y los diferentes eventos con y sin residuos, este último denominado "blanco".

La **Tabla 2** presenta la concentración promedio de emisiones de NO_x , SO_2 , CO , HCl y HCl , expresadas en partes por millón, y de CO_2 , y O_2 , expresados en porcentaje, así como la opacidad de cada monitoreo en porcentaje, y los mg/Nm^3 de partículas, comparadas con la norma oficial mexicana NOM-040-ECOL-1993.

La **Tabla 3** se presenta las concentraciones promedio de emisiones contaminantes registradas por los analizadores durante el monitoreo, corregidas al 7% de oxígeno, base seca, referidas a 760 mmHg y 25°C.

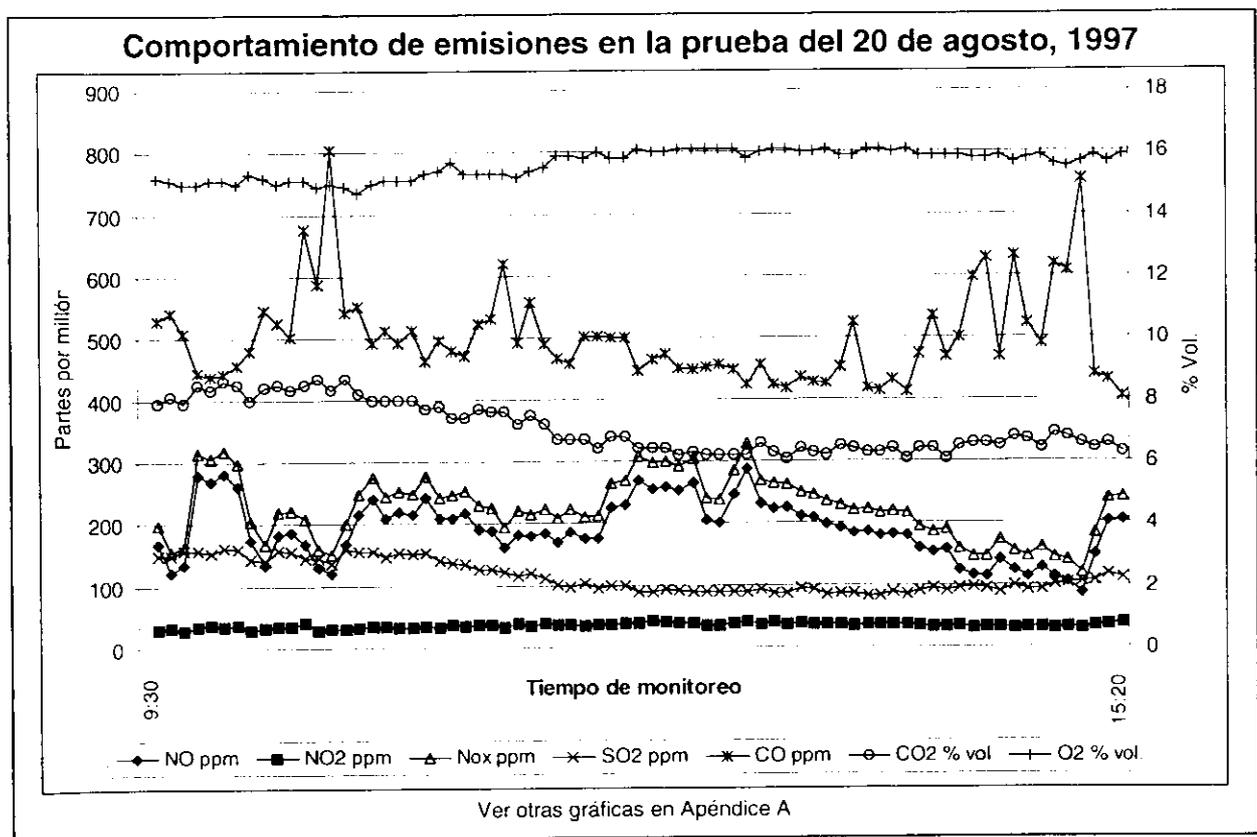
La **Tabla 4** presenta los tipos de muestreo y las determinaciones de metales de las 45 muestras obtenidas durante los días de prueba.

La **Tabla 5** presenta los resultados analíticos de cadmio (Cd), mercurio (Hg), antimonio (Sb), arsénico (As), plomo (Pb) cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), selenio (Se) y manganeso (Mn), vanadio (V), estaño (Sn), Níquel (Ni), y cloro de las 45 muestras obtenidas durante los días de prueba.

La **Tabla 6** presenta los mismos resultados que el cuadro 5, pero con la información clasificada por evento.

En la **Tabla 7** se muestran los resultados de los análisis químicos efectuados en el laboratorio de la planta Macuspana de Cementos Apasco.

Finalmente, la **Tabla 8** presenta las características de los lodos alimentados al horno durante las pruebas.



4.9. Análisis de resultados

4.9.1. Emisión de gases de chimenea

La **Tabla 2** presenta la concentración promedio de emisiones contaminantes (NO_x , SO_2 , CO, HCl, HCl, expresadas en partes por millón, y CO_2 , O_2 , expresados en porcentaje, así como el porcentaje de opacidad y partículas en mg/m^3 y kg/h) detectadas por los analizadores en el transcurso del monitoreo, generadas por la chimenea, en cada monitoreo.

En la **Tabla 3** se observan los mismos resultados de la **Tabla 2** corregidos a 7% de O_2 , base seca, 760 mmHg, y 25 °C, a diferentes condiciones de operación. De éstos, tenemos los resultados siguientes:

Oxidos de nitrógeno(NO_x): Para el caso de los óxidos de nitrógeno (NO_2), el valor máximo de 589.9 ppm se dio con la alimentación de 3 ton/h, y el valor mínimo con 6 ton/h del recorte de perforación. Esto quería decir que entre más se alimente de recorte, el NO_x tiende a reducirse; sin embargo, esto no se puede precisar. Con 6 ton/h de recorte se observaron fluctuaciones de CO durante la operación, y éste se comporta inversamente al NO_x . No obstante, el CO corregido es menor.

Bióxidos de azufre (SO_2): Para el caso de los óxidos de azufre, se cumple la relación de tener el mínimo valor de 294.57 ppm con la mayor cantidad de O_2 . El máximo valor de 406.83 resultó durante la alimentación de los sólidos impregnados. Estas concentraciones no resultan preocupantes dentro del balance global ambiental.

Bióxido de carbono (CO): Los valores mínimos de CO, de 500.79 ppm, en la **Tabla 2** sin corregir con el O₂, resultaron con 3 ton/h de recorte y los máximos, de 949.8 ppm, durante la prueba del blanco. Estos valores sin corregir obviamente guardan una relación con el O₂. Una vez corregidas las cifras en la **Tabla 3**, se invierten los máximos (1,368.1 ppm en el blanco y 1,287.4 ppm durante la alimentación de 6 ton/h del recorte). Estos resultados del CO son los promedios durante la operación normal.

Hidrocarburos totales (HCt base metano): En este caso, la máxima concentración (151 ppm) se dio también con 3 ton/h, y en blanco la mínima fue de 41.19 ppm. Independientemente de que se pueda deber a variaciones dentro del proceso de operación, sí observamos una mayor concentración de éstos agregando los recortes de perforación. No obstante, se reduce (de 151 a 107 ppm) en un 30% la emisión del HCt, al alimentar 6 ton/h del recorte.

Acido clorhídrico (HCl): Las concentraciones registradas durante los cuatro días de monitoreo, se mantuvieron por abajo de 1 ppm durante todos los eventos. Debido a estas bajas concentraciones, sería muy atrevido sacar una conclusión. El máximo valor (0.7963 ppm) se obtuvo con los sólidos impregnados, y el mínimo (0.1377 ppm) con la alimentación de 3 Ton/hr de recortes de perforación.

Bióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂): Los porcentajes obtenidos de bióxido de carbono se observan muy variables en la **Tabla 2**. Van desde 7.09 % con 3 ton/h de recorte, hasta 14.11 % en la prueba en blanco. Observando los valores de O₂, éstos se comportan en forma inversa, de tal forma que una vez que tenemos los valores de CO₂ corregidos al 7%, la fluctuación va de 18.4% en la prueba de 3 ton/h, hasta 20.3% en

blanco. Estas cifras son las variaciones que pueden observarse durante la operación normal, y básicamente su origen es la descarbonatación de las materias primas.

En la **Tabla 3** se observa que la mayor cantidad de O_2 se presenta al agregar los recortes de perforación, lo que fue una situación prevista para ayudar en la combustión, sin provocar mayores pérdidas de calor por el incremento de las temperaturas en los gases de escape. Este incremento puede explicarse también como efecto de la apertura del horno para la incorporación de los recortes.

Opacidad. El porcentaje de opacidad observado durante los muestreos isocinéticos fue muy similar en todos los casos, oscilando entre 2 y 3%.

Partículas suspendidas totales (PST). La emisión de partículas durante los monitoreos isocinéticos se mantuvo en un rango de 12.2 kg/h en blanco, hasta 18.2 kg/h con incorporación de 6 ton/h de recortes, siendo inferior al valor de la NOM-040-ECOL-1993, que va desde 41.19 kg/h hasta 43.88 kg/h.

El límite máximo de la norma se calculó en base a la fórmula $0.6319 (C) 0.75O_2$ para procesos de calcinación menores a 300 toneladas por hora, en donde C es la cantidad de material alimentado a hornos de calcinación en toneladas por hora. Los flujos volumétricos que se obtuvieron después de los monitoreos isocinéticos, se mantuvieron en rangos muy similares, que van de 257,604.5 a 279,282.2 m³/h.

Los porcentajes de isocinetismo de todos los monitoreos isocinéticos se mantuvieron dentro del rango establecido por la norma, de 90 a 110%. Al final del Apéndice A se presentan las gráficas que muestran el comportamiento de emisiones durante los cuatro días de pruebas de incineración en la planta Macuspana de Cementos Apasco.

4.9.2. Emisión de metales en chimenea

Las concentraciones de metales (Cd, Hg, Sb, S, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn y Ni) mostradas en la **Tabla 6**, determinadas en las muestras tomadas de las chimeneas en los diferentes eventos, tanto en bases como en polvo y la suma de ambos, resultó en un rango despreciable. Vale aclarar que estas cifras son aun menores, pues una gran cantidad de valores son cifras límite de detección de los equipos de análisis.

Observando la **Tabla 6**, donde se muestran los mismos análisis de los metales pesados, en las diferentes etapas del proceso (molino de crudo, alimentación al horno, clinker, polvos de la etapa IV y II, polvos del filtro, recortes, sólidos impregnados y en cemento con lodo), las mayores concentraciones de todos los metales, independientemente del evento (con o sin recorte), se encuentran en clinker, cemento y polvos de la etapa IV. Estos últimos puntos son por donde se alimenta al horno. De lo dicho anteriormente, el mercurio es la excepción. Este metal lo encontramos en los polvos del filtro.

Con todo lo mencionado anteriormente, se comprueba y justifica la introducción de dichos residuos en cuestión, pues una vez que los metales pesados están en el "cemento-concreto", éstos no son solubles, quedando encapsulados, lo cual es el principal objetivo buscado.

Cadmio (Cd): En chimenea se tiene un valor de 1.013 ppm (0.0001 mg/m³) como máximo durante la adición de 3 ton/h de recorte. Los demás resultados son 1.010 ppm (0.0001 mg/m³). Por ser tan pequeña esta diferencia, es difícil concluir si realmente se debe a los recortes. Por otro lado, la mayor concentración (1.000 ppm) proviene de las

partículas, siendo este último valor el límite de detección del equipo; es decir, que podría ser menor el valor real.

Viendo las concentraciones en la **Tabla 6**, el recorte tiene 7.28 ppm , y en el proceso se encuentra en la etapa IV (9.7 ppm), última del precalentador que alimenta al horno.

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, clinker, polvo etapa II y polvo electrofiltro, presentan valores de 5.00 ppm o menores. Las determinadas en el polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 5.31 a 9.70 ppm, presentándose el más alto sin la adición de residuos.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tiene un intervalo de < 0.005 a 0.013 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos presentan valores de < 1.00 ppm en todos los casos.

Mercurio (Hg): La mayor concentración en chimenea se encuentra durante la introducción de sólidos impregnados, siendo de 3.8280 ppm (0.0002 mg/m³). En el proceso, el valor máximo se encontró en el polvo del filtro (0.49 ppm) durante la prueba en blanco.

Si se considera la suma de las máximas emisiones de Cd y Hg, independientemente de los eventos, se tiene 0.00023mg/m³, cifra bastante despreciable, así como la del recorte, de 1.45 ppm.

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, clinker, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen valores con un intervalo de <

0.02 a 0.38 ppm. Las determinadas en el polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 0.03 a 0.49 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen un intervalo de valores de 0.036 a 0.072 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 21 de agosto de 1997. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de 0.69 a 3.78 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Antimonio (Sb): En chimenea se tiene 3.34 ppm ($0.00023\text{mg}/\text{m}^3$, bastante despreciable), como valor máximo durante la adición de 6 ton/h de recorte. Los demás resultados son 3.34 ppm ($0.00016\text{ mg}/\text{m}^3$). Por ser tan pequeña esta diferencia, es difícil concluir si realmente se debe a los recortes, pues el valor máximo se tiene con los sólidos impregnados, de 1,000 ppm. Por otro lado, la mayor parte (3.000 ppm) proviene de las partículas, siendo este último el límite de detección del equipo; es decir, que podría ser menor el valor real.

En las concentraciones de la **Tabla 6**, los máximos resultados se encuentran en clinker (153 ppm), cemento (156.5 ppm) y etapa IV (157 ppm) que alimenta al horno.

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, clinker, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de 57.00 a 153.00 ppm. Las determinadas en el polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 105.19 a 157.06 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6

monitoreos isocinéticos tienen un intervalo de valores de < 0.10 a 0.34 ppm, presentándose el valor más alto antes y durante la adición de residuos los días 21, 22 y 23 de agosto de 1997. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos presenta valores de < 3.00 ppm en todos los casos.

Arsénico (As): El máximo valor en chimenea fue de 4.1005 ppm (0.00019 mg/m³, cifra bastante baja), durante la adición de los sólidos impregnados, cuando éstos tienen 0.05 ppm. Esta cifra resulta bastante despreciable. En el proceso, las máximas concentraciones se presentan en clinker (5.22 ppm) y cemento (5.03 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II, polvo etapa IV y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de 2.09 a 5.20 ppm. Las determinadas en el clinker tienen valores con un intervalo de 3.40 a 5.22 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores de < 0.0005 ppm en todos los casos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de 0.49 a 4.10 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Plomo (Pb): En máximo valor en chimenea fue de 95.63 ppm (0.0044 mg/m³), leído durante la adición de los sólidos impregnados, cuando éstos tienen 583.31 ppm. La emisión en blanco fue de 82.28 ppm (0.0037 mg/m³). Ambas cifras resultan bastante despreciables. En el proceso, las máximas las tenemos en clinker (69.18 ppm),

cemento (63.79 ppm) y etapa IV (85.03 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, clinker, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de 28.95 a 69.18 ppm. Las determinadas en el polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 53.09 a 85.03 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos el día 23 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen un intervalo de valores de < 0.01 a 0.07 ppm, presentándose el valor más alto antes y durante la adición de recortes de perforación los días 21 y 23 de agosto de 1997. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 1.00 a 95.62 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Cromo (Cr): El resultado fue 1.0050 ppm (0.00007 mg/m^3), cifra bastante baja en todos los eventos, donde 1.0000 ppm es el límite de detección del equipo, razón por la cual se obtienen valores muy similares. En el proceso, las mayores concentraciones se encuentran en clinker (327.67 ppm) y cemento (211.81 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II, polvo etapa IV y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de valores de 50.07 a 170.67 ppm. Las determinadas en clinker tienen valores con un intervalo de 296.19 a 327.67 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores de < 0.005 ppm en todos los casos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores de < 1.00 ppm en todos los casos.

Cobalto (Co): Su comportamiento en chimenea es muy similar al del cromo, con 1.005 ppm (0.00007 mg/m^3), cifra bastante baja en todos los eventos, donde 1.0000 ppm es el límite de detección del equipo, razón por la cual se obtienen valores muy similares. En el proceso las mayores concentraciones se encuentran en clinker (38 ppm) y cemento (34.39 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de 20.00 a 31.05 ppm. Las determinadas en clinker y polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 31.05 a 38.00 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores menores a 0.005 ppm en todos los casos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores de < 1.00 ppm en todos los casos.

Cobre (Cu): El máximo valor en chimenea se dio en el blanco, con 25.585 ppm (0.0012 mg/m^3), cifra bastante despreciable. Los sólidos impregnados tienen 124.37 ppm dentro del proceso. De nueva cuenta, las cifras máximas se encontraron en clinker (35 ppm) y cemento (17 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de 9.01 a 11.63 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos. Las determinadas en clinker y polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 15.96 a 35.00 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 0.005 a 0.210 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 1.00 a 25.58 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos el día 23 de agosto de 1997.

