



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

## **“ANÁLISIS DE VENTEOS DEL COMPLEJO GEOTERMOELÉCTRICO CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA

**Q. LUIS ANGEL FRANCO ARZATE**

TUTOR: DR. OSCAR AUGUSTO PERALTA ROSALES

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

**MÉXICO D.F MAYO 2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Dr. Youri Tarán  
**VOCAL:** Dr. Rafael Navarro González  
**VOCAL:** Dra. Araceli Patricia Peña Álvarez  
**VOCAL:** Dra. Telma Gloria Castro Romero  
**SECRETARIA:** Dra. María del Pilar Cañizares Macías

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO DE AEROSOLES ATMOSFÉRICOS, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA,  
CIUDAD UNIVERSITARIA.**

**TUTOR DE TESIS:**

**ÓSCAR AUGUSTO PERALTA ROSALES**

\_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

**LUIS ÁNGEL FRANCO ARZATE**

\_\_\_\_\_

*Para mi abuelita*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, quienes se encargan de guiarnos desde que somos niños, para que logremos cualquier meta que nos planteemos durante la vida. Esta es una más de todas las metas que vienen por delante.

**Genaro Franco Rincón y Maribel Arzate Solorio**

A mis hermanas, ellas son mis amigas de toda la vida, las veo crecer y me alegro que son grandes personas, capaces de superar todo.

**Marisol Franco Arzate, Sandra Maribel Franco Arzate y Selene Franco Arzate**

A mi novia, esa persona que completa tu alma e impulsa tus sueños, que hace tu día ordinario en extraordinario, esa persona eres tú.

**Patricia Elizabeth Estañol Díaz**

A mis amigos, son personas que te apoyan en todo momento, y siempre están ahí para escuchar.

**Ulises Jiménez Castillo, Alberto Fernández Alarcón, Francisco Méndez Alva, Joel Jovani Perea Zurita y Enrique Olvera Martínez**

A mi tutor, la persona que me permitió entrar a un grupo de personas, sus consejos y apoyo me permitieron dar un paso más.

**Óscar Augusto Peralta Rosales**

Al H. Jurado, por las aportaciones y los valiosos comentarios que enriquecieron este trabajo.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO por todas las oportunidades que me ha brindado desde hace ya 12 años.

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA por el apoyo económico proporcionado para el desarrollo y conclusión de este trabajo (Número de Becario 288998).

Al grupo de Aerosoles Atmosféricos del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

## **PRESENTACIÓN DE TRABAJO (MODALIDAD CARTEL)**

Franco L., Peralta O., Castro Telma., Terán Yuri., Bernard R., Inguaggiato S., Navarro R., Saavedra I. (2014). H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> emissions from Cerro Prieto geothermal power plant, Mexico. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2014. Viena, Austria del 27 de abril al 2 de mayo del 2014.

# ÍNDICE

<b>1. RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
3.1. <i>Ubicación y Distribución del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto</i> .....	<b>5</b>
3.2. <i>Tipos de Plantas en Cerro Prieto</i> .....	<b>7</b>
3.2.1. <i>Planta Tipo Flash Simple</i> .....	<b>8</b>
3.2.2. <i>Planta Tipo Flash Doble</i> .....	<b>9</b>
3.3. <i>Tipos de Sistemas Geotérmicos</i> .....	<b>10</b>
3.4. <i>El origen del Agua, Gases y Sales en Cerro Prieto</i> .....	<b>12</b>
3.5. <i>Interacción Gases-Agua-Rocas</i> .....	<b>13</b>
3.5.1. <i>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</i> .....	<b>13</b>
3.5.2. <i>Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)</i> .....	<b>14</b>
3.5.3. <i>Metano (CH<sub>4</sub>)</i> .....	<b>14</b>
3.5.4. <i>Hidrocarburos (C<sub>2</sub> a C<sub>8</sub>)</i> .....	<b>15</b>
<b>4. ANTECEDENTES</b> .....	<b>16</b>
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	<b>24</b>
5.1. <i>Objetivo General</i> .....	<b>24</b>
5.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	<b>24</b>
<b>6. HIPÓTESIS</b> .....	<b>25</b>
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	<b>26</b>
7.1. <i>Recolección de Muestras</i> .....	<b>26</b>
7.2. <i>Análisis de Muestras</i> .....	<b>29</b>
<b>8. RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
8.1. <i>Parámetros básicos de los Ductos</i> .....	<b>33</b>
8.2. <i>Concentración de Gases en Venteos</i> .....	<b>39</b>
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	<b>55</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>57</b>



<b>ANEXO 1: CONCENTRACIÓN GASES EN VENTEOS .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO 2: CROMATOGRAMAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO 3: ESPECTROS DE MASAS .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO 4: CURVAS DE CALIBRACIÓN.....</b>	<b>93</b>

## 1. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar los flujos y la composición de los gases que emite la planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto en Baja California; esto se obtuvo recolectando muestras de los ductos de venteo de las 6 unidades, los gases se determinaron utilizando la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Este análisis nos indicó que los gases más abundantes son  $N_2$  (19 a 36 %mol),  $O_2$  (9 a 24 %mol),  $CO_2$  (34 a 61 %mol),  $H_2S$  (1 a 9 %mol),  $CH_4$  (1 a 4 %mol) y benceno (0 a 3 %mol).

Se determinó también en este estudio que la emisión de  $CO_2$  en la Geotermoeléctrica de Cerro Prieto con capacidad de 570 MW la cual produce 1016 ton/día y 906 ton/día en el año 2012 y en el 2013 respectivamente; por lo tanto una planta termoeléctrica contamina en mayor cantidad comparada con una planta geotermoeléctrica, por ejemplo la planta de combustóleo de Salamanca en Guanajuato con una capacidad de 560 MW produce al día 5820 t/día de  $CO_2$ , otra planta de gas y combustóleo "El Sauz" en Querétaro con capacidad de 610 MW produce 5505 t/día (Arellano, 2008).

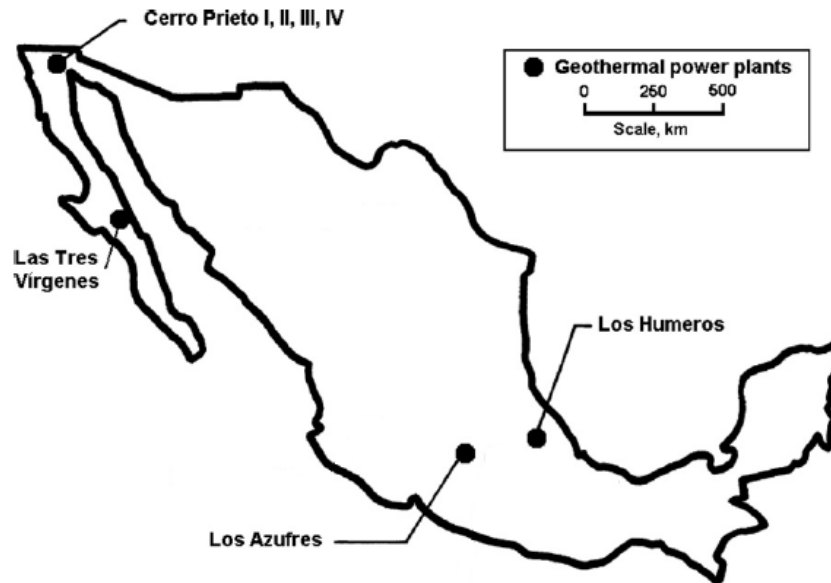
## 2. INTRODUCCIÓN

En general, la palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la Tierra. En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos.