Selenio (Se): El valor máximo en chimenea se observó durante la introducción de sólidos impregnados, con 0.9605 ppm (0.00004 mg/m^3), cifra bastante despreciable. Dentro del proceso, la máxima cifra se dio en la etapa IV (4.83 ppm), material que alimenta al horno.

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, clinker, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de valores de 0.10 a 0.40 ppm. Las determinadas en el polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 1.85 a 4.83 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6

monitoreos isocinéticos tienen valores de < 0.0005 ppm en todos los casos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 0.05 a 0.96 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Manganeso (Mn): En chimenea, el valor máximo se dio durante la introducción de 6 ton/h de recorte, con 37.99 ppm (0.0026 mg/m³), siendo ésta un cifra bastante baja. El recorte tiene una concentración de 367.8 ppm, y en las concentraciones respecto al proceso, los máximos resultados se dieron en clinker (547.45 ppm), etapa IV (463.2 ppm) y cemento (367.8 ppm), cumpliéndose el encapsulamiento antes dicho.

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de valores de 229.17 a 341.62 ppm. Las determinadas en clinker y polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 250.32 a 547.45 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 0.005 a 1.32 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de 15.21 a 37.96 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 21 de agosto de 1997.

Vanadio (V): La medición fue de 250 ppm (0.0115 mg/m³), en el evento de los sólidos impregnados, Durante el recorte con 6 Ton/hr, se tuvieron 227 ppm (0.0154

mg/m³), y durante el blanco 236 ppm (0.0115 mg/m³). No existe gran diferencial entre estos. Las concentraciones en recorte (28.93 ppm) y en sólidos impregnados (29.08 ppm) son muy bajas, y la mayor se observó en clinker, con 121.79 ppm durante el blanco.

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de valores de c 25.00 a 71.18 ppm. Las determinadas en clinker y polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 62.22 a 121.79 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos el día 23 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 0.50 a 0.62 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 3.00 a 249.10 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Estaño (Sn): En todos los eventos se tuvieron 6.000 ppm (0.0004 mg/m³), dándose 5.000 ppm en sólidos y 1.000 ppm en gases. Ambos resultados son límites de detección de los equipos; es decir, que la cifra real es aun menor. En los sólidos impregnados encontramos 262.63 ppm y en los recortes 100 ppm. De nueva cuenta, viendo el proceso, los máximos resultados están en clinker (341.01 ppm) y etapa IV (350.14 ppm), ambos en blanco, y en cemento (348.87 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación

al horno, clinker, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de 160.58 a 350.61 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos. Las determinadas en polvo etapa IV tienen valores con un intervalo de 245.64 a 350.14 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores de < 1.00 en todos los casos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos presentan valores de < 5.00 ppm en todos los casos.

Níquel (Ni): La mayor emisión fue de 117 ppm (0.0071 mg/m^3) durante la alimentación de recortes de perforación. Esta cifra resulta bastante despreciable. Los recortes tuvieron una concentración de 62.53 ppm y los sólidos impregnados 15.66 ppm. En el proceso, la máxima concentración se dio en clinker (168.83 ppm) y en cemento (121.6 ppm).

Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapa II y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de valores de 81.85 a 90.14 ppm. Las determinadas en clinker tienen valores con un intervalo de 155.89 a 168.83 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Las concentraciones determinadas en el polvo etapa-IV tienen valores con un intervalo de 130.50 a 134.05 ppm, presentándose el valor más alto sin la adición de residuos.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6

monitoreos isocinéticos tienen valores de < 0.005 ppm en todos los casos. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de < 1.00 a 117.36 ppm, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 21 de agosto de 1997.

Cloro (Cl_2): Las concentraciones determinadas en las muestras de molino de crudo, alimentación al horno, polvo etapas II y IV, y polvo electrofiltro, tienen un intervalo de valores de 0.125 a 0.312% peso, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997.

Las concentraciones determinadas en clinker tienen valores con un intervalo de 0.309 a 0.331% peso, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997.

Por otra parte, las concentraciones determinadas en las muestras de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de 0.308 a 0.375% peso, presentándose el valor más alto durante la adición de sólidos impregnados el día 22 de agosto de 1997. Asimismo, las determinadas en los filtros de los 6 monitoreos isocinéticos tienen valores con un intervalo de 0.0054 a 0.0082% peso, presentándose el valor más alto durante la adición de recortes de perforación el día 20 de agosto de 1997.

4.9.3. De los residuos

Los recortes de perforación tomados para las pruebas se generan entre los 2.5 y 5.5 km. Estos se componen en general de arcillas (80%), cuarzo (10%), calcita (3%),

hematita (4%), muscovita (2%) y en ocasiones clorita (0.7%).

Este material en términos generales se puede dosificar en el proceso de fabricación del cemento como una parte de las materias primas.

Estos residuos salen del pozo contaminados generalmente con materiales como aceites minerales, diesel, naftas, asfaltos, sílicas y arcillas organofílicas, usados como densificantes, emulsificantes, y reductores de pérdida de fluidez.

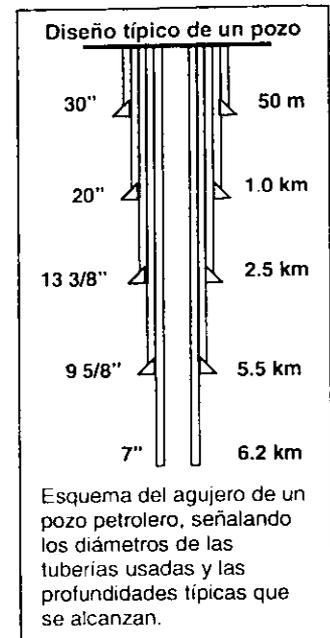
El resto de los recortes de los pozos son denominados

recortes base agua, que en ocasiones tienen de 1 a 5% de diesel, los cuales no fueron el caso de esta prueba.

Los sólidos impregnados son residuos como estopas, guantes, trapos, papel, plásticos, cartón, mascarillas, filtros y aserrín, impregnados con aceites y grasas.

Como se observa en las tablas y gráficas de los análisis químicos adjuntos al Apéndice A, las concentraciones de metales pesados, tanto de los recortes como de los sólidos impregnados, no rebasan ninguno de los niveles señalados en el punto 2 de la autorización a ECOLTEC D.O.O. DGNA.- 2255, del 31 de mayo de 1995, donde se solicita una caracterización del combustible alterno, el cual no deberá rebasar los parámetros ahí mencionados.

Comparando el nivel de metales pesados entre ambos residuos, las más altas concentraciones están dadas en los sólidos impregnados, como Sb (1,000 ppm), Pb (583.31 ppm) y Sn (262.63 ppm), y los resultados en emisiones no son exactamente en



los eventos con los sólidos impregnados, excepto en Pb 0.0044 mg/m³, y en el blanco tenemos 0.0037 mg/m³. Debido a esta pequeña diferencia, no puede decirse que sean por los sólidos impregnados; además de que en el proceso se encuentran estas concentraciones en el clinker, tal y como se ha detallado anteriormente.

Las concentraciones de arsénico, cromo, cobalto, selenio, manganeso, vanadio, estaño, níquel y cloro, son superiores en el cemento puzolánico producido que en los residuos (lodos de recortes y sólidos impregnados) dosificados. Considerando que el volumen de residuos incorporados al proceso de fabricación de cemento para su destrucción térmica es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados al proceso, se puede estimar que estos valores son típicos del proceso normal de producción, en función de las materias primas empleadas.

Las concentraciones de cadmio, plomo y cobre son superiores en los lodos que en el cemento puzolánico. Considerando que el volumen de residuos incorporados al proceso para su destrucción térmica, es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados, se puede decir que estas concentraciones no influyen de manera significativa en el proceso normal de producción.

Las concentraciones de mercurio, antimonio, plomo y cobre son superiores en los recortes impregnados que en el cemento puzolánico. Considerando que el volumen de residuos incorporados al proceso de fabricación de cemento para su destrucción térmica, es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados al proceso, se puede decir que estas concentraciones no influyen de manera significativa en el proceso normal de producción.

El poder calorífico bruto determinado en los recortes de perforación es de 3,203 BTU/lb, equivalente a 7.43 MJ/kg, que multiplicado con la máxima dosificación según el cuadro 1 de 0.0588 kg. de recorte/kg clinker, aportaría 0.44 MJ/Kg clinker del consumo normal de 3.25 MJ/kg clinker, lo que significaría 13.4% de sustitución térmica. Sin embargo, la realidad es que se necesitaron 0.090 m³/kg clinker al introducir 6 ton/h de recorte; es decir 0.003 m³/Kg clinker (3.4%) adicionales a la prueba del blanco, y para 3 Ton/hr de recorte se sustituyó 0.001 m³/Kg clinker, 61.15%.

El poder calorífico bruto determinado en los sólidos impregnados es de 14,803 BTU/lb, equivalente a 34.34 MJ/kg por 0.0009 Kg de sólidos impregnados sobre kg clinker, resultando 0.031 MJ/kg clinker que del consumo normal de 3.25 MJ/kg clinker, representaría 0.9% de sustitución. La práctica nos dice que se sustituyeron 1.15% térmicamente.

4.10. Conclusiones del protocolo de pruebas

A partir del análisis de resultados obtenidos en la realización del protocolo de pruebas en el horno rotatorio de fabricación de cemento en la planta Macuspana de Cementos Apasco, antes y durante la incorporación de recortes de perforación y sólidos impregnados, se concluye lo siguiente:

- La concentración de emisiones de NO_x, SO₂, CO₂, CO, y HCl, es muy constante con y sin la incorporación de recortes de perforación y sólidos impregnados, considerando las variaciones propias del proceso. En el caso del HCl, se aprecia un

incremento con la alimentación de recortes de perforación durante la dosificación de 3 ton/h, reduciéndose al dosificar 6 ton/h del recorte; sin embargo, consideramos que este resultado no es de impacto relevante al ambiente, en términos globales.

- Considerando la emisión de partículas, también se observó un incremento de éstas al introducir el recorte de perforación, aun cuando en ningún caso se rebasó el valor máximo permisible estipulado por la NOM-040-ECOL-1993.
- Respecto a las emisiones de los metales pesados en chimenea, que van desde 0.0 a 0.0154 mg/m³ como máximo, considerando todos los eventos, éstas ahora resultan bastante despreciables, pues se observa que las máximas concentraciones de metales pesados se encuentran en el clinker, cemento y en los polvos de la etapa IV, los cuales son la última etapa del precalentador que alimenta al horno, comprobando y justificando una vez más el encapsulamiento de los metales pesados en el cemento concreto, los cuales no son solubles.
- La excepción al concepto antes mencionado es el mercurio, pues la máxima concentración (0.49 ppm) la encontramos en el polvo del filtro y menos en el clinker; sin embargo, la máxima emisión en chimenea es bastante insignificante (0.00023 mg/m³, encontrada durante la prueba con los sólidos impregnados. El material con mayor concentración fue de 7.28 ppm en los recortes, cifra bastante baja.
- Las dosificaciones fueron de 0.0312 y 0.0588 kg/kg de clinker, de los recortes de perforación base aceite en cada una de las pruebas; es decir, aproximadamente 3 y 6% base clinker, de donde se tuvo un consumo de gas de 0.086 y 0.090 m³ de gas natural/kg de clinker, que comparando con el blanco (sin residuos) de 0.087 m³/kg

de clinker, en el primero se tuvo un ahorro de 1.15% y en el segundo una pérdida de) 3.4% térmicamente. Esto significa que el ahorro de energía es bastante relativo, y que lo más relevante al impacto del medio ambiente es la destrucción térmica y segura de los recortes.

- Con los sólidos impregnados, la dosificación fue de 0.0009 kg/kg de clinker, que térmicamente equivale a una sustitución del 1.5%, considerando el consumo del gas natural de 0.086 m³/kg de clinker, respecto al blanco de 0.067 m³/kg de clinker. De acuerdo con nuestra experiencia, conocemos que este ahorro es también muy relativo, pues en este tipo de materiales existe mucha variación en su composición y una tasa de alimentación promedio sería de 0.5% base clinker, equivalente a 0.005 kg/kg de clinker o aproximadamente 350 Ton/mes, para nuestro horno en Macuspana.
- Otra consideración acerca de los recortes de perforación base aceite utilizados en estos protocolos de prueba, son los resultados de los análisis CRETIB, los cuales, de acuerdo con la NOM-052-ECOL/93, resultan negativos o no peligrosos. Estos análisis fueron efectuados por Laboratorios ABC, de los cuales se anexan dos de ellos. Pemex Exploración y Producción cuenta con aproximadamente 14 resultados de análisis CRETIB, también negativos, de los diferentes pozos.

En resumen, la concentración de metales y cloro es muy constante antes y durante la incorporación de recortes de perforación y sólidos impregnados, y las variaciones no resultan significativas, debiéndose más a cambios en las condiciones de operación

durante las pruebas que a efectos de la adición de recortes de perforación y sólidos impregnados. El volumen de residuos incorporados al proceso de fabricación de cemento en esta planta para su destrucción térmica, es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados al proceso, por lo que su efecto es imperceptible. En ningún caso se rebasó el valor máximo permisible estipulado por la NOM-040-ECOL-1993 para la emisión de partículas.

5. Costos por manejo, tratamiento y disposición de recortes

5.1. Costos históricos

La perforación de pozos petroleros es una actividad que data de hace muchos años. En los estados de la república donde opera la Región Sur de Pemex Exploración y Producción (sur de Veracruz, Tabasco y norte de Chiapas) se ha visto la acumulación de grandes volúmenes de recortes de perforación en las localizaciones intervenidas, las cuales generan el riesgo de contaminación de suelos por filtración de contaminantes. Esto ha ocasionado el descontento de comunidades aledañas, que se ha traducido en el bloqueo de instalaciones, así como la solicitud de autoridades ambientales para remediar esta situación.

La perforación petrolera en la Región Sur ha sido muy relevante en los últimos años. Tan sólo entre 1986 y 1996 se perforaron 380 pozos, observando incrementos muy importante en los últimos cuatro años (6, 25, 36 y 32 pozos, respectivamente). Se estima que durante la perforación de un pozo se generan entre 1,000 y 1,200 toneladas de recortes, los cuales son considerados como residuos peligrosos. Esto nos da una idea aproximada del problema que enfrentamos.

Aun cuando los esfuerzos de la dependencia en pro de la protección ambiental han logrado avances considerables en el desarrollo e implementación de sistemas preventivos de la contaminación, la naturaleza industrial de esta actividad nos obliga a ver más allá de su cadena productiva, a fin de vislumbrar soluciones integrales que

satisfagan las expectativas ecologistas, ya que las tecnologías convencionales y no convencionales de perforación siguen arrojando un significativo volumen de desechos que se deben manejar y dar un tratamiento adecuado hasta hacerlos inocuos e inofensivos a la exposición humana.

Como señalé anteriormente, existen diversos métodos para el tratamiento de los recortes y residuos de perforación impregnados con fluidos base agua y base aceite: confinamientos controlados, encapsulados, biorremediación, lavado y centrifugado, incineración, destilación, destilación al vacío, destilación a alta temperatura, inyección a cuerpos receptores y extracción con solventes. Pero cada uno de estos tratamientos significa una erogación para la empresa que oscila entre 400 y 1,400 pesos por tonelada de residuos; además de los costos que representan el transporte, la construcción de presas, el movimiento de residuos dentro de la localización, etc., que prácticamente los duplican. En forma general, se estima que los costos relacionados con el manejo, tratamiento y transporte de recortes y desechos, entre 1994 y 1997, ascendieron a 270 millones de pesos.

Para tener una idea de las dimensiones del problema, veamos en la **Tabla 5.1** las cantidades de recortes y residuos peligrosos existentes y estimados para tratamiento.

Tabla 5.1. Recortes y residuos existentes y estimados para tratamiento

Material	Cantidad (ton)
Recortes base aceite en loc. auditadas (SGS)	310,000
Recortes en localizaciones no auditadas	122,140
Recortes en confinamientos temporales	4,100
Recortes base aceite 4° trim/97	20,000
Recortes base aceite 1998 (programa)	84,230
Totales de recortes	540,470
Líquidos aceitosos m ³	30,000

5.2. Comparación de costos por proceso empleado

La perforación de pozos en la industria petrolera es una de las actividades que requieren fuertes inversiones económicas, sobre todo por los altos niveles de especialización que tienen sus ingenierías, la complejidad de sus operaciones y el grado de incertidumbre que caracteriza el negocio petrolero. Cualquier decisión que se tome en este ámbito, por más técnica que sea, tiene una dimensión económica por sus repercusiones en la rentabilidad de este sector industrial; de ahí que los costos involucrados en cada una de sus operaciones sean criterios muy poderosos para jerarquizar y seleccionar las alternativas más viables en cada caso.