El calor que se encuentra en el interior del planeta es una energía duradera. A diferencia de las energías eólica y solar, es constante e independiente de las estaciones del año y las condiciones climatológicas. Se le considera energía renovable puesto que el calor del planeta es ilimitado comparado con la estancia de los humanos en la Tierra, la temperatura subterránea del planeta disminuye 130 °C cada mil millones de años, por lo tanto la energía geotérmica estará disponible por muchas generaciones (Arellano, 2008).

Aún cuando la geotermia ha existido siempre, no fue sino hasta principios del siglo pasado que empezó a dársele uso en forma comercial, haciéndose notoria su existencia hace apenas cuatro décadas. En los años 70's con el incremento en el costo de los combustibles fósiles se le dio una importancia relevante, ayudando a suministrar parte de los requerimientos de energía de muchos países.

México tiene una capacidad total de 953 MW, ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en generación de electricidad. Esta capacidad está distribuida en cuatro plantas geotermoeléctricas: Cerro Prieto en Baja California con una capacidad máxima de 720 MW, Los Azufres en Michoacán con una capacidad instalada de 193 MW, Los Humeros en Puebla con una capacidad de 30 MW y la planta Tres Vírgenes en Baja California Sur con 10 MW de capacidad. (Barrenechea, 2013) La Figura 1 muestra las ubicaciones de las plantas geotérmicas en México.



***Figura 1: Ubicación de plantas geotérmicas en México.***

La energía geotérmica se considera una fuente de energía limpia. Si se toman las medidas apropiadas para su explotación, el impacto ambiental de los desarrollos geotérmicos se puede eliminar casi completamente; por ejemplo en la Planta Geotermoeléctrica de Los Azufres en Michoacán, la cual se encuentra ubicada dentro del Parque Los Azufres en la Sierra de San Andrés y está rodeado de una zona de bosque de 81 km<sup>2</sup> aproximadamente, en este caso no hay poblaciones cercanas. El bosque ayuda a reducir el impacto ambiental producido por el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S principalmente ya que estos captan parte de estos gases (Mendoza y Hernández, 2004).

Todo lo contrario sucede en Cerro Prieto ya que esta planta se encuentra en una zona plana semidesértica rodeada por ejidos, y por lo tanto existe un problema de contaminación a las comunidades aledañas al complejo, principalmente de H<sub>2</sub>S y de los hidrocarburos emitidos por la planta.

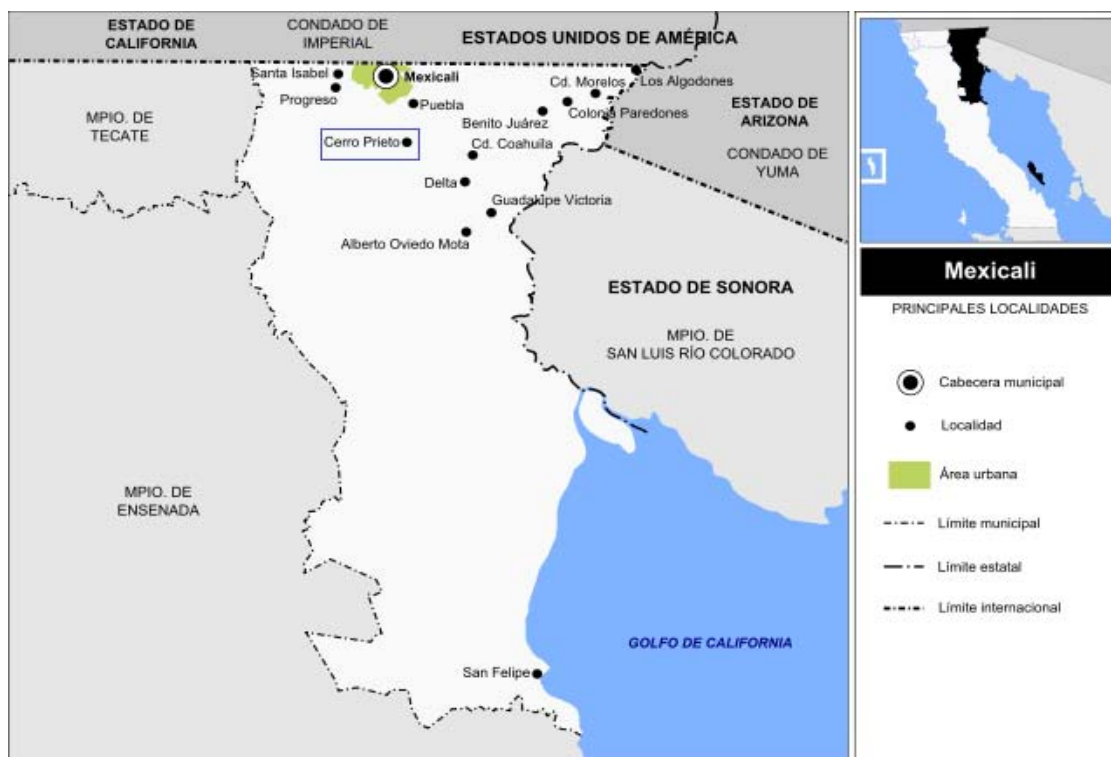
Las plantas geotermoeléctricas generan aproximadamente un sexto del CO<sub>2</sub> que producen las plantas que queman gas natural y prácticamente no producen óxidos de nitrógeno o de azufre. Cada 1,000 MW generados con geotermia evitan la emisión anual a la

atmósfera de aproximadamente 860 toneladas de diversas partículas contaminantes y de 3.5 millones de toneladas de dióxido de carbono de las plantas que queman gas (Barrenechea, 2013).

### 3. MARCO TEÓRICO

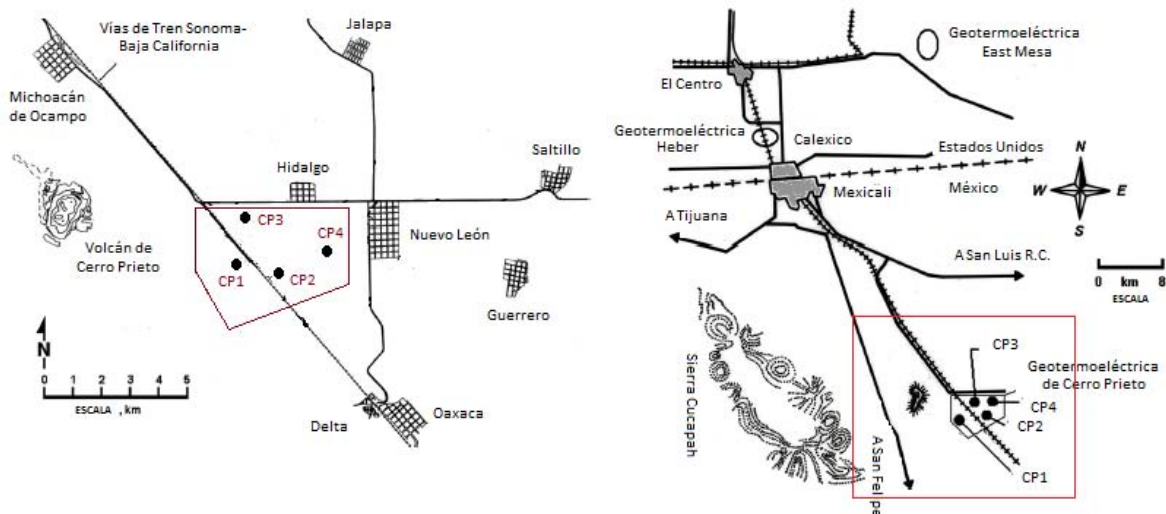
#### 3.1. Ubicación y Distribución del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto

El Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto se ubica en la región del valle de Mexicali dentro del municipio de Mexicali en el extremo noreste del estado de Baja California y colinda al norte con el condado Imperial de California y al noreste con el condado de Yuma de Arizona, Estados Unidos; al este con el municipio de San Luis Río Colorado, del estado de Sonora y el Golfo de California; al sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; al oeste con los municipios de Tecate y Ensenada. El valle de Mexicali tiene una superficie aproximada de 13,700 km<sup>2</sup> (INEGI, 2009). En la Figura 2 se muestra el mapa de la ubicación del municipio de Mexicali.



**Figura 2:** Mapa ubicación municipio de Mexicali (INEGI, 2009).

Cerro Prieto tiene un área con numerosas manifestaciones superficiales termales como: manantiales, volcanes de lodo y tierra alterada. A las faldas del volcán Cerro Prieto con una elevación de 260 m se entra el Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto ( $31.55^{\circ}$  -  $32.44^{\circ}$  N,  $114.50^{\circ}$  -  $115.48^{\circ}$  W) con aproximadamente 3000 hectáreas. Esta región está delimitada al noroeste por el ejido Michoacán de Ocampo ( $32.46^{\circ}$  N,  $115.30^{\circ}$  W), al norte por el ejido Hidalgo ( $32.41^{\circ}$  N,  $115.22^{\circ}$  W), al noreste por el ejido Nuevo León ( $32.42^{\circ}$  N,  $115.19^{\circ}$  W), al sureste por los ejidos Delta ( $32.36^{\circ}$  N,  $115.20^{\circ}$  W) y Oaxaca ( $32.23^{\circ}$  N,  $115.10^{\circ}$  W), y al oeste con la Sierra Cucapah ( $32.56^{\circ}$  N,  $115.00^{\circ}$  W) (Peralta, 2013a). En la Figura 3 se muestra un mapa de la ubicación de Cerro Prieto.



**Figura 3:** Mapa de ubicación y distribución de Cerro Prieto y localización de las casas de máquinas (DiPippo, 2012).

El Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto tiene una capacidad de generación instalada de 720 MW distribuidos en cuatro casas de máquinas, para generar 70 % de la energía eléctrica que se consume en el estado de Baja California (Peralta, 2013a). La casa de máquinas 1 (CP1) consta en total de 5 unidades (U1 a U5), las unidades de U1 a U4 son de 37.5 MW y U5 de 30 MW para tener una capacidad total de 180 MW, cabe mencionar que las unidades U1 a U4 ya no operan, debido a que su maquinaria ya es obsoleta. La casa de máquinas 2 (CP2) tiene una capacidad de 220 MW distribuidos en dos unidades

(U6 y U7) cada una de 110 MW. La casa de máquinas 3 (CP3) tiene la misma capacidad que la CP2 y está distribuida igualmente en dos unidades (U8 y U9). Por último la casa de máquinas 4 (CP4) la cual contiene cuatro unidades (U10-U13), cada unidad con una capacidad de 25 MW lo cual suman una capacidad total de 100 MW.

### 3.2. Tipos de Plantas en Cerro Prieto

En yacimientos geotérmicos dominados por líquido como en Cerro Prieto, los pozos generalmente producen una mezcla de agua y vapor en la superficie, esto se debe a que el fluido del yacimiento sufre un proceso de ebullición en el interior del pozo, causado por la caída de presión a lo largo del pozo. Para estas condiciones de vapor en Cerro Prieto se utiliza plantas de tipo Flash simple y Flash doble, en los siguientes puntos se explica cómo funcionan este tipo de plantas. La Tabla 1 muestra los diferentes tipos de plantas en Cerro Prieto.

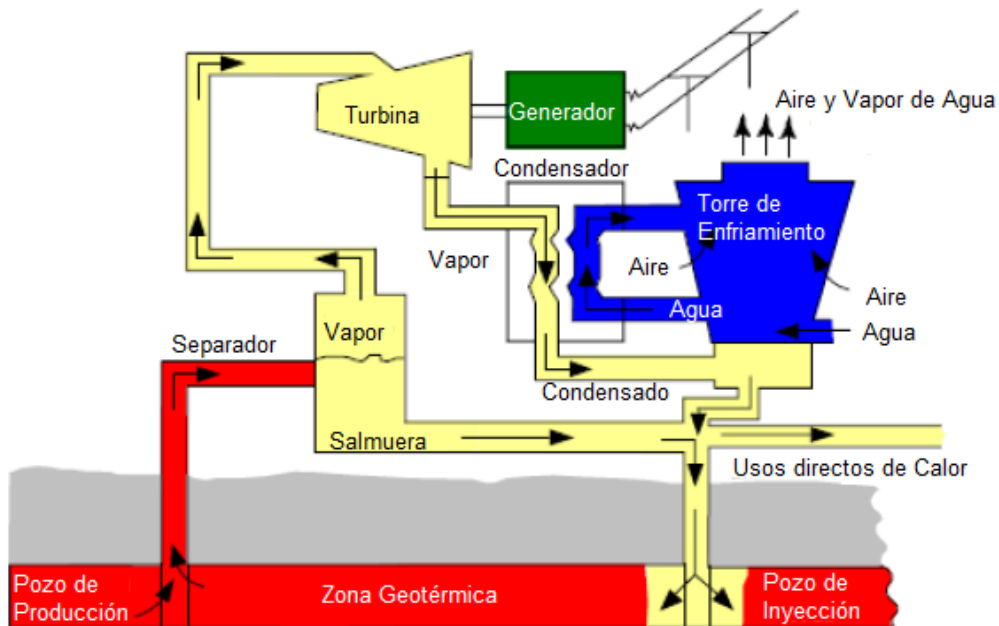
**Tabla 1: Tipo de plantas con las que se operan es Cerro Prieto. \*Actualmente se opera como planta tipo Flash simple debido a calidad de vapor (CFE, 2011).**

Nombre de la Unidad	Fecha de Operación	Tipo de Planta		Capacidad Instalada (MW)	Fabricante
CP1 U1	1973	A Condensación	Flash Simple	37.5	Toshiba
CP1 U2	1973	A Condensación	Flash Simple	37.5	Toshiba
CP1 U3	1979	A Condensación	Flash Simple	37.5	Toshiba
CP1 U4	1979	A Condensación	Flash Simple	37.5	Mitsubishi
CP1 U5	1982	A Condensación	Flash Doble*	30	Toshiba
CP2 U6	1986	A Condensación	Flash Doble	110	Toshiba
CP2 U7	1987	A Condensación	Flash Doble	110	Toshiba
CP3 U8	1986	A Condensación	Flash Doble	110	Toshiba
CP3 U9	1987	A Condensación	Flash Doble	110	Toshiba
CP4 U10	2000	A Condensación	Flash Simple	25	Mitsubishi
CP4 U11	2000	A Condensación	Flash Simple	25	Mitsubishi
CP4 U12	2000	A Condensación	Flash Simple	25	Mitsubishi
CP4 U13	2000	A Condensación	Flash Simple	25	Mitsubishi