Aun cuando los problemas relacionados con el manejo, tratamiento y disposición de los desechos de la perforación es reciente, las compañías petroleras han asumido su

responsabilidad de preservar el equilibrio de los ecosistemas donde operan y están tratando de establecer una convivencia armónica con el entorno ambiental y las comunidades sociales. Esta actitud ha tenido como consecuencia un incremento en sus costos operativos, principalmente asociados a las acciones encaminadas a cumplir con normas ambientales cada vez más estrictas a lo largo de su proceso; impulsar la implementación de mejores prácticas operacionales que minimicen o eliminen el impacto adverso sobre el entorno; así como desarrollar soluciones alternas para el tratamiento de sus desechos industriales.

La comparación de costos es, quizá, uno de los principales impulsores de la innovación en cualquier actividad económica, sobre todo si tenemos identificadas diversas fuentes de solución para un problema. Para el caso del tratamiento de los desechos de perforación, existe además otro criterio que debe tomarse en consideración para decidir la opción que mejor satisfaga los requerimientos ecologistas. Estoy hablando del factor tiempo, ya que no todas las técnicas de tratamiento disponibles ofrecen la misma oportunidad o duración en su efecto.

Por ejemplo, observando la **Tabla 5.2**, el confinamiento y el microencapsulado son métodos cuyo costo es similar; pero, como su solución no es definitiva, lo único que logran es trasladar el problema en el tiempo; es decir, lo posponen. Son técnicas perdurables mientras duran. ¿Cuántos años? Pueden ser cien. El caso es que con ellas persisten los riesgos de contaminación, por los mecanismos de dispersión que operen en cada caso. La biorremediación, aun cuando es la técnica más económica en este momento, su ejecución requiere un promedio de 270 días, poniéndola en desventaja

frente a las otras de oportunidad inmediata. Otras dos técnicas relativamente comparables son la incineración en hornos convencionales que alcanzan temperaturas del orden de los 600 °C, y el tratamiento térmico en hornos de cemento propuesto en esta tesis como alternativa más viable. Ambas técnicas tienen un efecto inmediato como solución al problema de los desechos; la ventaja de la segunda es su bajo costo, además de que es un proceso que dispone de mayor capacidad para los grandes volúmenes de desechos que produce la industria petrolera.

Tabla 5.2. Comparación de precios por tratamiento

Técnica	Precio (\$/Ton)	Tiempo (días)
Confinamiento	1,350	Perdurable
Microencapsulado	1,271	Perdurable
Biorremediación	400	270 días
Incineración	1,400	Inmediato
Tratamiento térmico PEP-Apasco	900	Inmediato

5.3. Areas de oportunidad y ahorros futuros

La Región Sur de Pemex Exploración y Producción, comprometida con las políticas ambientales de Petróleos Mexicanos e interesada en buscar áreas de oportunidad para mejorar la rentabilidad de sus actividades de perforación, me dio la oportunidad de desarrollar una solución alternativa para resolver el problema que representa el manejo

y tratamiento de los desechos de este proceso industrial, y en el cual se conjugan positivamente factores técnicos, económicos, logísticos y sociales. Dicho proceso alternativo consiste en el uso de los recortes de perforación como materia prima en la industria cementera.

Dado que la fabricación del cemento utiliza como materias primas caliza, lutita y energía, elementos presentes en los recortes de perforación que pueden incorporarse a este proceso productivo de manera natural, observamos que esta industria ofrece importantes ventajas técnicas y económicas para resolver la problemática ambiental de los recortes de perforación, logrando al mismo tiempo un beneficio para ambas industrias. Para Pemex, esta solución significa un ahorro en los pagos que realiza por deshacerse de residuos considerados peligrosos por la normatividad ambiental, Cementos Apasco aprovecha sus instalaciones industriales para atender un nicho de mercado que emerge por el interés ambiental en el mundo de los negocios.

Las áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia de un largo y complejo proceso como el de la perforación petrolera, son abundantes; sin embargo, las que deseo destacar en este trabajo se refieren al eslabón final de esta cadena productiva. Recurriendo nuevamente a la comparación de precios, y de acuerdo con los volúmenes de desechos que la Región Sur tiene contratados para diferentes tratamientos (**Tabla 5.3**), podemos percatarnos de un ahorro muy sustancial si seleccionamos el tratamiento térmico PEP-Apasco. Cabe aclarar que esta tabla presenta valores reales de 1998; es decir, se trata de negociaciones ya hechas, por lo que mi recomendación surge a partir de la observación de hechos pasados.

Considerando que durante 1998 se dará tratamiento a un volumen de 540,470 toneladas, si se optara por utilizar solamente el tratamiento térmico PEP-Apasco se tendría un ahorro de \$243'211,000; esto es, el 33 por ciento del gasto programado para este rubro.

Tabla 5.3. Comparación de precios por tratamiento

Técnica	Volumen (ton)	Precio (\$/Ton)	Costo \$
Confinamiento	35,000 (69.0%)	1,350.00	47'250,000
Microencapsulado	14,000 (27.6%)	1,271.00	17'794,000
Tratamiento térmico PEP-Apasco	1,700 (3.4%)	900.00	1'530,000

Cabe destacar, adicionalmente, que este tratamiento cumple con la normatividad y reglamentación ambientales, como se demostró a lo largo de esta tesis.

Conclusiones generales

La problemática ambiental que enfrenta la industria petrolera primaria, tanto en México como en el resto del mundo, tiene como uno de sus principales componentes el manejo, tratamiento y disposición final de los desechos que se generan durante la perforación de pozos. Si bien es cierto que Petróleos Mexicanos ha venido instrumentando diversos sistemas de prevención para evitar el deterioro de las condiciones naturales del entorno, hasta el momento no existen las tecnologías de perforación, terminación o mantenimiento de pozos capaces de minimizar o eliminar los riesgos de contaminación. Por lo tanto, para buscar una solución integral a este problema, debemos ver a la perforación como un proceso industrial con productos, subproductos e implicaciones que rebasan sus fronteras, y cuya cadena productiva puede vincularse con las de otras industrias de manera provechosa.

Los desechos de este proceso industrial se han visualizado tradicionalmente como residuos peligrosos; sin embargo, los estudios químicos aún tienen que progresar para hacer una caracterización más completa de ellos, y comparar el nivel de compuestos aromáticos, hidrocarburos lineales y compuestos semivolátiles contra normas ecológicas. Como se observó en los análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, y Biológicos infecciosos) practicados a 14 muestras de fluidos y recortes de perforación, los contaminantes presentes en ellas no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-052-ECOL-1994, ni presentan las características extremas de los residuos peligrosos en cuanto a

corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad al ambiente, inflamabilidad y biológico infeccioso; aunque es innegable su efecto negativo al medio natural, como consecuencia de su composición, concentración y volumen. El efecto negativo más conspicuo se observa sobre la salud humana, como consecuencia de la exposición permanente a estos materiales y residuos peligrosos.

Debido a que la solución a esta problemática ambiental se ha venido postergando, en la Región Sur se han acumulado grandes volúmenes de desechos que requieren un tratamiento radical para eliminar cualquier riesgo de contaminación a los mantos fríaticos de un territorio con alta precipitación fluvial. Por lo tanto, la planeación e instrumentación de un sistema para el tratamiento integral de fluidos y recortes de perforación y demás sólidos impregnados, debe tomar en consideración factores de diversa índole (hidrológicos, ecológicos, climáticos, poblacionales, topográficos y de acceso a las localizaciones que han funcionado como áreas de confinamiento). Dicho sistema debe aplicarse tanto en zonas dañadas como en localizaciones por intervenir, a fin de conservar el equilibrio ambiental de nuestro entorno.

Respecto al monitoreo de emisiones a la atmósfera, la concentración de metales y cloro es muy constante antes y durante la incorporación de recortes de perforación y sólidos impregnados, y las variaciones no resultan significativas, debiéndose más a cambios en las condiciones de operación durante las pruebas que a efectos de la adición de recortes de perforación y sólidos impregnados. El volumen de residuos incorporados al proceso de fabricación de cemento en esta planta para su destrucción térmica, es muy pequeño comparado con el volumen total de materiales alimentados al

Bibliografía

Anuario estadístico del estado de Tabasco; INEGI-Gob. de Tabasco, México, 1998.

Certificación de pruebas de quemado de lodos de perforación y sólidos impregnados en el horno cementero realizadas por la empresa ECOLTEC en las instalaciones de Cementos Apasco, S. A., de C. V., planta Macuspana, Tabasco. Universidad Autónoma Metropolitana, septiembre de 1997. Documentación oficial.

Berger, Bill D.: Modern Petroleum; Pennwell Books, USA, 1990.

Enciclopedia Petróleo International; Pennwell books, 1995.

DGN-AA-1-1972: *Norma mexicana de método de prueba para determinar la densidad aparente visual del humo empleando la carta de Ringelmann* (fuentes estacionarias).

EPA Método 2: *Determinación de la velocidad de gases de chimenea y flujo volumétrico* (tubo Pitot tipo S). Code of Federal Regulation, Title 40, Protection of Environmental Part 60, App. A, pag. 354-372.

EPA-Método 1: *Determinación del sitio de muestreo y velocidad de los gases de chimenea provenientes de fuentes fijas.* Code of Federal Regulation, Title 40, Part. 60, App. A, pag. 348.

EPA-Método 10: *Determinación de las emisiones de monóxido de carbono provenientes de fuentes fijas (procedimiento de analizador instrumental).*

EPA-Método 29: *Determinación de metales en sólidos y en emisiones gaseosas de fuentes estacionarias.*

EPA-Método 3: *Análisis de gas para bióxido de carbono, oxígeno, monóxido de carbono, exceso de aire y peso molecular.* Code of Federal Regulation, Title 40, Protection of Environmental, pag. 60, App. A, pag.372.

EPA-Método 3A: *Determinación de las concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono en emisiones provenientes de fuentes fijas.* Protection of Environmental, Part 60, App. A, pag. 372 (Procedimiento de analizador instrumental).

EPA-Método 4: *Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea.* Federal Register, Vol. 36, No. 247, Diciembre de 1971.

EPA-Método 5: *Determinación de la emisión de partículas provenientes de fuentes fijas.* Title 40, Protection of Environmental, Part 60, App A, Pag. 387.

EPA-Método 6C: *Determinación de las emisiones de bióxido de azufre provenientes de fuentes fijas (procedimiento de analizador instrumental).*

EPA-Método 7E: *Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes de fuentes tijas (procedimiento de analizador instrumental).*

Hyne, Norman J.: Dictionary of petroleum exploration, drilling & production; USA;
Pennwell books, 1997.

Informe anual de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos 1996;
Región Sur de Pemex Exploración y Producción; México.

Informe anual de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos1997;

Región Sur de Pemex Exploración y Producción; México.

Informe anual de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos1998;

Región Sur de Pemex Exploración y Producción; México.

Memoria de introducción a la energía: IPN; México; 1995.

Informe ejecutivo de la evaluación de emisiones contaminantes a la atmósfera

antes y durante la incorporación de recortes de perforación y sólidos

impregnados, Cementos Apasco, S. A., de C. V., planta Macuspana,

Tabasco, realizado del 11 al 24 de agosto de 1997. Instituto Mexicano del

Petróleo. Documentación oficial.

Informe de resultados analíticos, protocolo de pruebas, Cementos Apasco, S. A.,

de C. V., planta Macuspana. Instituto Mexicano del Petróleo. Septiembre de

1997. Documentación oficial.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. H. Congreso de

la Unión, Comisión de Ecología y Medio Ambiente, LVI Legislatura, 1996.

Masseron, Jean: Petroleum Economics; Gulf Publishing, Co., USA, 1997.

Memoria de labores 1997: Petróleos Mexicanos; México.

Memoria de labores 1998: Petróleos Mexicanos; México.

Método ASTM-D-240: *Determinación de poder calorífico bruto.*

Método SW-416 Modificado (3020): *Digestión ácida de muestras acuosas y extractos*

para metales totales por espectroscopía de absorción atómica.

Método SW-486 Modificado (3050A): *Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.*

Napoleón Solórzano, Luzbel: Administración de empresas petroleras, criterios de rentabilidad económica; Pemex Exploración y Producción; México, 1997.

NOM-040-ECOL-1993: *Norma oficial mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas, provenientes de las fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento.*

NOM-085-ECOL-1994: *Norma oficial mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.*

NOM-AA-070-1980: *Determinación de cloro y/o cloruros en los gases que fluyen por un conducto.*

NOM-AA-54-1978: *Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un ducto.*

NOM-AA-9-1973: *Determinación de flujo de gases por medio del Tubo Pitot.*

Petróleo y su impacto en la ecología, El: Memorias. Conferencias Magistrales.
UJAT - H. Congreso de la Unión - Comisión de Ecología y Medio Ambiente.
Villahermosa, Tab., 16, 17 y 18 de octubre, México, 1996.

Presencia de Petróleos Mexicanos en Chiapas; Pemex Exploración y Producción,
Región Sur, 1998.

Presencia de Petróleos Mexicanos en Tabasco; Pemex Exploración y Producción,
Región Sur, 1998.

Programa general de inducción a Pemex: Petróleos Mexicanos, 1991.

Protocolo de pruebas para incineración de recortes de perforación base aceite y

sólidos impregnados. Cementos Apasco, S. A., de C. V., planta Macuspana, Tabasco. Septiembre de 1997. Documentación oficial.

Reformas, adiciones y derogaciones a diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. H. Congreso de la Unión, Comisión de Ecología y Medio Ambiente, LVI Legislatura, México, 1996.

Reis, John C.: Environmental Control in Petroleum Engineering; Gulf Publishing Co., USA. 1996.

Robert, D. L.: The illustrated petroleum reference dictionary; Pennwell Books; USA, 1994.

Rodríguez Méndez, Enrique: Tecnología de perforación hidráulica de la perforación rotatoria; Ed. del autor; México, 1996.

Taller de administración de la salud y el medio ambiente para gerentes: Pemex Exploración y Producción, 1999.

Thuesen, G.J.: Engineering economy; USA; Prentice-Hall, 8a, ed. 1996.

Siglas y abreviaturas

%	Porcentaje
\$/ton.	Pesos por tonelada
Amp	Amperes
App.	Apartado
Art.	Artículo
As	Arsénico
ASTM	American Standar Testing Material
BTU/lb	British Thermal Unity por libra
°C	Grados centígrados
CCT	Concentración para exposición a Corto Tiempo
Cd	Cadmio
Cl	Cloro
Cl ₂	Cloro
Clase H	Tipo de cemento
Co	Cobalto
CO ₂	Bióxido de carbono
Coah.	Coahuila
COSHH	<i>Control of Substances Hazardous to Health</i>
CPT	Concentración Ponderada en Tiempo
Cr	Cromo
CRETIB	Análisis especializado de residuos peligrosos

Cu	Cobre
DGN	<i>Dirección General de Normas</i>
ECOL	Ecología
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
g/l	Gramos por litro
HCl	Acido clorhídrico
Hct	Hidrocarburos totales
Hg	Mercurio
IMP	<i>Instituto Mexicano del Petróleo</i>
Increment.	Incremento
INE	<i>Instituto Nacional de Ecología</i>
kg/cm ²	Kilogramos por centímetro cuadrado
kg/cm ³	Kilogramo sobre centímetro cúbico
kg/h	Kilogramos por hora
kg/kg	Kilogramo por kilogramo
kJ/kg Cli	Kilo Jules por kilogramo clinker
LGEEPA	<i>Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental</i>
m ³	Metro cúbico
m ³ /h	Metros cúbico por hora
m ³ /Kg	Metro cúbico por kilogramo
Max.	Máximo
mg/l	Miligramos por litro

mg/m ³	Miligramos por metro cúbico
mg/Nm ³	Miligramos por nivel de metro cúbico
Mn	Manganeso
mmHg	Milímetros de mercurio
N.A.	No aplica
Ni	Níquel
NOM	Norma oficial mexicana
NOx	Oxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
Pág.	Página
Pb	Plomo
Perm.	Permitido
PEP	<i>Pemex Exploración y Producción</i>
ppm	Partes por millón
PST	Partículas suspendidas totales
rpm	Revoluciones por minuto
Sb	Antimonio
Se	Selenio
SO ₂	Bióxidos de azufre
Sn	Estaño
STPS	<i>Secretaría del Trabajo y Previsión Social</i>
T/h	Toneladas por hora

Tab.	Tabasco
Tipo IP	Tipo de cemento
TI	Talio
Ton	Tonelada
Ton/h	Toneladas por hora
Ton/mes	Tonelada por mes
Trim.	Trimestre
UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
V	Vanadio
Ver.	Veracruz

Apéndice A: Figuras, Tablas y Gráficas

Índice de figuras, tablas y gráficas

Figura 1 Tratamientos actuales de los recortes de perforación	116
Figura 2 Proceso de manufactura del cemento	117
Figura 3 Parámetros evaluados durante el monitoreo de emisiones	118
Figura 4 Resultados del monitoreo de emisiones	119
Figura 5 Tratamiento actual de los recortes de perforación	120
Tabla 1 Alimentación de harina cruda y producciones del horno de clinker en los diferentes eventos con y sin residuos	121
Tabla 2 Concentración promedio de emisiones contaminantes a 25 °C, 760 mmHg y base seca	121
Tabla 3 Concentración promedio de emisiones contaminantes, corregidas a 7% de O ₂ base seca y a 760 mmHg y 25 °C	122
Tabla 4 Relación de muestras y análisis solicitados	123
Tabla 5 Resumen de resultados analíticos (IMP)	124
Tabla 6 Resultados analíticos de metales pesados por eventos de la prueba	125
Tabla 7 Resultados de análisis químicos. Laboratorio de Apasco, Macuspana ..	126
Tabla 8 Características de los lodos de perforación alimentados durante las pruebas en la planta de cementos Macuspana.....	127
Gráfica 1 Comportamiento de emisiones en chimenea	128
Gráfica 2 Comportamiento de emisiones en chimenea	129
Gráfica 3 Análisis químicos.....	130

Gráfica 4 Análisis químicos.....	131
Gráfica 5 Análisis químicos.....	132
Gráfica 6 Análisis químicos.....	133
Gráfica 7 Análisis químicos.....	134
Gráfica 8 Comportamiento de emisiones en la prueba del 20/08/97.....	135
Gráfica 9 Comportamiento de emisiones en la prueba del 21/08/97.....	136
Gráfica 10 Comportamiento de emisiones en la prueba del 22/08/97.....	137
Gráfica 11 Comportamiento de emisiones en la prueba del 23/08/97.....	138

Fig. 1. Tratamientos actuales de los recortes de perforación

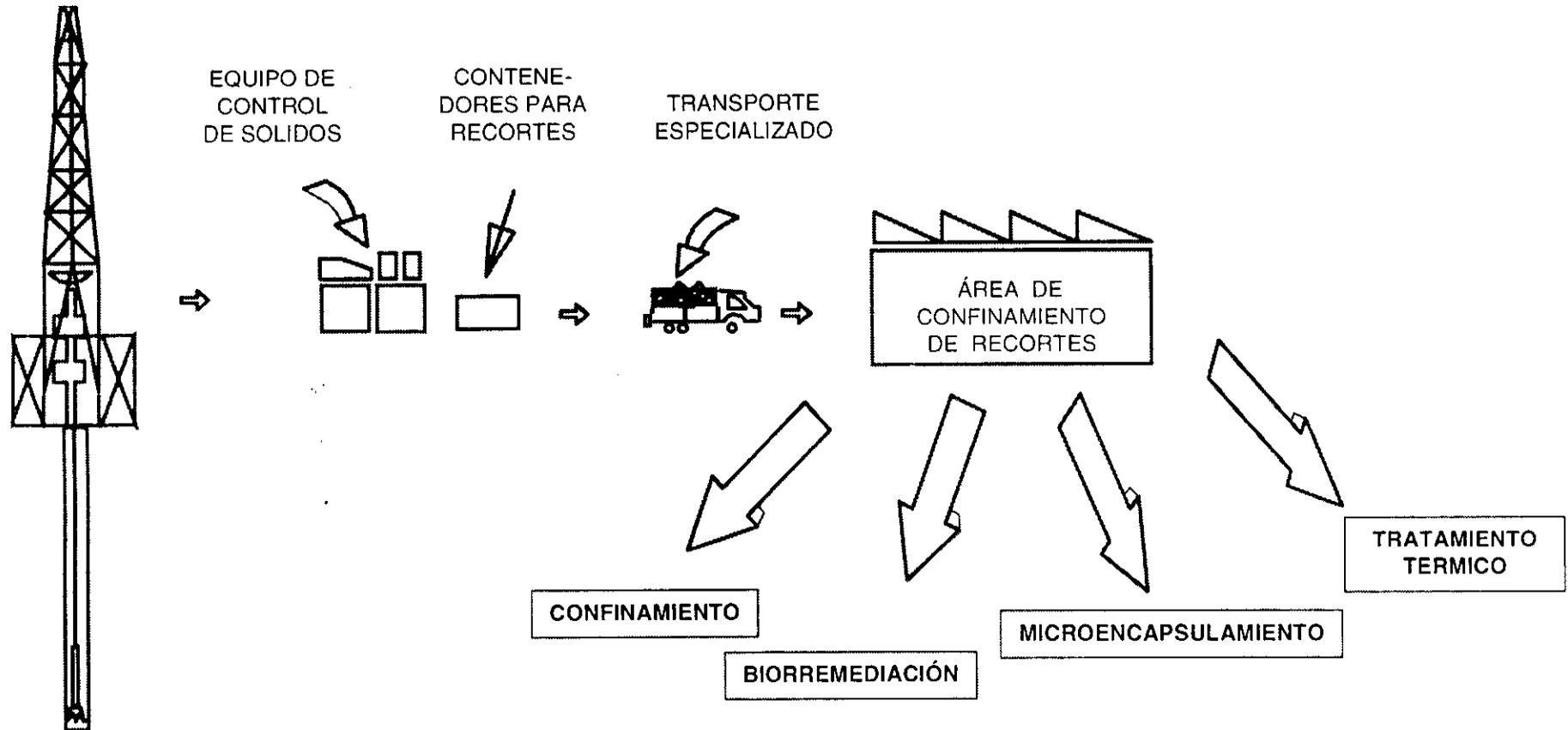


Fig. 2. Proceso de manufactura del cemento

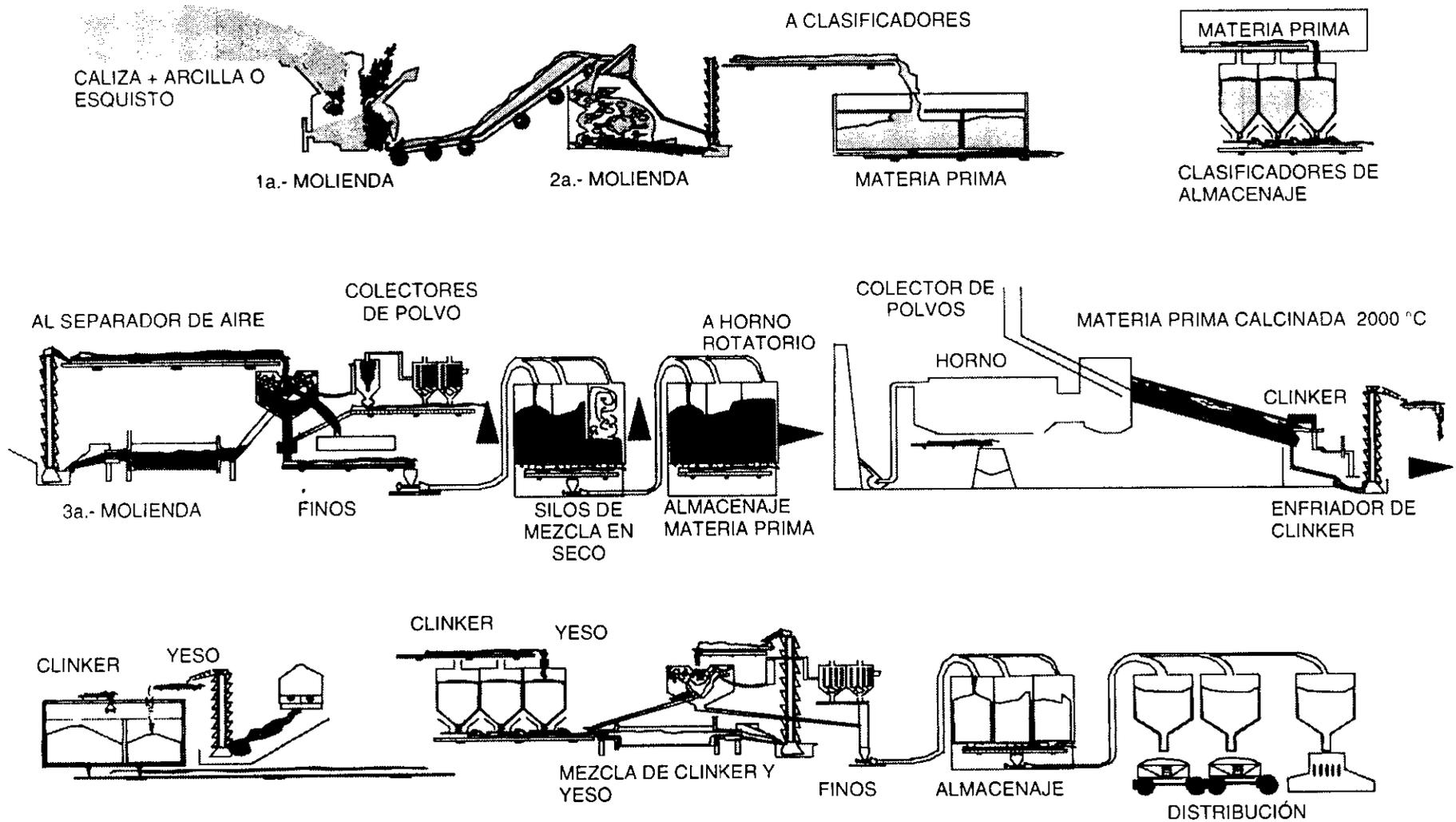


Fig. 3. Parámetros evaluados durante el monitoreo

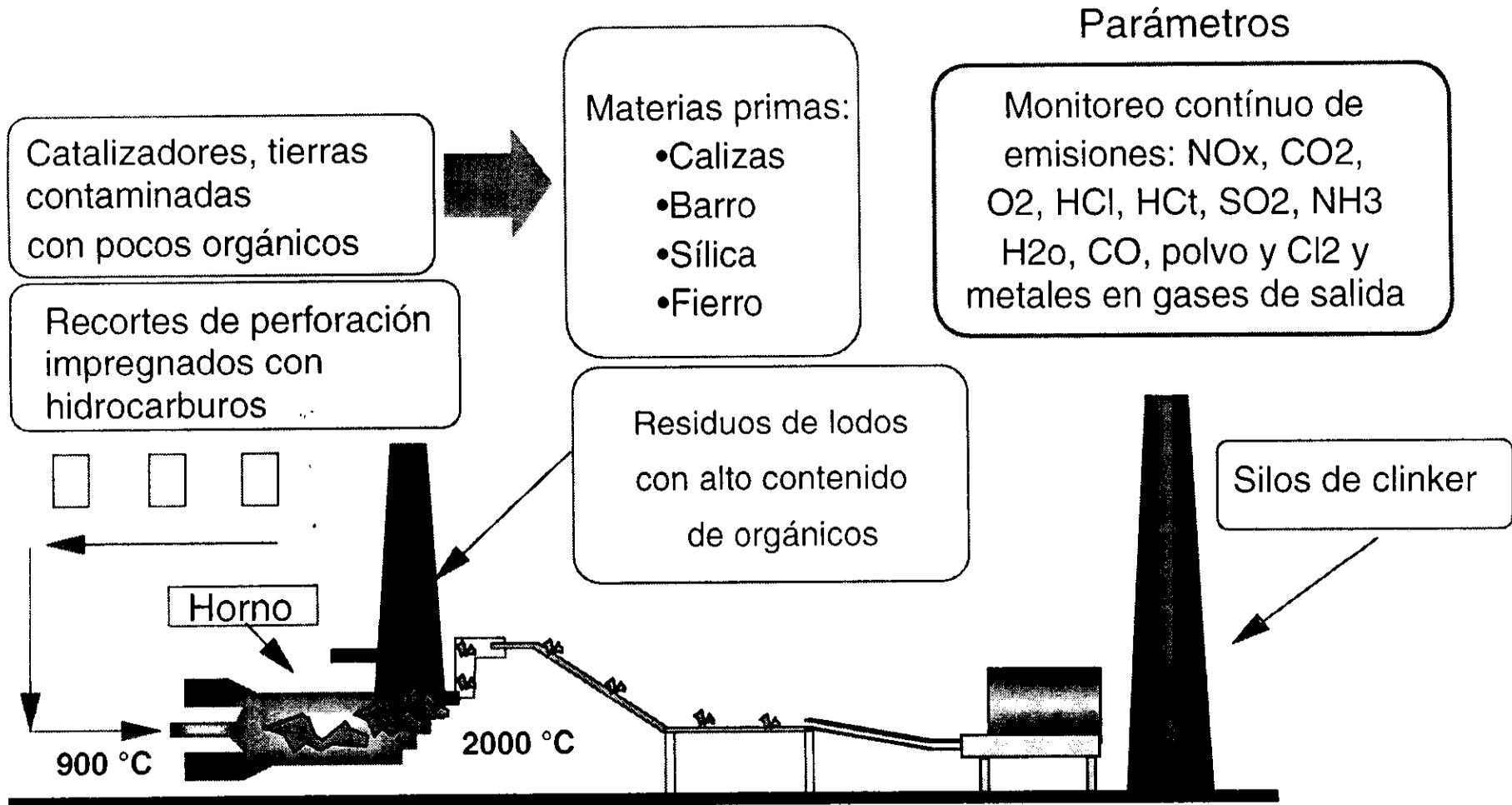
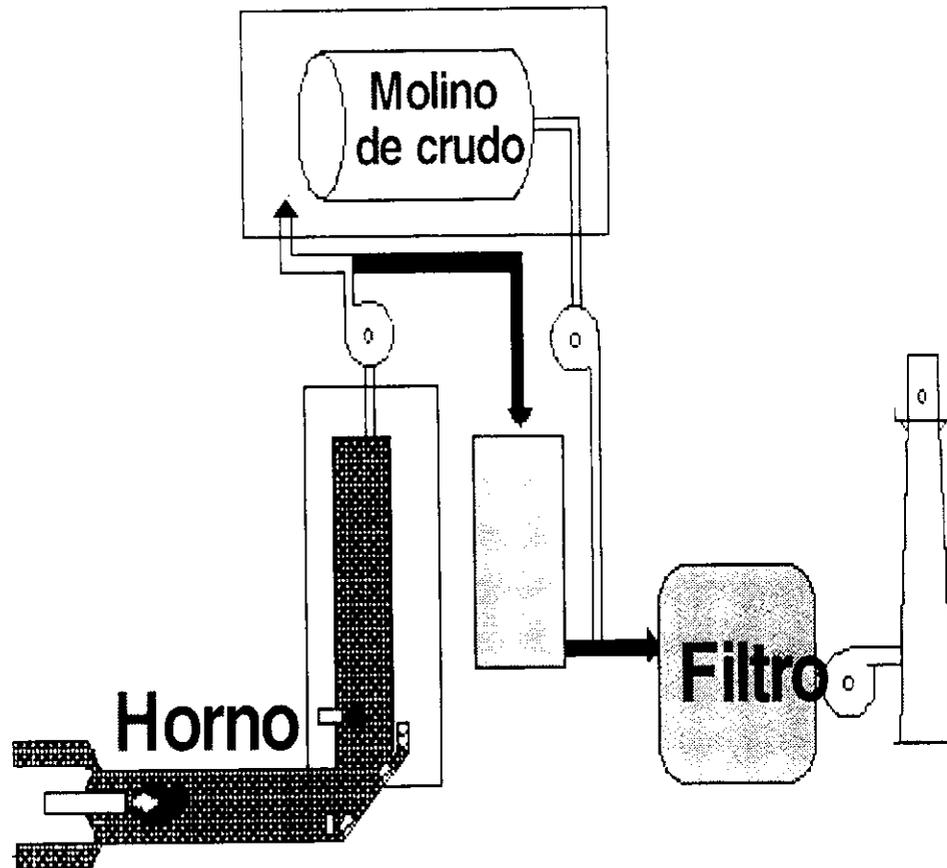


Fig. 4. Resultados del monitoreo



- > Si, CO, HCl y SO₂ suben;
- Entradas de aire falso
- Falta de O₂
- Dispersión del recorte
- Homogeneidad
- > Puntos anteriores resueltos con los nuevos proyectos.