### 3.2.1. Planta tipo Flash Simple

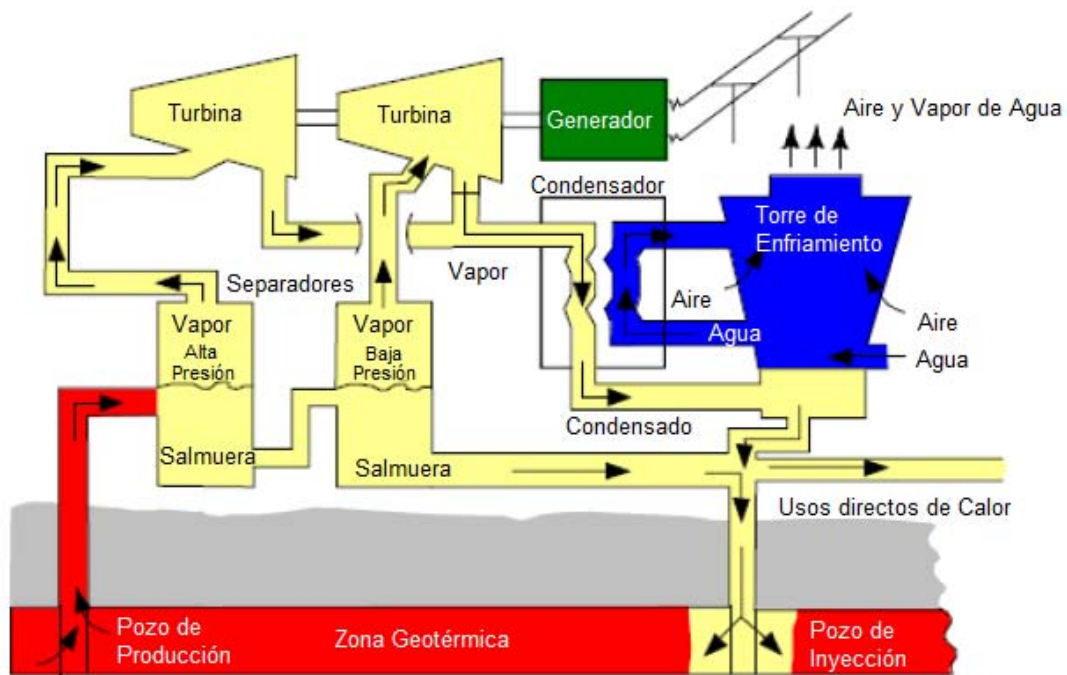
Se coloca a la salida del vapor del pozo de alimentación un separador centrífugo de agua, que elimina una buena parte del agua que contenía el vapor. El agua separada se considera de desecho y puede posteriormente ser inyectada nuevamente al yacimiento o puede ser enviada a una laguna de evaporación. El vapor que es enviado a la turbina se va condensado al pasar por esta, el nuevo condensado es enviado a un condensador en el cual se rocía agua fría desde lo alto del condensador lo que provoca la formación de dos fases una constituida por gases incondensables ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.) y otra con agua caliente con gran cantidad de sales principalmente. La primera fase es enviada a la atmosfera mediante ductos de venteo, la segunda fase es enviada a una torre de enfriamiento donde el agua se rocía desde lo alto de la torre y es enfriado utilizando aire, donde existe un intercambio de temperatura y un arrastre de agua lo cual provoca que el agua del condensado se enfríe, el agua que se enfrió es enviada por una parte al condensador y la otra es enviada a la laguna de evaporación (Sánchez, 2012). La Figura 4 muestra el esquema de una planta tipo Flash Simple.



**Figura 4:** Diagrama general de una planta tipo Flash Simple (Barrenechea, 2013).

### 3.2.2. Planta tipo Flash Doble

El funcionamiento de este tipo de plantas es igual a la planta flash simple, la única diferencia es que esta planta existen dos separadores de agua-vapor. Cuando el agua es separada como sucede en el Flash Simple, ésta es enviada a otro separador de baja presión en cual separa vapor secundario, este vapor secundario es enviado a la turbina de baja presión para así aprovechar con mayor eficiencia la energía geotérmica (Sánchez, 2012). La Figura 5 muestra el esquema de una planta tipo Flash Doble.



**Figura 5:** *Diagrama General de una planta tipo Flash Doble (Barrenechea, 2013).*

Las ventajas que existen en una planta Flash Doble a comparación de la Simple son:

- Se produce entre un 15 % y un 20 % más energía eléctrica con el mismo suministro geotérmico.
- Aunque el costo de este tipo de plantas se eleva un 5 %, el coste neto de la energía eléctrica por KW/h es alrededor de un 10 % a un 15 % más bajo.

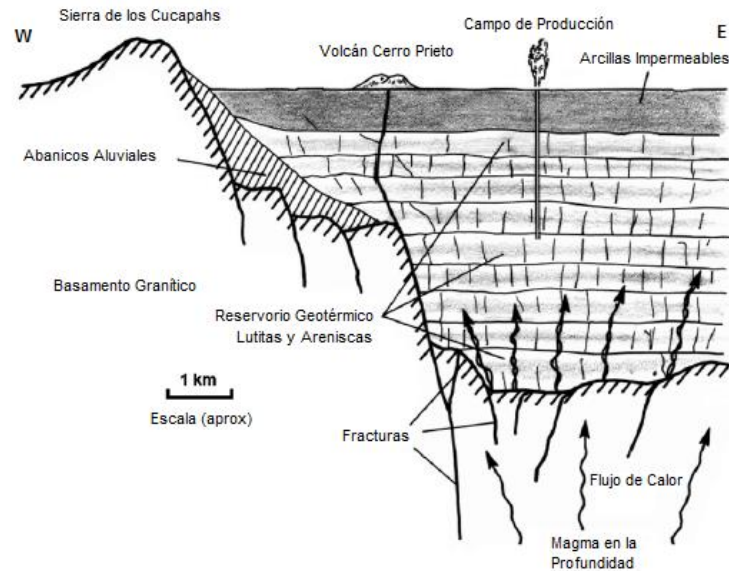
- Se consigue una presión óptima de entrada a la turbina, un 30 % más alta, por lo cual se pueden usar tuberías de vapor y válvulas más pequeñas.

### *3.3. Tipos de Sistemas Geotérmicos*

A la fecha se han identificado cinco tipos de sistemas geotérmicos: hidrotermales (fuente de calor, agua y roca), roca seca caliente (roca muy caliente y poco agua), geopresurizados (agua y metano disuelto a alta presión), marinos (alta entalpía en el fondo del mar) y magmáticos (roca fundida en zonas de debilidad cortical). Cerro Prieto pertenece a los sistemas hidrotermales, por esta razón nos enfocaremos sólo en este tipo de sistemas.

Los sistemas hidrotermales están constituidos por: una fuente de calor, agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido. El agua de estos sistemas se origina en la superficie de la Tierra en forma de lluvia, hielo, nieve, o de cualquier tipo de cuerpo de agua en la superficie (ríos, lagos, etc.). Se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando a varios kilómetros de profundidad en donde es calentada por la roca alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta 400 °C. En la actualidad estos sistemas son los únicos que se explotan comercialmente para la generación eléctrica (Arellano, 2008).