Fig. 5. Tratamiento actual de los recortes

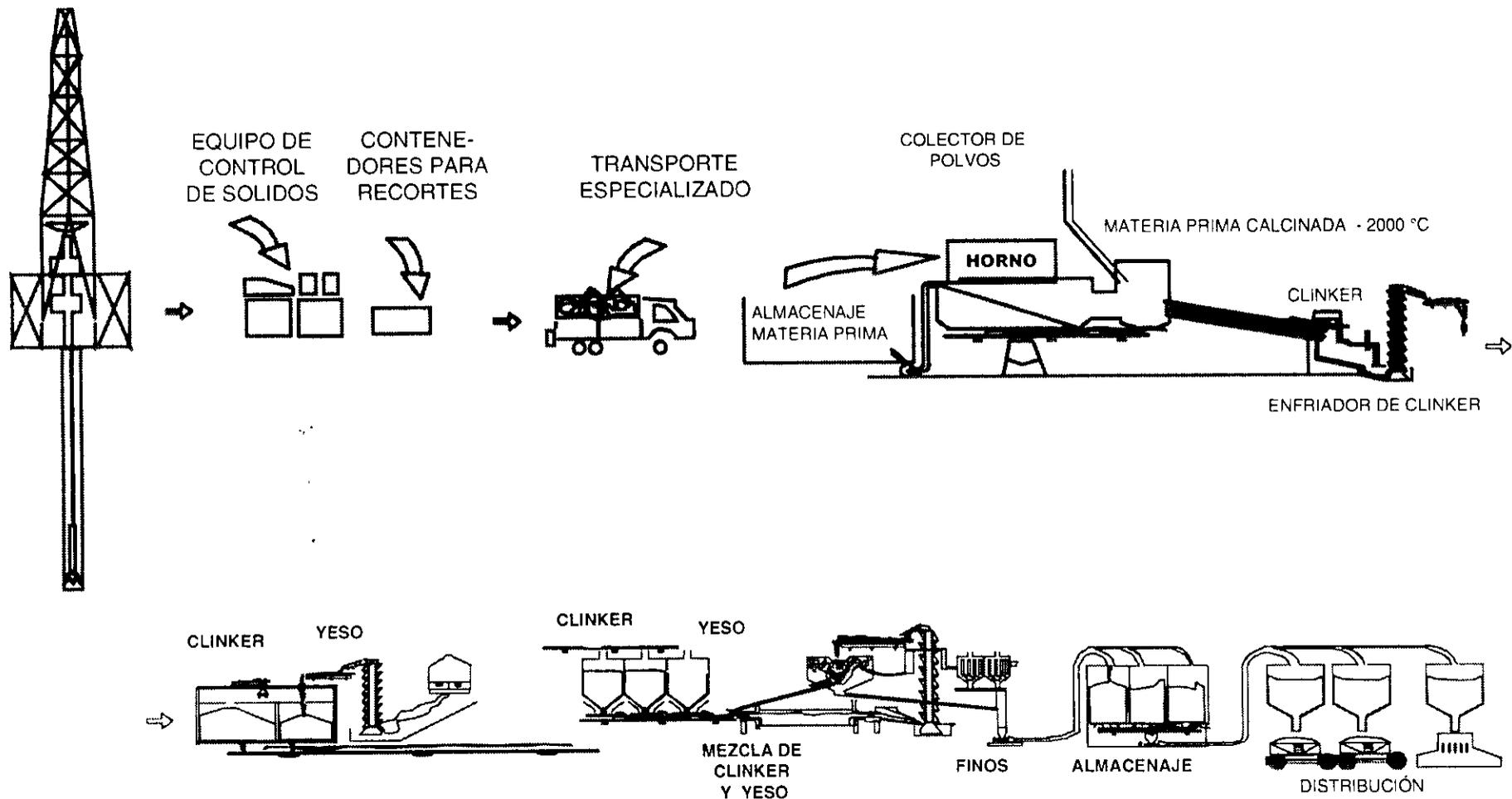


Tabla 1. Alimentación de harina cruda y producciones del horno de clinker en los diferentes eventos con y sin residuos

No.	Fecha	Alimentación t/h		Alimentación t/h		Consumo de gas		
		Horno	Clinker	Recortes	Sólidos	Precalc.	Horno	m3/h
1	20/08/97	166	96	3.0	0.000	4020	4223	0.086
2	21/08/97	170	102	6.0	0.000	5326	3857	0.090
3	22/08/97	177	106	0.0	0.096	5277	3907	0.086
4	23/0897	178	107	0.0	0.000	5420	3922	0.087

Tabla 2: Concentración promedio de emisiones contaminantes a 25 °C, 760 mmHg y base seca

No.	Fecha	Alimentación t/h		Nox ppm	SO ₂ ppm	CO ppm	CO ₂ % Vol.	O ₂ % Vol.	PST			HCt ppm	HCl ppm	Opac. %	Flujo m ³ /h
		Recort.	Sólidos						Real mg/m ³	Real Kg/h	NOM Kg/h				
1	20/08/97	3.0	0.000	225.47	114.66	500.79	7.09	15.61	52.5	14.7	41.2	58.15	0.053	3	279,282
2	21/08/97	6.0	0.000	167.70	167.21	725.53	12.67	13.11	60.8	16.5	42.4	60.08	0.378	3	271,577
3	22/08/97	0.0	0.096	206.75	251.73	773.85	13.27	12.28	45.9	12.6	43.7	30.15	0.496	3	274,538
4	23/08/97	0.0	0.000	225.48	244.24	949.84	14.11	11.28	45.4	12.2	43.9	28.58	0.441	3	269,568

Tabla 3: Concentración promedio de emisiones contaminantes, corregidas a 7% de O₂ base seca y a 760 mmHg y 25 °C

No.	Fecha	Alimentación t/h		Alimentación t/h		NOx ppm	SO ₂ ppm	CO ppm	PST			HCt ppm	HCl ppm	Flujo m ³ /h
		Horno	Clinker	Recortes	Sólidos				real mg/m ³	real kg/h	norma kg/h			
1	20/08/97	166	96	3.0	0.000	589.90	294.57	1300.8	136.3	38.07	41.2	151.04	0.1377	279,282
2	21/08/97	170	102	6.0	0.000	297.82	296.43	1287.4	120.2	32.21	42.4	106.61	0.6707	271,577
3	22/08/97	177	106	0.0	0.096	345.35	406.83	1242.4	73.6	20.21	43.7	48.40	0.7963	274,538
4	23/08/97	178	107	0.0	0.000	326.32	349.52	1368.1	65.4	17.63	43.9	41.19	0.6352	269,568

PST = Partículas suspendidas totales

Tabla 4. Relación de muestras y análisis solicitados

No	FOLIO	TIPO DE MUESTRA	CLAVE	ANALISIS SOLICITADOS
1	3806	MOLINO DE CRUDO	2008-MCR-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
2	3807	ALIMENTACION A HORNO	2008-ALH-PMA-002	METALES (1) Y CLORO
3	3808	CLINKER	2008-CLK-MPA-003	METALES (1) Y CLORO
4	3809	POLVO ETAPA IV	2008-PE4-MPA-004	METALES (1) Y CLORO
5	3810	POLVO ETAPA II	2008-PE2-MPA-005	METALES (1) Y CLORO
6	3811	POLVO ELECTROFILTRO	2008-PEF-PMA-006	METALES (1) Y CLORO
7	3812	MOLINO DE CRUDO	2108-MCR-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
8	3813	ALIMENTACION A HORNO	2108-ALH-PMA-002	METALES (1) Y CLORO
9	3814	CLINKER	2108-CLK-PMA-003	METALES (1) Y CLORO
10	3815	POLVO ETAPA IV	2108-PE4-PMA-004	METALES (1) Y CLORO
11	3816	POLVO ETAPA II	2108-PE2-PMA-005	METALES (1) Y CLORO
12	3817	POLVO ELECTROFILTRO	2108-PEF-PMA-006	METALES (1) Y CLORO
13	3818	MOLINO DE CRUDO	2208-MCR-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
14	3819	ALIMENTACION A HORNO	2208-ALH-PMA-002	METALES (1) Y CLORO
15	3820	CLINKER	2208-CLK-PMA-003	METALES (1) Y CLORO
16	3821	POLVO ETAPA IV	2208-PE4-PMA-004	METALES (1) Y CLORO
17	3822	POLVO ETAPA II	2208-PE2-PMA-005	METALES (1) Y CLORO
18	3823	POLVO ELECTROFILTRO	2208-PEF-PMA-006	METALES (1) Y CLORO
19	3824	MOLINO DE CRUDO	2308-MCR-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
20	3825	ALIMENTACION A HORNO	2308-ALH-PMA-002	METALES (1) Y CLORO
21	3826	CLINKER	2308-CLK-PMA-003	METALES (1) Y CLORO
22	3827	POLVO ETAPA IV	2308-PE4-PMA-004	METALES (1) Y CLORO
23	3828	POLVO ETAPA II	2308-PE2-PMA-005	METALES (1) Y CLORO
24	3829	POLVO ELECTROFILTRO	2308-PEF-PMA-006	METALES (1) Y CLORO
25	3834	CEMENTO	2408-CMT-PMA-001	METALES (1) Y CLORO

Tabla 4. Relación de muestras y análisis solicitados (continuación)

No	FOLIO	TIPO DE MUESTRA	CLAVE	ANALISIS SOLICITADOS
26	3835	LODOS DE RECORTES	2308-LRP-PMA-001	PODER CALORIFICO, HUMEDAD, METALES (1) Y CLORO
27	3836	SOLIDOS IMPREGNADOS	2308-SLI-PMA-001	PODER CALORIFICO, HUMEDAD, METALES (1) Y CLORO
28	3837	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2008-ISC-PMA-001	METALES (2) Y CLORO
29	3838	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2008-ISC-PMA-002	MERCURIO (Hg) Y CLORO
30	3839	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2108-ISC-PMA-001	METALES (2) Y CLORO
31	3840	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2108-ISC-PMA-002	MERCURIO (Hg) Y CLORO
32	3841	ISOCINETICO 2do DEFINITIVO	2108-ISC-PMA-003	METALES (2) Y CLORO
33	3842	ISOCINETICO 2do DEFINITIVO	2108-ISC-PMA-004	MERCURIO (Hg) Y CLORO
34	3843	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2208-ISC-PMA-001	METALES (2) Y CLORO
35	3844	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2208-ISC-PMA-002	MERCURIO (Hg) Y CLORO
36	3845	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2308-ISC-PMA-001	METALES (2) Y CLORO
37	3846	ISOCINETICO 1er DEFINITIVO	2308-ISC-PMA-002	MERCURIO (Hg) Y CLORO
38	3847	ISOCINETICO 2do DEFINITIVO	2308-ISC-PMA-003	METALES (2) Y CLORO
39	3848	ISOCINETICO 2do DEFINITIVO	2308-ISC-PMA-004	MERCURIO (Hg) Y CLORO
40	3849	FILTRO No. 33	2008-FSC-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
41	3850	FILTRO No. 34	2108-FSC-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
42	3851	FILTRO No. 35	2108-FSC-PMA-002	METALES (1) Y CLORO
43	3852	FILTRO No. 36	2208-FSC-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
44	3853	FILTRO No. 37	2308-FSC-PMA-001	METALES (1) Y CLORO
45	3854	FILTRO No. 38	2308-FSC-PMA-002	METALES (1) Y CLORO

OBSERVACIONES:

(1) Cd, Tl, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn, Ni.

(2) Cd, Tl, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Se, Mn, V, Sn, Ni.

Tabla 5. Resumen de Resultados Analíticos (IMP)

MUESTRA		ppm														Humedad %
No.	FOLIO	Cadmio (Cd)	Mercurio (Hg)	Antimonio (Sb)	Arsénico (s)	Plomo (Pb)	Cromo (Cr)	Cobalto (CO)	Cobre (Cu)	Selenio (Se)	Manganeso (Mn)	Vanadio (V)	Estaño (Sn)	Níquel (Ni)	Cloro %	
1	3806	< 5.00	0.09	57.01	2.64	29.01	60.01	21	10	0.17	290.08	35.71	245.07	84.02	0.162	
2	3807	< 5.00	0.1	56.97	3.24	29	54.97	20	10	0.33	289.86	35.68	244.88	82	0.214	
3	3808	< 5.00	< 0.02	121.67	5.22	49.86	296.19	35.9	35	0.29	250.32	106.71	244.33	157.57	0.315	
4	3809	8.22	< 0.02	105.27	4.15	60.16	165.43	34.09	16.04	4.83	463.2	107.28	245.64	133.35	0.158	
5	3810	< 5.00	< 0.02	57.15	3.33	32.08	65.17	31.05	9.02	0.4	324.84	71.18	160.42	88.23	0.312	
6	3811	< 5.00	0.48	57.13	2.85	32.07	75.17	21.05	10.02	0.38	277.64	35.78	245.57	86.2	0.286	
7	3812	< 5.00	0.08	64.23	2.8	32.12	55.2	21.08	10.04	0.24	295.07	35.83	160.58	84.31	0.183	
8	3813	< 5.00	0.09	56.89	3.28	28.95	64.88	20.96	9.98	0.36	289.48	35.63	244.56	81.85	0.233	
9	3814	< 5.00	< 0.02	113.17	5.15	50.07	297.44	34.05	17.62	0.23	478.71	107.16	245.36	156.23	0.318	
10	3815	5.31	< 0.02	105.19	4.9	53.09	160.29	33.06	16.03	2.55	428.79	71.13	326.6	133.24	0.125	
11	3816	< 5.00	< 0.02	57.06	3.09	32.03	55.06	21.02	9.01	0.3	294.3	35.74	326.35	86.09	0.196	
12	3817	3.2	0.43	64.09	3.44	29.04	50.07	21.03	10.01	0.19	269.39	<25.00	245.35	84.12	0.138	
13	3818	2.91	0.09	57.17	5.2	29.09	55.16	23.07	10.03	0.27	324.96	35	245.73	88.26	0.239	
14	3819	< 5.00	0.09	57	2.89	29	65	21.00	10	0.21	341.62	35.8	244.72	88	0.254	
15	3820	5	0.02	112.89	4.33	47	327.67	38	20	0.27	547.45	71.33	325.67	168.83	0.331	
16	3821	6.82	0.02	145.52	3.9	65.23	154.35	34.62	15.96	1.85	371.54	62.22	281.01	130.5	0.163	
17	3822	< 5.00	0.38	100.22	1.83	35.72	61.22	23.42	10.91	0.2	245.58	61.52	277.83	89.3	0.167	
18	3823	< 5.00	0.03	112.18	2.09	42.06	66.8	23.64	11.42	0.14	279.54	31.05	280.45	90.14	0.271	
19	3824	< 5.00	0.09	117.28	2.66	40.05	59.02	22.5	11.63	0.12	264.6	59.12	266.98	85.82	0.147	
20	3825	< 5.00	0.12	110.91	2.51	41.59	70.71	21.59	10.89	0.1	262.13	61.4	277.28	85.16	0.246	
21	3826	< 5.00	0.03	153	3.4	69.18	305.16	37.22	16.66	0.14	420.52	121.79	341.01	155.89	0.309	
22	3827	9.7	0.04	157.06	4.24	85.03	170.67	34.51	19.51	3.73	364.34	94.04	350.14	134.05	0.14	
23	3828	< 5.00	0.05	101.18	1.35	42.87	71.52	23.64	11.02	0.19	253.14	62.11	350.61	88.15	0.153	
24	3829	< 5.00	0.49	112.28	2.5	42.1	71.58	23.66	11.03	0.16	229.17	62.15	280.7	86.21	0.264	
25	3834	< 5.00	0.05	156.49	5.03	63.79	211.81	34.39	17.04	0.12	367.8	61.8	348.87	121.6	0.216	
26	3835	7.28	1.45	31.73	4.84	115.02	56	11.85	30.7	< 0.05	243.3	28.93	<100.00	62.53	0.173	
27	3836	< 5.00	< 0.02	1000	< 0.05	583.31	33.77	5.06	124.37	< 0.05	54.4	29.08	262.63	15.66	0.274	
28	3837	0.013		< 0.10	< 0.0005	< 0.01	< 0.005	< 0.005	0.21	< 0.0005	0.23	< 0.50	< 1.00	< 0.005	0.328	
29	3838		0.064										0.344			
30	3839	< 0.005		0.34	< 0.0005	0.07	< 0.005	< 0.005	0.183	< 0.0005	0.03	< 0.50	< 1.00	< 0.005	0.332	
31	3840		0.048										0.307			
32	3841	0.01		0.34	< 0.0005	< 0.01	< 0.005	< 0.005	0.171	< 0.0005	< 0.005	< 0.50	< 1.00	< 0.005	0.324	
33	3842		0.072										0.312			
34	3843	0.01		0.34	< 0.0005	< 0.01	< 0.005	< 0.005	0.024	< 0.0005	1.32	< 0.50	< 1.00	< 0.005	0.308	
35	3844		0.048										0.375			
36	3845	0.01		0.34	< 0.0005	0.07	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.0005	0.03	< 0.50	< 1.00	< 0.005	0.34	
37	3846		0.052										0.32			
38	3847	0.01		0.34	< 0.0005	< 0.01	< 0.005	0.005	< 0.005	< 0.0005	0.1	0.62	< 1.00	< 0.005	0.334	
39	3848		0.036										0.33			
40	3849	< 1.00	0.69	< 3.00	0.34	26.81	< 1.00	< 1.00	16.5	0.07	20.6	< 3.00	< 5.00	63.25	0.0082	
41	3850	< 1.00	2.04	< 3.00	1.09	28.47	< 1.00	< 1.00	< 1.00	0.07	37.96	226.28	< 5.00	67.15	0.0073	
42	3851	< 1.00	1.97	< 3.00	0.49	27.41	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 0.05	21.08	217.85	< 5.00	117.36	0.0076	
43	3852	< 1.00	3.78	< 3.00	4.1	95.62	< 1.00	< 1.00	< 1.00	0.96	24.11	249.1	< 5.00	< 1.00	0.0054	
44	3853	< 1.00	1.12	< 3.00	0.67	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 0.05	16.42	235.83	< 5.00	< 1.00	0.0061	
45	3854	< 1.00	1.93	< 3.00	0.55	82.27	< 1.00	< 1.00	25.58	< 0.05	15.21	< 3.00	< 5.00	< 1.00	0.0069	

Tabla 6: Resultados Analíticos de Metales Pesados por Eventos de la Prueba

CORRIENTES	Cd	Hg	Sb	As	Pb	Cr ppm	Co	Cu	Se	Mn	V	Sn	Ni	Cl %	Hum Mj/Kg %
Molino de crudo:															
Lodos:3T/hr	< 5.0	0.09	57.01	2.64	29.01	60.01	21.00	10.00	0.17	290.08	35.71	245.07	84.02	0.16	
Lodos :6 T/hr	< 5.0	0.08	64.23	2.80	32.12	55.20	21.08	10.04	0.24	295.07	35.83	160.58	84.31	0.18	
Sól. Impreg.	2.91	0.09	57.17	5.20	29.09	55.16	23.07	10.03	0.27	324.96	35.00	245.73	88.26	0.24	
Blanco	< 50	0.09	117.28	2.66	40.05	59.02	22.50	11.63	0.12	264.60	59.12	266.98	85.82	0.15	
Alimentación horno:															
Lodos: 3 T/hr	< 5.0	0.10	56.97	3.24	29.00	54.97	20.00	10.00	0.33	289.86	35.68	244.88	82.00	0.21	
Lodos: 6 T/hr	< 5.0	0.09	56.89	3.28	28.95	64.88	20.96	9.98	0.36	289.48	35.63	244.56	81.85	0.23	
Sól. Impreg.	< 5.0	0.09	57.00	2.89	29.00	65.00	21.00	10.00	0.21	341.62	35.80	244.72	88.00	0.25	
Blanco	< 5.0	0.12	110.91	2.51	41.59	70.71	21.59	10.89	0.10	262.13	61.40	277.28	85.16	0.25	
Clinker:															
Lodos: 3 T/hr	< 5.0	< 0.02	121.67	5.22	49.86	296.19	35.90	35.00	0.29	250.32	106.71	244.33	157.57	0.32	
Lodos:6 T/hr	< 5.0	< 0.02	113.17	5.15	50.07	297.44	34.05	17.62	0.23	478.71	107.16	245.36	156.23	0.32	
Sól. Impreg.	5.00	0.02	112.89	4.33	47.00	327.67	38.00	20.00	0.27	547.45	71.33	325.67	168.83	0.33	
Blanco	< 5.0	0.03	153.00	3.40	69.18	305.16	37.22	16.66	0.14	420.52	121.79	341.01	155.89	0.31	
Poivo Etapa IV:															
Lodos:3 T/hr	< 5.0	< 0.02	105.27	4.15	60.16	165.43	34.09	16.04	4.83	463.20	107.28	245.64	133.35	0.16	
Lodos:6 T/hr	5.31	< 0.02	105.19	4.90	53.09	160.29	33.06	16.03	2.55	428.79	71.13	326.60	133.24	0.13	
Sól. Impreg.	6.82	0.02	145.52	3.90	65.23	154.35	34.62	15.96	1.85	371.54	62.22	281.01	130.50	0.16	
Blanco	9.70	0.04	157.06	4.24	85.03	170.67	34.51	19.51	3.73	364.34	94.04	350.14	134.05	0.14	
Poivo Etapa II:															
Lodos:3T/hr	< 5.0	< 0.02	57.15	3.33	32.08	65.17	31.05	9.02	0.40	324.84	71.18	160.42	88.23	0.31	
Lodos: 6 T/hr	< 5.0	< 0.02	57.06	3.09	32.03	55.06	21.02	9.01	0.30	294.30	35.74	326.35	86.09	0.20	
Sól. Impreg.	< 5.0	0.38	100.22	1.83	35.72	61.22	23.42	10.91	0.20	245.58	61.52	277.83	89.30	0.17	
Blanco	< 5.0	0.05	101.18	1.35	42.87	71.52	23.64	11.02	0.19	253.14	62.11	350.61	88.15	0.15	
Poivo del filtro:															
Lodos: 3 T/hr	< 5.0	0.48	57.13	2.85	32.07	75.17	21.05	10.02	0.38	277.64	35.78	245.57	86.20	0.29	
Lodos: 6 T/hr	3.20	0.43	64.09	3.44	29.04	50.07	21.03	10.01	0.19	269.39	25.00	245.35	84.12	0.14	
Sól. Impreg.	< 5.0	0.03	112.18	2.09	42.06	66.80	23.64	11.42	0.14	279.54	31.05	280.45	90.14	0.27	
Blanco	< 5.0	0.49	112.28	2.50	42.10	71.58	23.66	11.03	0.16	229.17	62.15	280.70	86.21	0.26	
Recortes	7.28	1.45	31.73	4.84	115.02	56.00	11.85	30.70	< 0.05	243.30	28.93	100.00	62.53	0.17	52.30 7.43
Sól. Impreg.	< 5.0	< 0.02	1000	0.05	583.31	33.77	5.06	124.37	0.05	54.40	29.08	262.63	15.66	0.27	47.80 34.34
Cem c/lodos: 6 T/hr	< 5.0	0.05	156.49	5.03	63.79	211.81	34.39	17.04	0.12	367.80	61.80	348.87	121.60	0.22	

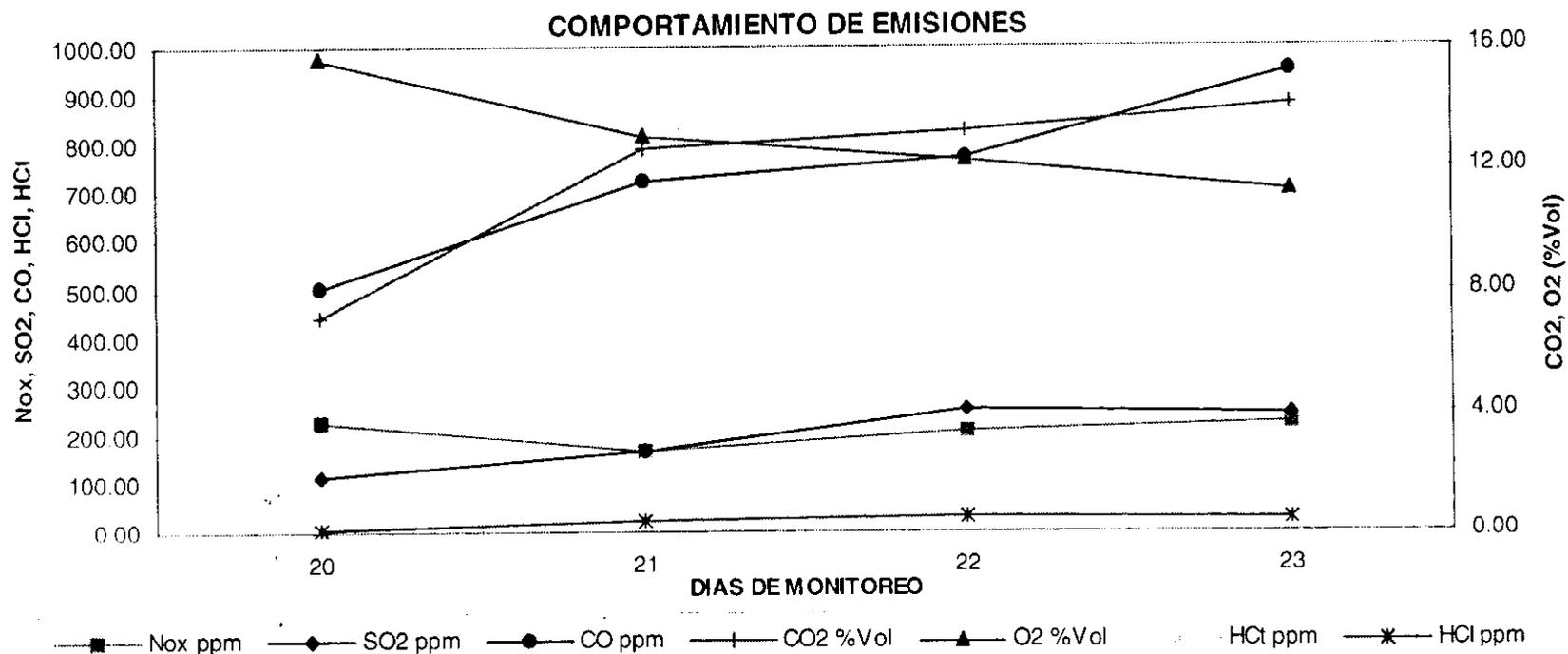
Tabla 7. Resultados de análisis químicos. Laboratorio de Apasco, Macuspana

Condición	Día	Composición química %								
		P. lg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Crudo:										
Lodos: 3T/hr	20.08.97	35.9	13.2	3.8	1.9	42.0	1.7	0.6	0.4	0.4
Lodos: 6 T/hr	21.08.97	35.9	13.5	3.9	1.9	42.2	1.7	1.0	0.4	0.2
Sól. Imp.: 0.096 T/hr	22.09.97	34.9	13.8	3.9	2.0	42.0	1.9	0.8	0.5	0.2
Blanco	23.09.97	35.4	13.3	3.8	1.9	42.4	1.8	0.9	0.4	0.3
Alimentación a horno:										
Lodos: 3 T/hr	20.08.97	35.6	13.4	3.8	1.8	41.3	1.7	0.9	0.4	0.4
Lodos: 6 T/hr	21.08.97	35.8	13.4	3.9	1.9	41.9	1.7	0.8	0.4	0.2
Sól. Imp.: 0.096 T/hr	22.09.97	36.0	13.3	3.8	1.9	41.8	1.8	0.8	0.4	0.2
Blanco	23.09.97	35.7	13.2	3.8	1.9	41.5	1.8	1.0	0.4	0.2
Recortes de perforación:										
Pozo: Cactus 67	20.08.97	25.4	41.0	9.7	3.8	9.2	2.1	5.2	1.8	1.6
POZO: Iride 1164	21.08.97	18.6	43.7	10.9	5.0	10.2	5.1	3.5	1.8	0.4
Poivo electrofiltro:										
Lodos: 3 T/hr	20.08.97	36.4	11.4	3.6	1.8	42.8	1.7	0.9	0.4	0.3
Lodos: 6 T/hr	21.08.97	36.1	12.0	3.7	1.8	42.9	1.7	1.1	0.4	0.2
Sól. Imp.: 0.096 T/hr	22.09.97	35.6	12.7	3.9	1.9	41.7	1.9	0.5	1	0.1
Blanco	23.09.97	35.4	12.3	3.8	1.9	43.2	1.8	1.1	1.4	0.2
Clinker:										
Lodos: 3 T/hr	20.08.97	0.4	20.9	6.0	2.9	64.8	2.7	0.9	0.8	0.6
Lodos: 6 T/hr	21.08.97	0.3	20.7	6.1	3.0	64.6	2.7	0.9	0.7	0.3
Sól. Imp.: 0.096 T/hr	22.09.97	0.2	20.9	6.0	2.9	65.3	2.8	0.9	0.7	0.3
Blanco	23.09.97	0.2	20.6	6.1	3.0	65.1	2.7	0.8	0.7	0.4

Tabla 8. Características de los lodos de perforación alimentados durante las pruebas en la planta de cementos Macuspana

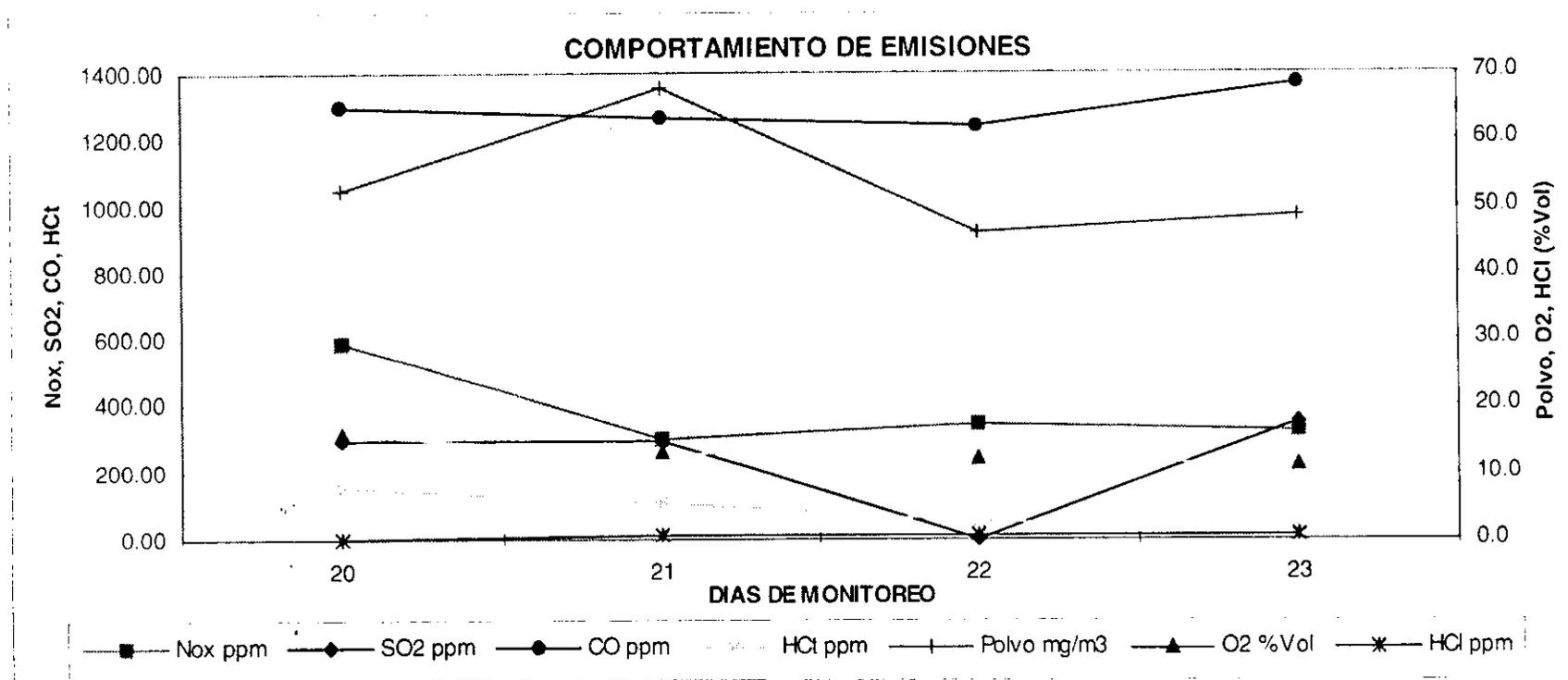
Pozo	Base aceite						Base agua		
	Sen 63	Iride 1164	Tecomate 1	Sen 47	Cactus 67	Prom.	Ribereño 1	Ribereño 1	Prom.
P-Ig	25.80	18.60	20.10	24.70	25.40	22.92	32.00	27.20	29.60
SiO ₂	33.60	43.70	38.80	35.50	41.00	38.52	34.70	40.20	37.45
Al ₂ O ₃	8.40	10.90	11.60	8.90	9.70	9.90	6.80	6.20	6.50
Fe ₂ O ₃	3.80	5.00	4.40	3.30	3.80	4.06	2.30	2.50	2.40
CaO	14.70	10.20	16.00	15.00	9.20	13.02	7.40	9.20	8.30
MgO	4.10	5.10	2.90	3.80	2.10	3.60	2.10	2.00	2.05
SO ₃	6.30	3.50	4.10	5.70	5.20	4.96	9.40	9.10	9.25
K ₂ O	1.40	1.80	1.90	1.50	1.80	1.68	1.10	0.90	1.00
Na ₂ O	1.40	0.36	0.34	1.60	1.55	1.05	3.50	2.30	2.90
balance									
Suma	99.50	99.16	100.14	100.00	99.75	99.71	99.30	99.60	99.45
Humedad	11.30	10.80	10.20	12.50	10.80	11.12	25.80	30.90	28.35