Cerro Prieto tiene una gran cantidad de lutitas (cuarzo el cual es SiO<sub>2</sub>, feldespatos que contienen Na, K, Ca, Ba, Al, Si y O, y micas que tienen Ca, Mg, K, Al, Si y O) y areniscas (feldespatos y cuarzo) son rocas porosas y por lo tanto permiten el transporte de agua, esta agua es detenida por un basamento granítico el cual es poco poroso y por lo tanto el transporte de agua es lento, por lo tanto existe la posibilidad de que se acumule agua, las rocas mencionadas son calentadas por que existen fracturas en zonas más bajas lo cual permite un flujo de calor proveniente del magma y al calentarse las rocas se calienta el agua que almacenan en sus poros. En la Figura 6 se pueden observar estos detalles del reservorio de Cerro Prieto.



***Figura 6: Sección del reservorio de Cerro Prieto (DiPippo, 2012).***

Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principales: vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía, se describirán a continuación:

**Vapor Dominante:** Son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco. Existen unos cuantos en el mundo. Los más conocidos son The Geysers (Estados Unidos) y Lardarello (Italia).

**Líquido dominante de alta entalpía:** Sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200 °C y 360 °C. Son más abundantes que los sistemas de vapor dominante. Por ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).

**Líquido Dominante de baja entalpía:** Sistemas con salmueras calientes, con temperaturas entre de 100 °C y 200 °C aproximadamente. Son más abundantes que los anteriores en una proporción de 10 a 1. Se encuentran en casi todos los países del mundo. Algunos ejemplos son Heber (Estados Unidos), Yangbajin (China) (Arellano, 2008).

### *3.4.El origen del Agua, Gases y Sales en Cerro Prieto*

Mercado (1970) sugiere que los gases del magma proporcionan calor, agua y quizás otras sustancias a los fluidos profundos, pero estos se mezclan con aguas frías meteóricas (agua que proviene de fenómenos meteorológicos) a profundidades mayores a 2500 m. A profundidades menores, más agua meteórica, que proviene principalmente del río Colorado, se mezcla con el flujo ascendente caliente. Por lo tanto dice la mayor contribución de agua es por el río Colorado pero menciona que debe de haber una parte de fluido que proviene del magma (gas y agua).

Coplen (1972) analizó el fluido de un pozo de Cerro Prieto y lo encontró similar al agua subterránea del centro del Valle de Imperial (Ubicado en California cerca de la frontera con México, cerca de El Centro, EUA), las cuales se originan por la infiltración del agua del río Colorado, con poca influencia de la precipitación local y ninguna de agua marina.

Truesdell et. al. (1981) encontraron una relación Cl/Br para el agua de Cerro Prieto similar a la del agua marina costera y sugiere que el agua del sistema de Cerro Prieto es agua del río Colorado que ha circulado a profundidad y se ha mezclado con la salmuera oceánica hipersalina principalmente Evaporita, la cual contiene minerales como Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y Halita ( $\text{NaCl}$ ). Esta mezcla es alterada por la alta temperatura de la roca del sistema, lo cual provoca la pérdida de iones  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y la ganancia de iones  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{SiO}_2$ . Durante el ascenso se mezcla con más agua del río Colorado y se enfría, para reequilibrarse concordantemente con las rocas magmáticas hasta alcanzar las composiciones actuales.

El agua y las sales del fluido geotérmico de Cerro Prieto tienen origen de las salmueras oceánicas y del agua del río Colorado pero ahora veremos que los gases tienen diferentes orígenes. Truesdell et. al. (1979) proponen que los gases (principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) del fluido geotérmico posiblemente tienen un origen magmático o una fuente sedimentaria mixta debido a las relaciones isotópicas  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  para Azufre y  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  para Carbono. DesMarais y Nehring (1981) demostraron que los hidrocarburos provienen por la

descomposición térmica de la materia orgánica (carbón y esquisto principalmente) contenida en los sedimentos.

Cabe mencionar que los gases también tienen orígenes similares a los de la planta geotérmica en Salton Sea (California EUA), este hallazgo fue descrito por Welhan et. al. (1979) mediante la relación de los isotopos de Helio  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , ya que encontraron que esta relación es similar entre ambas plantas además tienen un yacimiento similar (temperatura) y una disposición geológica similar. Esta relación de los isótopos de Helio nos indica también que hay introducción de gases originarios de manto, lo que no se sabe si proviene directamente del manto o si provienen por lixiviación de rocas magmáticas jóvenes.

### *3.5. Interacción Gases-Agua- Roca*

Los gases de un yacimiento geotérmico inalterado deben encontrarse en equilibrio con las rocas y el agua adyacentes, por esta razón deben existir reacciones entre ellos que controlen la concentración de los gases cuando se altera este equilibrio. Estas reacciones se explican a continuación.

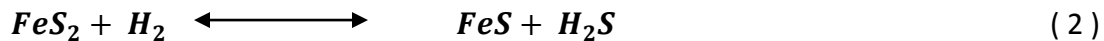
#### **3.5.1. Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )**

El dióxido del carbono es el compuesto más abundante en los sistemas geotérmicos y Cerro Prieto no es la excepción. La reacción que controla el flujo del  $\text{CO}_2$  en el sistema geotérmico de Cerro Prieto esta propuesta por Giggenbach (1981), esta reacción (1) nos dice que el dióxido de carbono de origen volcánico reacciona con la plagioclasa que pertenece al grupo de los feldespatos, este mineral contiene Ca, K, Na y aluminio silicatos para formar arcillas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  principalmente) y carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).



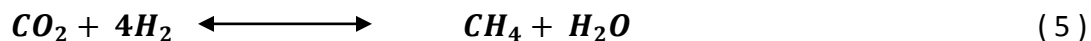
### 3.5.2. Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)

Después del dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno es el gas más típico en los sistemas geotérmicos. Diferentes reacciones podrían controlar el flujo del sulfuro de hidrógeno en el sistema de Cerro Prieto. Giggenbach (1980) propone que las reacciones son: pirita-pirrotina (2), pirita-hematita (3) y pirita-magnetita (4). Se encontraron dos conclusiones con respecto a las reacciones que controlan el flujo de este gas; la primera por Nehring y D'Amore (1984) quienes indican que la reacción que regula el flujo del H<sub>2</sub>S es el equilibrio pirita-pirrotina ya que no encontró la existencia de magnetita en Cerro Prieto. Y la segunda por Truesdell et. al. (1981) quienes indican que las reacciones entre pirita-pirrotina y pirita-magnetita tienen las mismas probabilidades de amortiguar el flujo del sulfuro de hidrógeno, ya que en Salton Sea es común la presencia de magnetita (Salton Sea y Cerro Prieto pertenecen al conjunto de fallas San Andrés-Golfo de California).



### 3.5.3. Metano (CH<sub>4</sub>)

El metano es el hidrocarburo con mayor presencia en los sistemas geotérmicos y Cerro Prieto no es la excepción. La concentración del metano está controlada por dos reacciones una con mayor importancia que la otra, ambas son propuestas por Nehring y D'Amore (1984). La primera es mediante la reacción Fischer-Tropsch (5) la cual es la reacción predominante debido al exceso de CO<sub>2</sub>, además el Hierro presente en forma de magnetita o pirita funciona como catalizador de esta reacción. La segunda reacción (6) es mediante la reducción del carbono en forma de carbón mineral.





#### 3.5.4. Hidrocarburos (C2 a C8)

La concentración de los hidrocarburos depende de la temperatura del pozo, entre mayor sea la temperatura del pozo tendremos una menor concentración de hidrocarburos de cadena larga y ramificada (C4-C8) e hidrocarburos aromáticos (principalmente benceno, tolueno y xileno).

DesMarais y Nehring (1981) encontraron que si la temperatura de los pozos es mayor o igual a 340°C la concentración de hidrocarburos de cadena larga es muy baja a comparación del metano en donde predominan hidrocarburos de cadena corta (C2 a C3) y benceno, en donde son factibles 2 explicaciones: la primera que el carbón se descompone directamente en hidrocarburos de cadena corta (C1 a C3) (como se explicó en la fugacidad del metano) y en benceno o la segunda que se forman compuestos intermediarios a los 340°C y se descomponen inmediatamente en compuestos de cadena corta. A 290°C la concentración de hidrocarburos de cadena larga y ramificada aumenta. Lo cual apoya la segunda explicación, es decir que entre más bajas son las temperaturas de los pozos permitiría la acumulación de hidrocarburos con mayor peso molecular antes de que se presentara la descomposición de estos mismos a hidrocarburos de menor peso molecular.



## 4. ANTECEDENTES

No se ha encontrado mucha información sobre la composición de los gases de venteo en Cerro Prieto, la mayor parte de esta información es sobre la composición química de la fracción gaseosa proveniente de los pozos de producción. Lo cual nos da una idea de cómo debe de ser la composición de los gases de venteo ya que en estos casos se analizan los gases incondensables, y por lo tanto las concentraciones de estos no deben de variar mucho con respecto a los gases de venteo, debido a que estos gases incondensables no tienen gran solubilidad en agua y por lo tanto deben ser parecidas.

Nehring y Fausto (1979) determinaron mediante vía húmeda y mediante cromatografía de gases que la composición de la fase gaseosa separada de los pozos (M8, M20, M27 y M35) contiene en su mayoría CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y NH<sub>3</sub>, además mencionan que hay presencia de hidrocarburos (etano, propano, 2-metilpropano, n-butano, 2-metilbutano, n-pentano, ciclopentano, 2-pentano, 3-metilpentano, n-hexano y benceno), los cuales se analizaron mediante cromatografía de gases con un detector de ionización de llama. Se determinó que la composición de estos hidrocarburos es menor al 2 %mol. Cabe mencionar que estos pozos alimentaban a la casa de máquinas 1 (CP1). La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en este estudio.

***Tabla 2: Concentración de gas de la fase vapor de los pozos (%mol) (Nehring, 1979).***

Pozo	M8	M20	M27	M35
CO <sub>2</sub>	92.4	91.9	86.6	91.6
H <sub>2</sub> S	2.5	2.3	3.7	2.3
NH <sub>3</sub>	1.4	2.0	1.7	1.6
He	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	2.2	1.9	4.3	2.1
Ar	0.004	0.006	0.012	0.009
O <sub>2</sub>	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0.15	0.23	0.43	0.28
CH <sub>4</sub>	1.5	1.7	3.4	2.0

Nehring y D'Amore (1984) realizaron un estudio de comparación, en el cual recolectaron muestras de los gases separados de los pozos de producción en los años 1977 y 1982, las muestras de los pozos de 1977 pertenecen todos a CP1 y los pozos analizados en 1982 pertenecen a tres casas de máquinas diferentes; para CP2 es el pozo M102, para CP3 son M104 y M53 y los pozos restantes son para la CP1. Los gases que se analizaron por vía húmeda son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, mientras los gases restantes (He, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Ar, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>) se analizaron por cromatografía de gases con un detector de ionización de llama, como en el trabajo de Nehring y Fausto (1979). Las Tablas 3 y 4 muestran los resultados reportados en este estudio.

***Tabla 3: Concentración de gas de la fase vapor de pozos en 1977 (%mol) (Nehring, 1984).***

Pozo	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
M5	78.86	7.63	2.28	4.66	0.014	0.6	5.18
M8	92.02	2.59	1.47	2.33	0.0037	0.15	1.51
M11	71.3	5.69	3.98	1.77	1.091	11	4.26
M14	81.75	4.99	2.97	4.52	0.013	0.51	4.86
M19A	82.19	7.91	2.31	2.86	0.014	0.51	3.98
M20	91.65	2.32	2.07	1.98	0.0059	0.23	1.77
M21A	87.93	3.17	1.77	3.97	0.0038	0.27	2.95
M25	82.73	7.07	3	2.25	0.0097	0.46	3.39
M26	80.89	8.33	1.8	4.09	0.016	0.63	4.26
M27	86.13	3.82	1.75	4.42	0.013	0.45	3.5
M29	82.88	4.94	2.73	2.98	0.014	0.82	4.99
M30	82.52	5.8	2.4	4.14	0.019	0.71	4.12
M31	80.87	5.76	2.24	5.46	0.016	0.65	5.08
M35	91.1	2.63	1.17	2.21	0.0091	0.3	2.07
M42	81.5	6.14	4.58	2.24	0.0083	0.49	4.43

**Tabla 4:** Concentración de gas de la fase vapor de pozos en 1982 (%mol) (Nehring, 1984).

Pozo	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	He	H <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
M5	85.64	4.87	1.6	0.00046	3.14	0.013	0.54	4.23
M11	84.87	5.79	1.83	0.00063	2.09	0.028	1.6	3.79
M14	85.15	3.63	0.62	0.00016	6.54	0.011	0.47	4
M19A	85.35	5.39	1.57	0.00047	3.2	0.014	0.57	4.04
M25	85.04	5.69	1.55	0.00012	3.15	0.014	0.55	4.11
M26	84.42	6.69	1.55	0.00022	2.66	0.016	0.62	4.01
M29	86.73	4.53	1.59	0.00044	2.88	0.014	0.57	3.8
M30	84.49	5.57	1.94	0.00049	3.85	0.018	0.66	3.68
M31	82.43	5.81	1.51	0.00031	4.58	0.019	0.73	5.1
M35	82.33	5.26	1.7	0	4.11	0.024	0.95	5.68
M42	86.33	4.51	2.36	0.00061	1.8	0.015	0.6	4.29
M43	85.48	5.88	1.99	0.0008	2.14	0.016	0.67	3.85
M48	83	5.56	2.49	0	5.47	0.021	0.78	3.82
M50	83.86	5.57	1.73	0.00026	3.8	0.02	0.74	4.3
M51	84.41	5.43	1.47	0.00025	4.4	0.016	0.64	3.72
M53	84.93	5.12	1.43	0.00025	4.71	0.0085	0.37	3.49
M84	80.99	5.58	1.21	0	10.34	0.0087	0.38	2.48
M90	83.45	5.07	1.64	0.00029	3.41	0.028	1.06	5.3
M91	82.1	7.34	2.35	0.00086	3.81	0.023	0.96	3.56
M101	80.79	8.14	2.44	0.00058	2.75	0.018	0.75	5.18
M102	85.55	4.23	1.98	0	5.18	0.0032	0.17	3.22
M104	83.61	4.1	1.05	0	7.16	0.0052	0.24	4.19
M105	82.75	5.92	1.88	0.00083	5.22	0.019	0.79	3.69
M114	84.07	6.32	1.75	0.0011	1.62	0.019	0.81	5.36
M130	84.25	5.38	2.44	0.00024	3.68	0.011	0.45	3.95

Lo que pudieron concluir con esto es que hay un aumento relativo en la concentración de N<sub>2</sub> y Ar (27% y 18% respectivamente), estos cambios indican que hay filtración de agua fría al acuífero y por lo tanto esta se mezcla con el agua termal.