Gráfica 1. Comportamiento de emisiones por chimenea



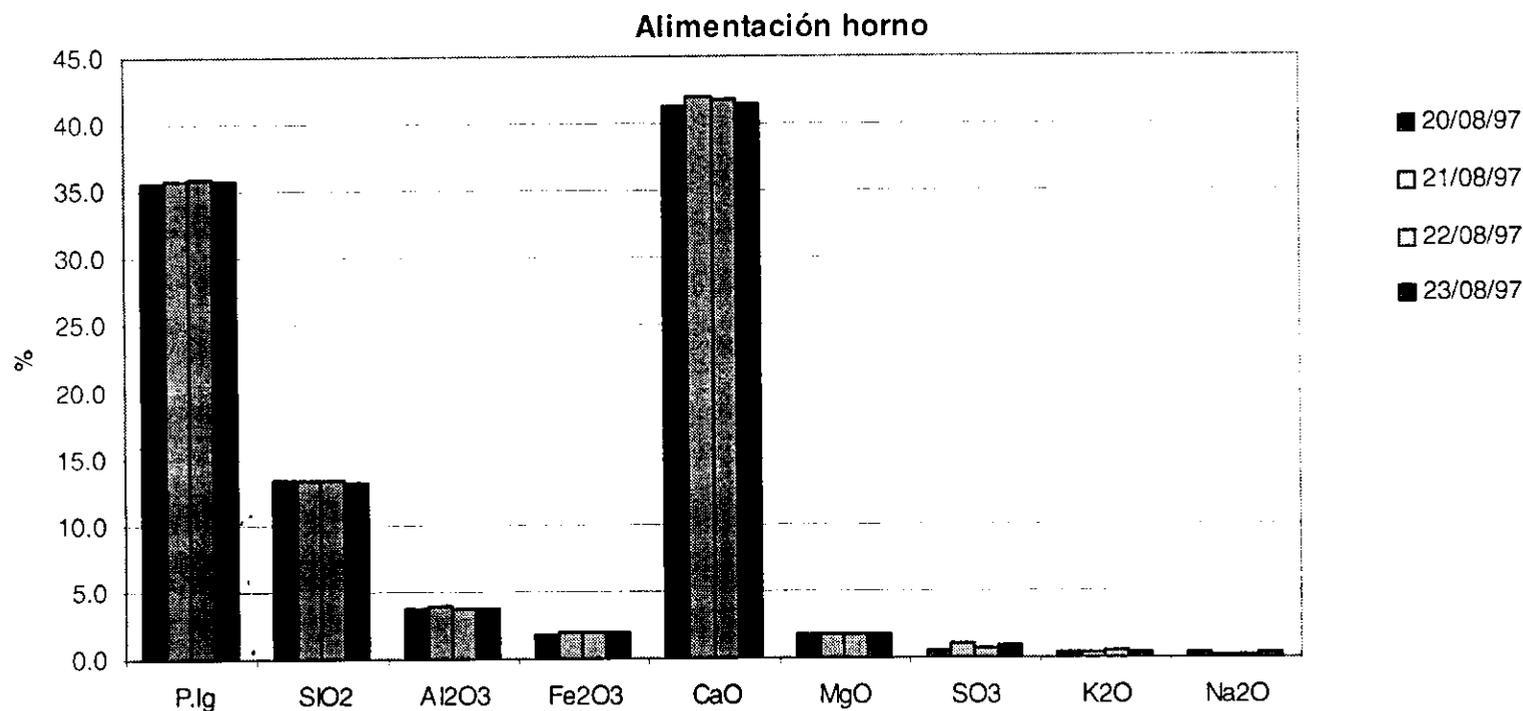
GRAFICA 1: CONDICIONES DE CHIMENEA				MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997				
Día	Condición	Nox ppm	SO2 ppm	CO ppm	CO2 %Vol	O2 %Vol	HCl ppm	HCl ppm
8.97								
20	Lodos: 3 T/h	225.47	114.66	500.79	7.09	15.61	58.15	0.053
21	Lodos: 6 T/h	167.70	167.21	725.53	12.67	13.11	60.08	0.378
22	Sól. Imp.: 0.096 T/h	206.75	251.73	773.85	13.27	12.28	30.15	0.496
23	Blanco	225.48	244.24	949.84	14.11	11.28	28.58	0.441

Gráfica 2. Comportamiento de emisiones por chimenea en seco



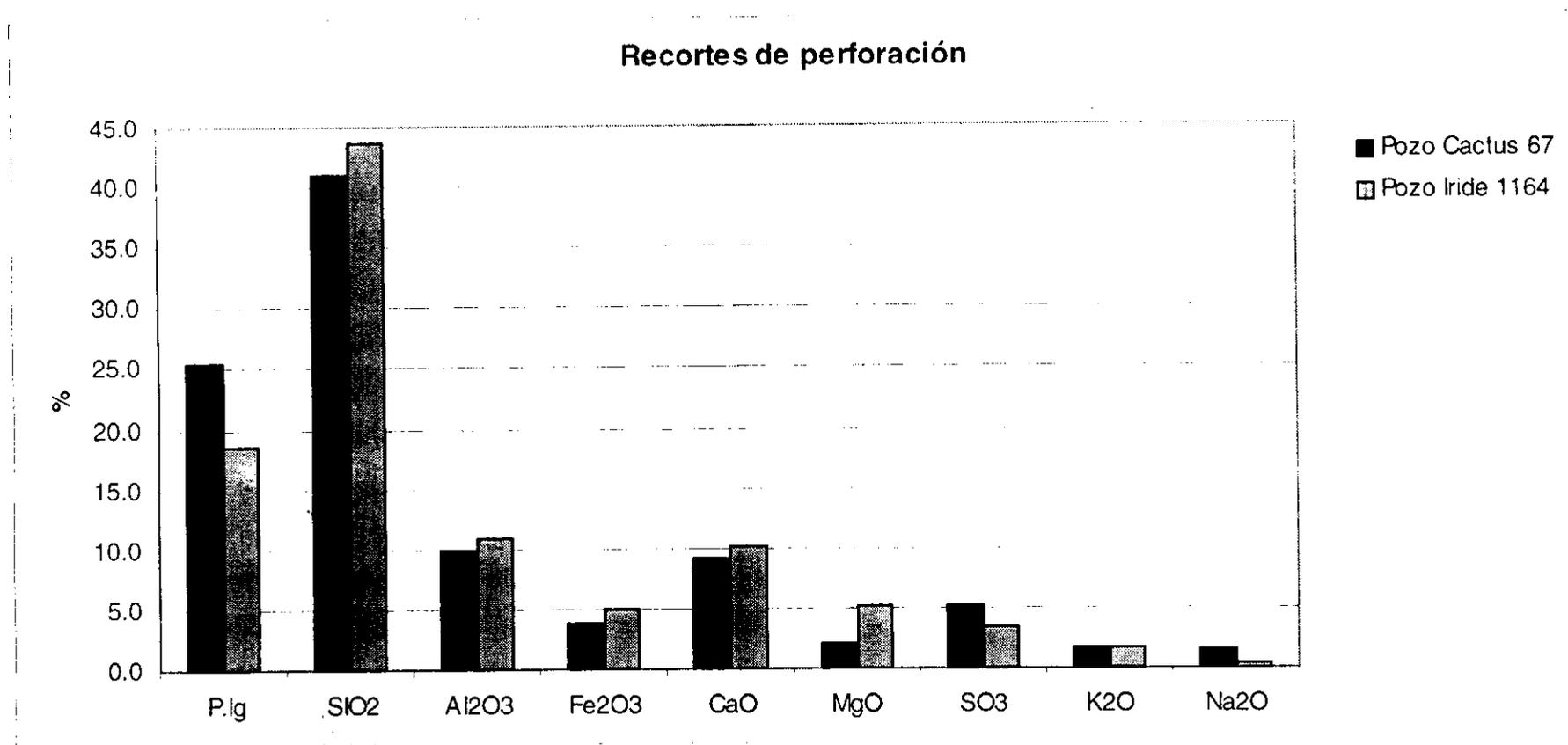
GRAFICA 2: Condiciones: 7% O2, 25°C, 1 ATM, secos				MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997				
Día	Condición	Nox ppm	SO2 ppm	CO ppm	Polvo mg/m3	O2 %Vol	HCl ppm	HCl ppm
8.97								
20	Lodos: 3 T/h	589.90	294.57	1300.8	52.5	15.61	151.04	0.1377
21	Lodos: 6 T/h	297.82	296.43	1267.4	67.8	13.11	106.61	0.6707
22	Sól.Imp.:0.096 T/h	345.35	4.6.83	1242.4	45.9	12.28	48.40	0.7963
23	Blanco	326.32	349.52	1368.1	48.7	11.28	41.19	0.6352

Gráfica 3. Análisis químico de alimentación al horno



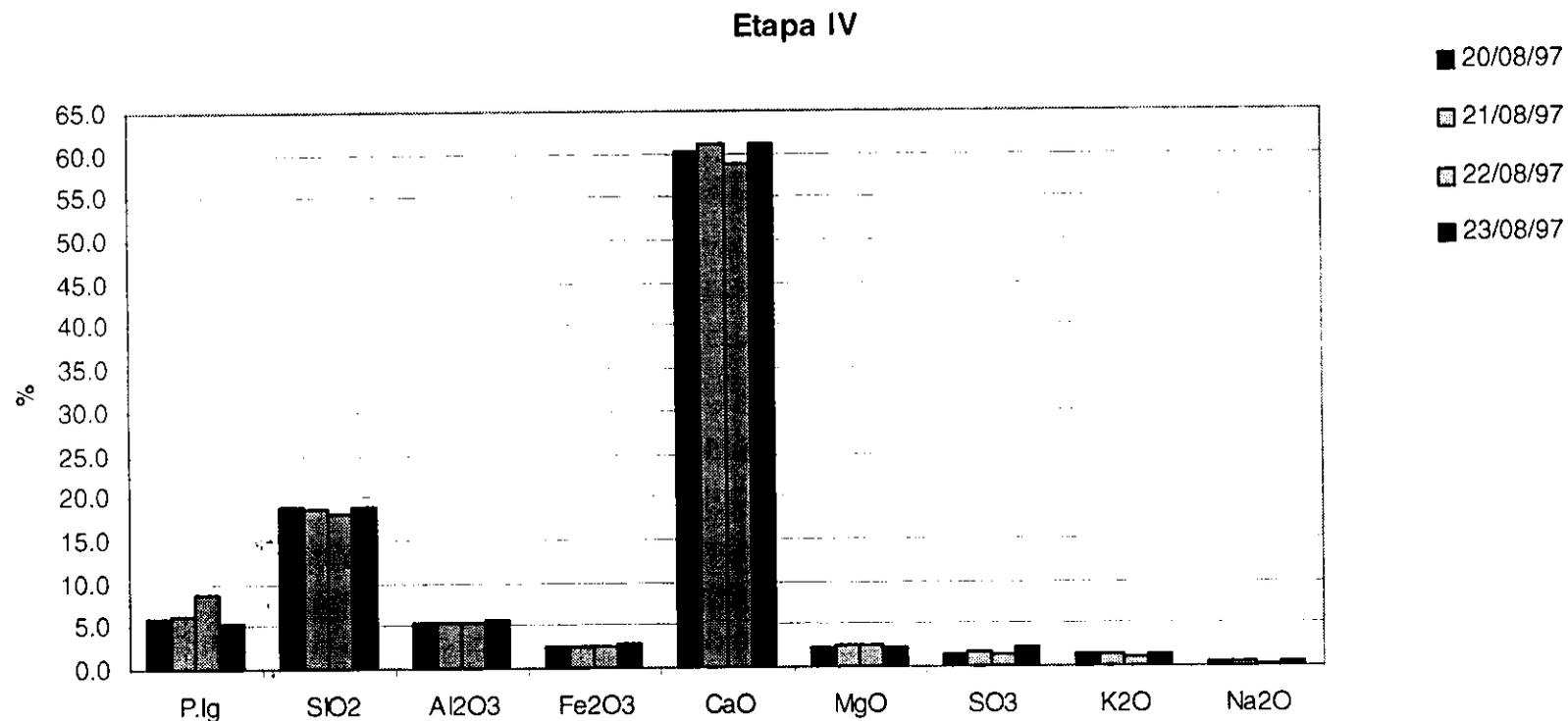
Alimentación a horno					MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997					
Condición	Día	P.lg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Lodos: 3 T/h	20/08/97	35.6	13.4	3.8	1.8	41.3	1.7	0.6	0.4	0.4
Lodos: 6 T/h	21/08/97	35.8	13.4	3.9	1.9	41.9	1.7	1.0	0.4	0.2
Sól.Imp.:0.096 T/h	22/08/97	36.0	13.3	3.8	1.9	41.8	1.8	0.8	0.5	0.2
Blanco	23/08/97	35.7	13.2	3.8	1.9	41.5	1.8	0.9	0.4	0.3

Gráfica 4. Análisis químicos de recortes de perforación



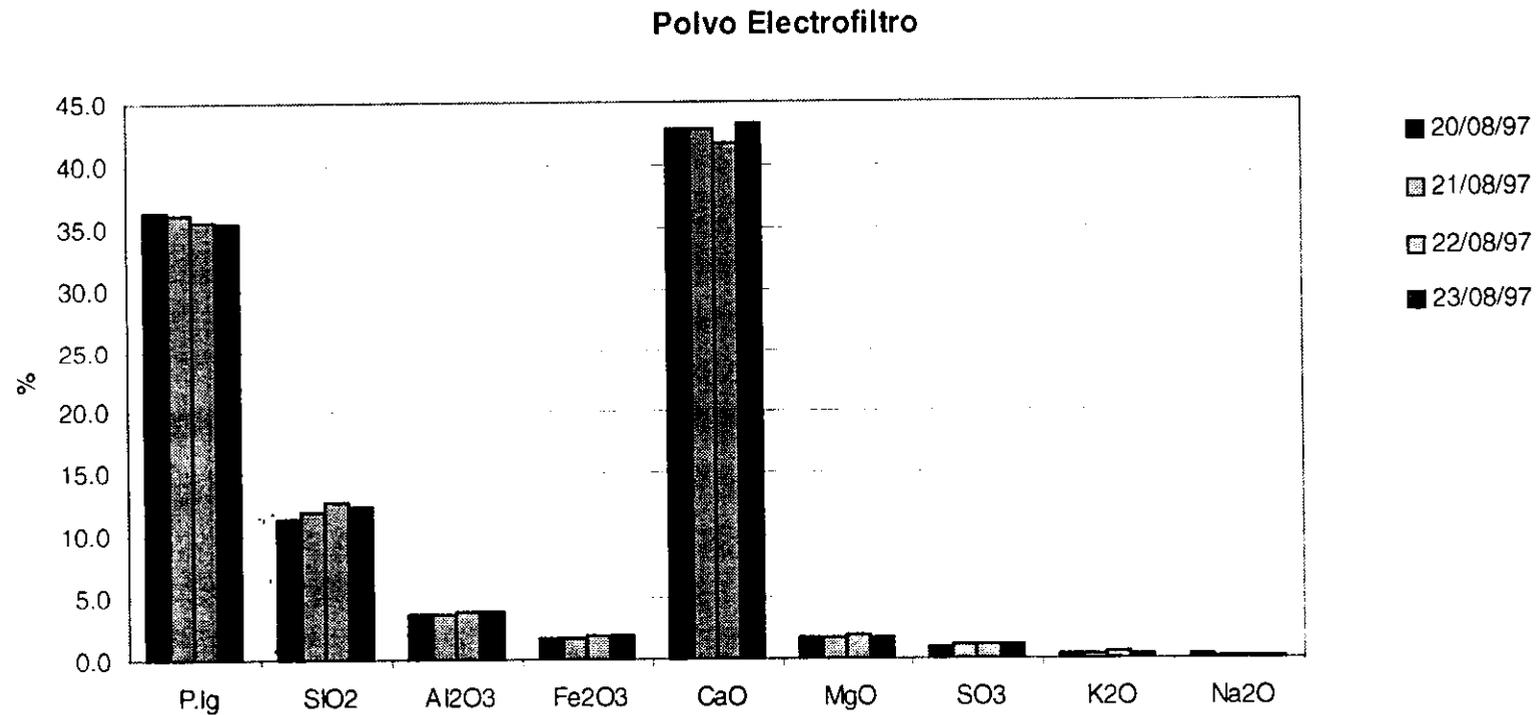
Recortes de perforación					MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997					
Condición	Día	P.lg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Pozo Cactus 67	20/08/97	25.4	41.0	9.7	3.8	9.2	2.1	5.2	1.8	1.6
Pozo Iríde 1164	21/08/97	18.6	43.7	10.9	5.0	10.2	5.1	3.5	1.8	0.4