Peralta et. al. (2013a) determinaron la composición química de los gases de venteo en el Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto por casa de máquinas, en la cual se analizaron los gases incondensables que se emiten a la atmósfera mediante la técnica de cromatografía de gases con un detector de masas. Las muestras de estos gases se tomaron en el 2010 utilizando frascos de un litro al vacío los cuales son conectados a los ductos de venteo de cada unidad siguiendo la norma ASTM E1675-95a. Se realizó un promedio por casa de máquinas y se encontró que los gases más abundantes eran CO<sub>2</sub>,

H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Mencionan que la presencia de estos dos últimos gases en altas concentraciones es debido a que introducen aire ambiente a los sistemas de extracción de gases incondensables (eyectores, turbocompresores) para mantener las bombas en condiciones de operación óptimas. La Tabla 5 indica los resultados obtenidos en el estudio.

***Tabla 5: Concentración de gases de venteo por casa de máquinas en el 2010 (%mol)***  
*(Peralta et. al., 2013a).*

Compuesto	CP1	CP2	CP3	CP4
N <sub>2</sub>	26.76	18.34	9.84	8.71
O <sub>2</sub>	18.55	12.20	6.21	5.94
CH <sub>4</sub>	15.77	19.06	26.90	27.92
CO <sub>2</sub>	31.14	45.27	42.12	36.36
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.09	0.10	0.13	0.13
H <sub>2</sub> S	7.17	3.15	11.44	17.47
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.04	0.06	0.14	0.13

Lo que se concluyó es que no se puede estimar con exactitud cuál es la concentración real de la mezcla de gases incondensables debido a que no se tienen los datos de los volúmenes de aire que utiliza la CFE para la extracción de los mismos, pero se estiman que esta entre un 20 % y 40 % del volumen total.

Además existe un error en la estimación de los gases ya que como se explica, existe presencia de aire en el sistema, pero la relación entre el Nitrógeno y el Oxígeno de cada casa de máquinas está entre 1.47 y 1.58, mientras la relación para el aire es de 3.73, lo cual existe un error muy grande en el cálculo de estos valores, pero se considera este como trabajo previo a pesar de este error.

Peralta et. al. (2013b) trabajaron nuevamente en la determinación de los gases de venteo en Cerro Prieto. Las muestras de este trabajo se obtuvieron en el año 2012 de los ductos de venteo utilizando la metodología aplicada en el trabajo previo, la única diferencia fue el cambio del sistema cromatográfico, lo que dio la posibilidad de encontrar mayor cantidad

de gases incondensables en la mezcla. Se realizó un promedio por unidad y se encontró que los gases más abundantes eran CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y benceno. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos en este estudio.

**Tabla 6:** Concentración de gases de venteo por casa de máquinas en el 2012 (%mol) (Peralta et. al., 2013b).

Compuesto	CP1 U5	CP2 U6	CP2 U7	CP3 U8	CP3 U9	CP4 U10-U13
N <sub>2</sub>	72.400	39.400	55.200	5.025	5.615	2.413
O <sub>2</sub>	15.400	6.080	10.300	0.926	0.992	0.354
NO	0.005	0.002	0.003	0	0	0
CO <sub>2</sub>	11.300	52.900	32.500	93.200	92.400	96.367
H <sub>2</sub> S	0.006	0.040	0.362	0.52	0.607	0.617
COS	0.006	0.010	0.007	0.001	0.002	0.001
CS <sub>2</sub>	0.008	0.015	0.335	0.001	0.002	0.001
CH <sub>4</sub>	0.547	0.843	0.839	0.162	0.170	0.124
CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	0.02	0.022	0.054	0.006	0.019	0.003
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.008	0.007	0.008	0.002	0.002	0.001
CH <sub>3</sub> CH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>3</sub>	0.005	0.004	0.005	0.001	0.001	0
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.006	0.006	0.006	0.001	0.002	0.001
CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.003	0.002	0.008	0.001	0.001	0
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	0.003	0.003	0.004	0.001	0.001	0
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.253	0.556	0.311	0.122	0.165	0.071
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub>	0.058	0.072	0.056	0.017	0.024	0.014
o-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.008	0.006	0.006	0.001	0.002	0.001
m-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.009	0.011	0.007	0.002	0.003	0.002
p-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.005	0.003	0.005	0.001	0.001	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.008	0.006	0.006	0.001	0.002	0.004

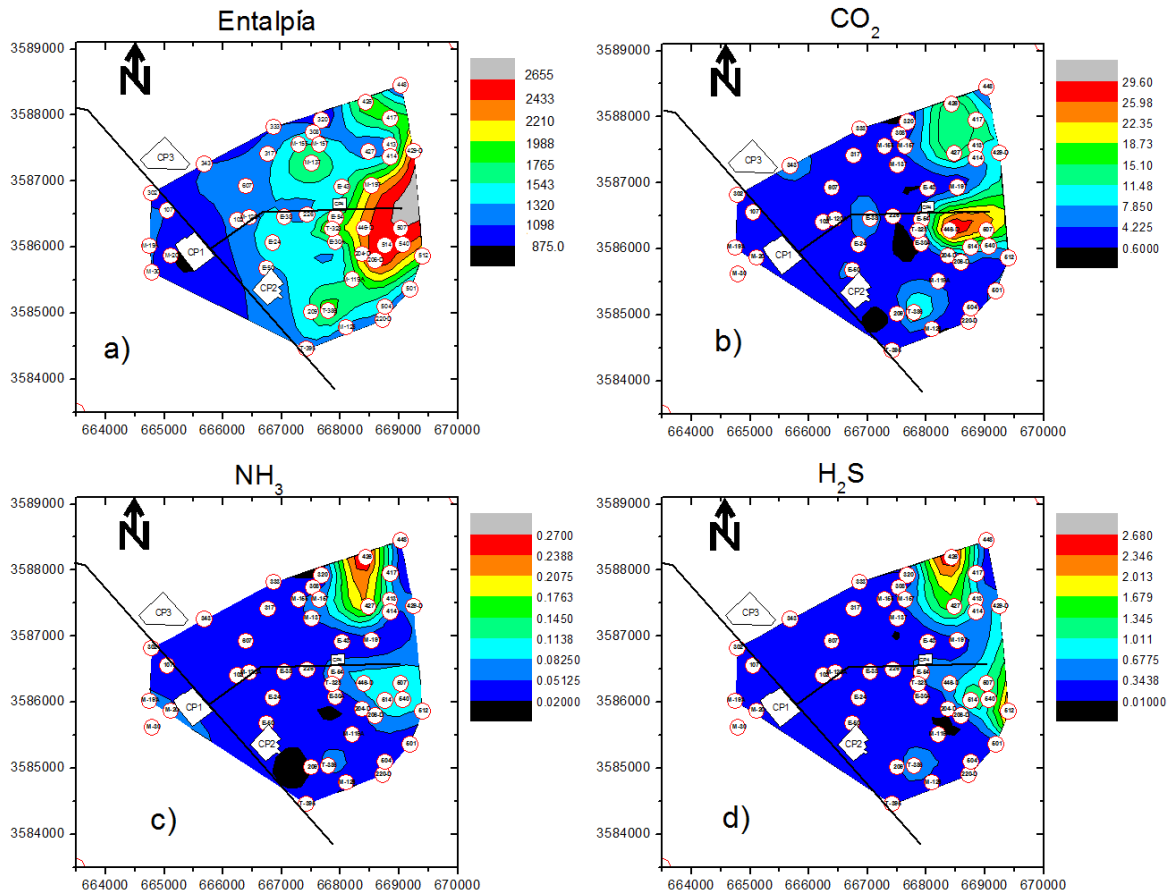
Peralta et. al. indicaron que la concentración alta de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en las unidades 5, 6 y 7 como en el estudio anterior, a la adición de aire ambiental a los bombas de extracción de los gases incondensables.