Gráfica 5. Análisis químico de etapa IV



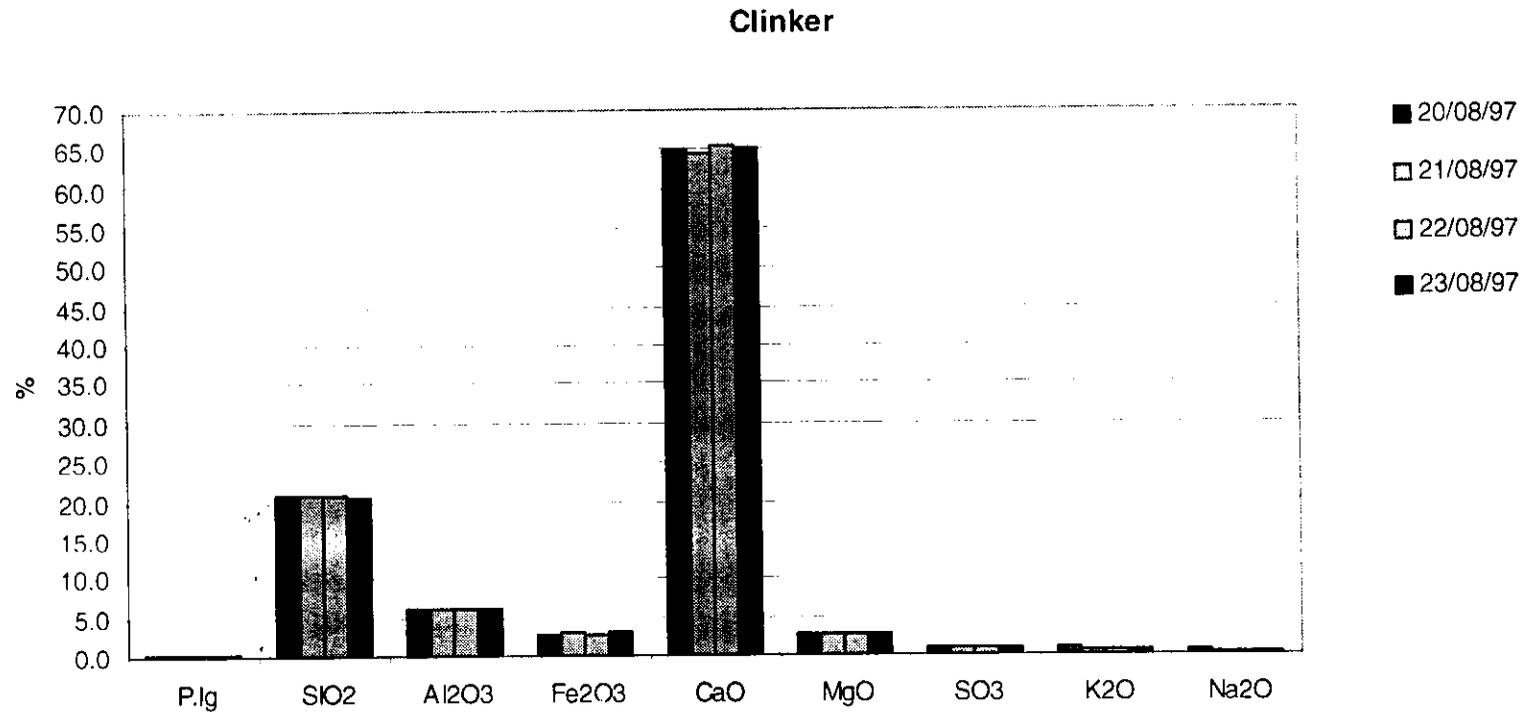
Etapa IV					MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997					
Condición	Día	P.lg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Lodos: 3 T/h	20/08/97	6.0	19.0	5.4	2.6	60.1	2.4	1.5	1.5	0.6
Lodos: 6 T/h	21/08/97	6.2	18.7	5.5	2.6	61.0	2.6	1.8	1.3	0.5
Sól.Imp.:0.096 T/h	22/08/97	8.8	18.2	5.3	2.6	58.8	2.5	1.5	1.1	0.3
Blanco	23/08/97	5.4	18.9	5.6	2.7	61.0	2.4	2.3	1.4	0.5

Gráfica 6. Análisis químico de polvo electrofiltro



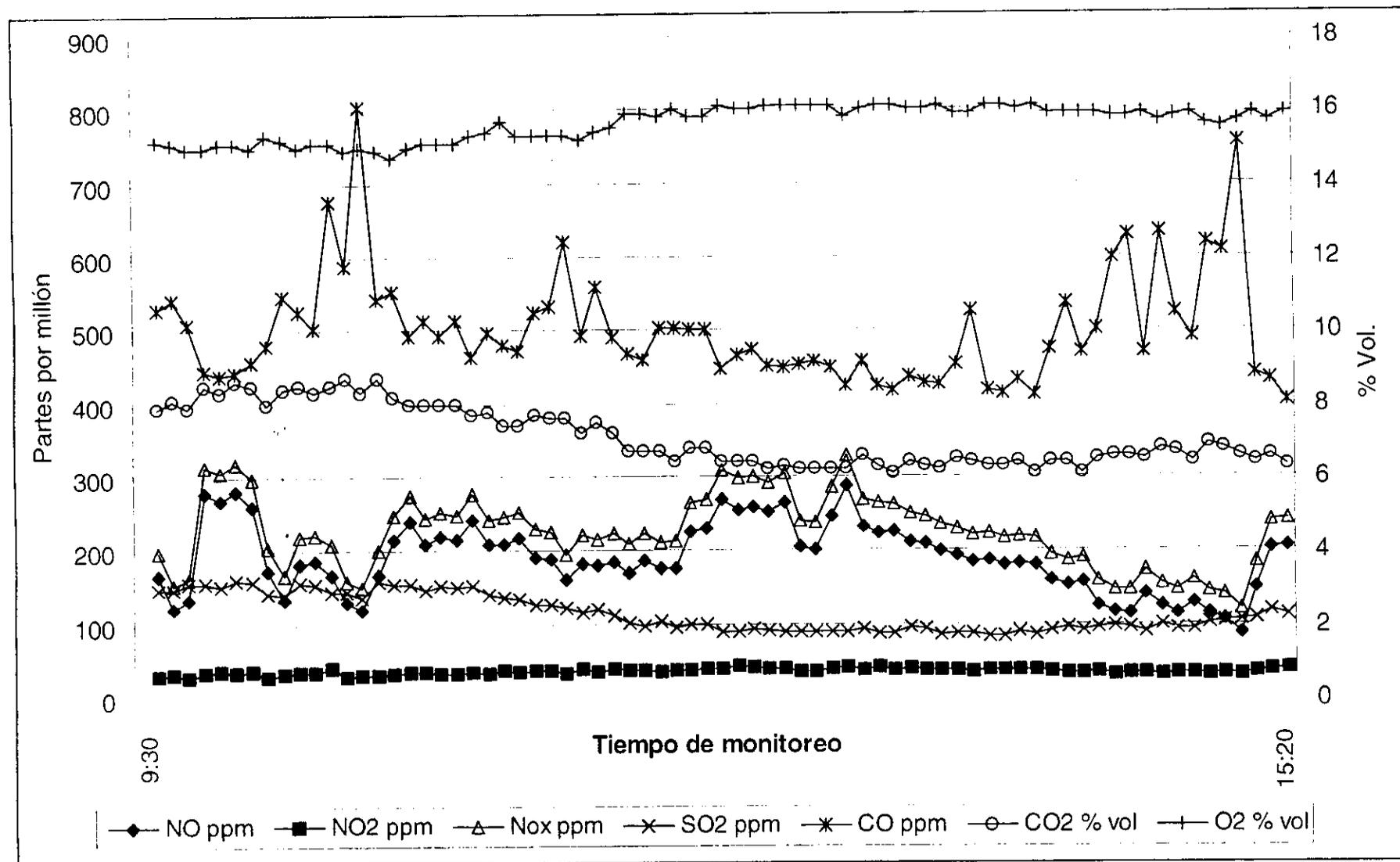
Polvo Electrofiltro					MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997					
Condición	Día	P.lg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Lodos: 3 T/h	20/08/97	36.4	11.4	3.6	1.8	42.8	1.7	0.9	0.4	0.3
Lodos: 6 T/h	21/08/97	36.1	12.0	3.7	1.8	42.9	1.7	1.1	0.4	0.2
Sól. Imp.: 0.096 T/h	22/08/97	35.6	12.7	3.9	1.9	41.7	1.9	1.1	0.5	0.1
Blanco	23/08/97	35.4	12.3	3.8	1.9	43.2	1.8	1.1	0.4	0.2

Gráfica 7. Análisis químico de clinker

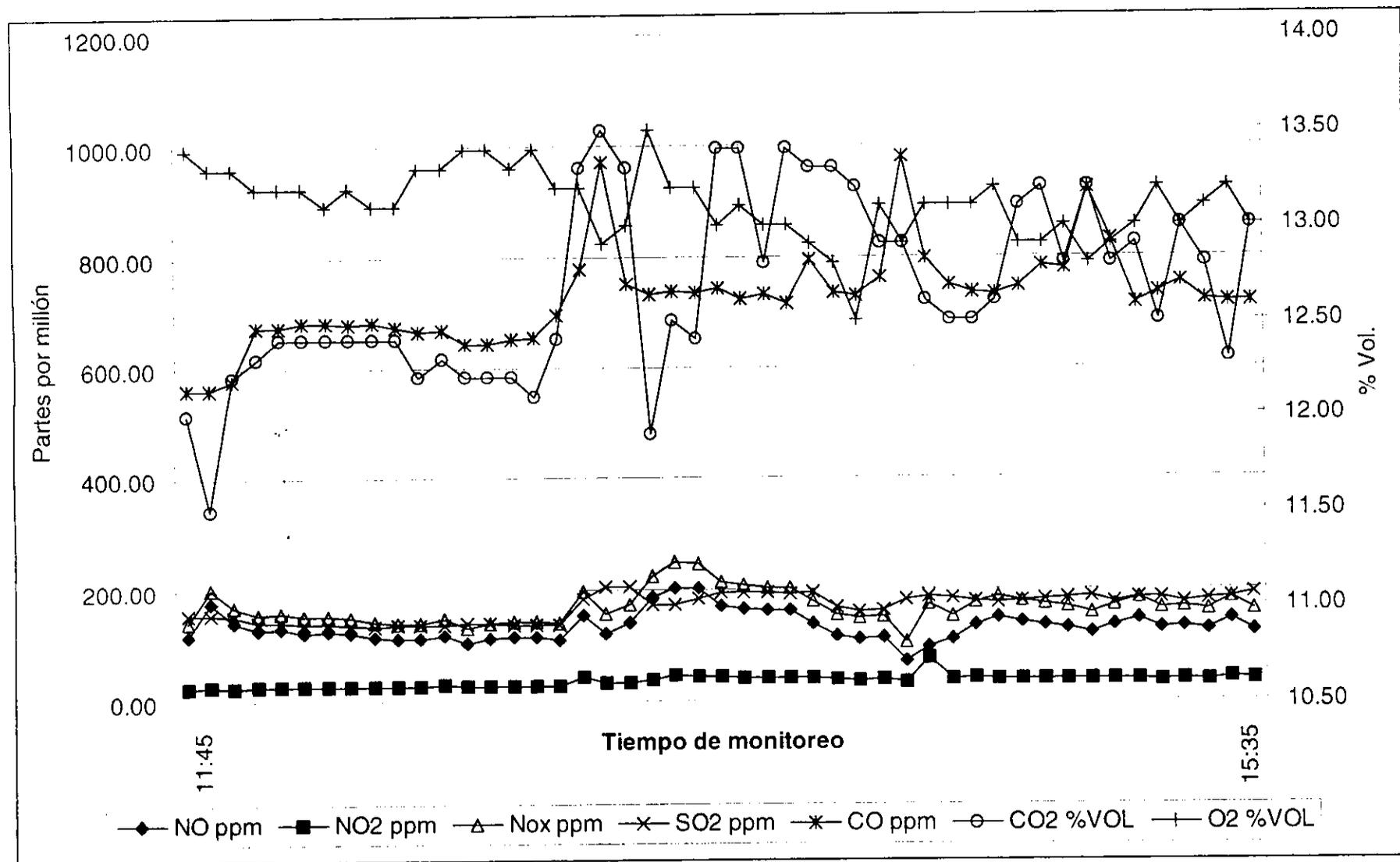


Clinker					MACUSPANA, TABASCO, AGOSTO 1997					
Condición	Día	P.lg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Lodos: 3 T/h	20/08/97	0.4	20.9	6.0	2.9	64.8	2.7	0.9	0.8	0.6
Lodos: 6 T/h	21/08/97	0.3	20.7	6.1	3.0	64.5	2.7	0.9	0.7	0.3
Sól.imp.:0.096 T/h	22/08/97	0.2	20.9	6.0	2.9	65.3	2.8	0.9	0.7	0.3
Blanco	23/08/97	0.2	20.6	6.1	3.0	65.1	2.7	0.8	0.7	0.4

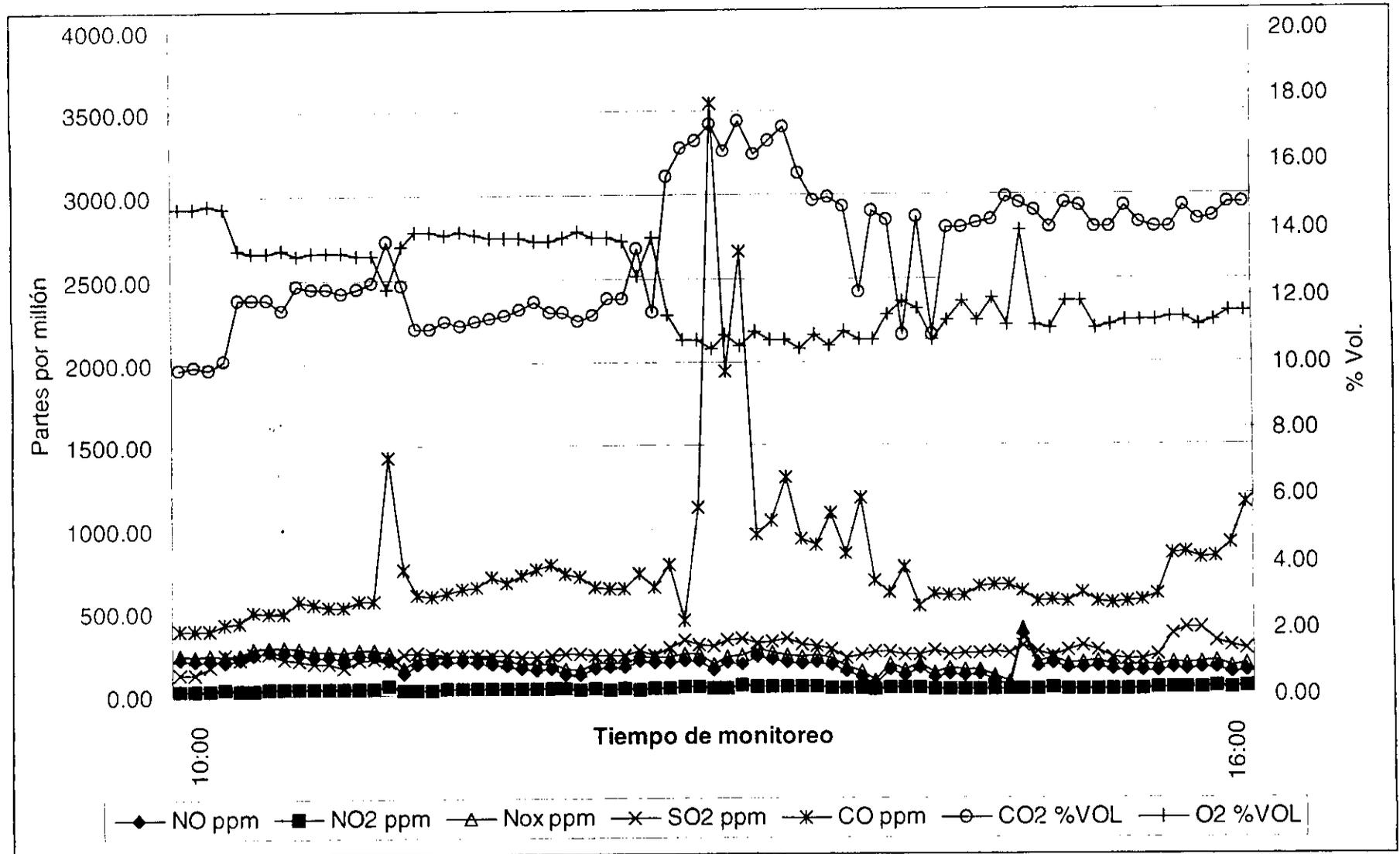
Gráfica 8. Comportamiento de emisiones en la prueba del 20 de agosto, 1997



Gráfica 9. Comportamiento de emisiones en la prueba del 21 de agosto, 1997



Gráfica 10. Comportamiento de emisiones en la prueba del 22 de agosto, 1997



Gráfica 11. Comportamiento de emisiones en la prueba del 23 de agosto, 1997