Taran et. al. (2013) realizaron un estudio cualitativo y cuantitativo de la fase vapor y la fase acuosa de los pozos de producción en Cerro Prieto. De un total de 149 pozos que se encuentran activos se eligieron 46 de ellos; el criterio de selección de pozos por casa de máquinas, se obtuvo en base a la entalpía; es decir se eligieron pozos de baja, media y alta entalpía.

En este caso sólo se mencionaran los datos obtenidos de la fase vapor. Las muestras de los 46 pozos se analizaron por medio de la técnica de cromatografía de gases con un detector de conductividad térmica, encontrando  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , He,  $NH_3$  y  $O_2$ ; para el  $H_2S$  y el  $CO_2$  se utilizaron otras técnicas. El  $H_2S$  se oxida y después se analiza con un cromatógrafo de iones y el  $CO_2$  se titula utilizando medio ácido. Los gases más abundantes son:  $CO_2$  entre un 90 % y 70 %,  $H_2S$  entre 1 % y 30 %,  $CH_4$  entre 2 % y 10 % y  $NH_3$  entre 1 % y 5 %; la suma de los gases restantes es menor al 10 %. Se realizaron distribuciones del dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y amoníaco, estas distribuciones se compararon con la distribución de la entalpía de los pozos, estas distribuciones se realizaron utilizando el programa Origin, con el método contorno. Mencionan que el flujo de estos gases corresponde con la entalpía de los pozos, en el noreste del campo se encuentra el mayor flujo (CP4) y va disminuyendo hacia el sur del mismo (CP1). La Figura 7 muestra las distribuciones ya mencionadas.

Además obtuvieron las relaciones del etano (99), propano (726), Isobutano (12248), butano (7268), Isopentano (63303), pentano (77552) y benceno (135) con respecto al metano.

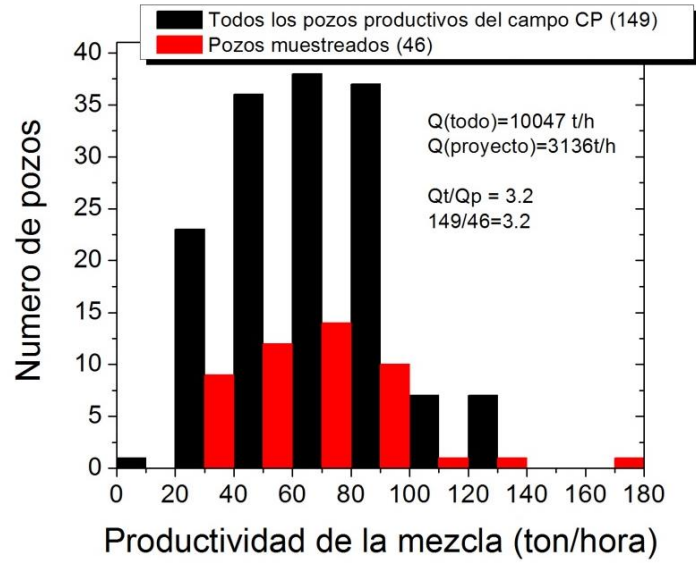
Por último comenta que la representación de los pozos fue la correcta siguiendo el criterio ya mencionado, ya que se realizó una comparación entre la distribución de los pozos muestreados y los pozos que hay en complejo en base a la producción de vapor. Se encontró que son distribuciones muy similares y por lo tanto multiplicando las emisiones calculadas de los pozos seleccionados por un factor de 3.2 se pueden estimar las emisiones de todo el Complejo de Cerro Prieto. El factor de 3.2 lo calcularon dividiendo el total de los pozos en Cerro Prieto entre el número de pozos muestreados es decir 149 entre 46. Además con este factor de 3.2 se pueden calcular las emisiones del todo el complejo geotermoeléctrico utilizando las emisiones calculadas con los pozos muestreados. La Figura 8 muestra la distribución de los pozos muestreados y todos los pozos y la Tabla 7 contiene los resultados de las emisiones de los gases más abundantes.



**Figura 7:** Distribución de a) Entalpía (KJ/kg), b) dióxido de carbono (ton/día), c) amoníaco (ton/día) y d) sulfuro de hidrógeno (ton/día) del Cerro Prieto. Los valores más altos se representan por el color rojo, los valores menor por el azul rey, el negro y el gris son los valores menores al mínimo reportado y mayor al máximo reportado respectivamente (Taran et. al., 2013).

**Tabla 7:** Emisiones de gases en Cerro Prieto, calculadas utilizando datos de pozos (Taran et. al., 2013).

	H <sub>2</sub> S (ton/día)	NH <sub>3</sub> (ton/día)	CO <sub>2</sub> (ton/día)
<b>Total Proyecto</b>	21.57	2.42	257.44
<b>Total CGCP</b>	69.02	7.74	823.81



**Figura 8:** Distribución de los pozos muestreados y totales de Cerro Prieto en base a la producción de vapor (Taran et. al., 2013).



## 5. OBJETIVOS

### *5.1. Objetivo General*

- Determinar las emisiones (ton/día) de los gases más abundantes en el Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto.

### *5.2. Objetivos Específicos*

- Obtener muestras de cada una de las unidades en el Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto.
- Analizar las muestras obtenidas utilizando la técnica CG-EM.
- Comparar los resultados con resultados previos y con resultados de los pozos de producción.
- Determinar las tasas de emisión (ton/día) del complejo.

## 6. HIPÓTESIS

- El Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto se alimenta de fluidos de origen volcánico, por lo tanto la mezcla de gases que se emiten al ambiente por las chimeneas del complejo deben contener una alta concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).
- La distribución de compuestos de las emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto deben ser similares respecto a emisiones reportadas en años anteriores debido a que el complejo se ha alimentado del mismo reservorio desde su inicio.

## 7. METODOLOGÍA

Se realizaron dos campañas de recolección, una del 3 al 7 diciembre del 2012 y la última del 6 al 10 mayo del 2013 en las cuales se obtuvieron muestras de cada una de las unidades de cada casa de máquinas, además se obtuvieron los parámetros básicos de emisión en los ductos, posteriormente se enviaron al laboratorio para su análisis mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, se analizaron estos resultados para obtener las tasas de emisión de los gases encontrados y por último se realizó una comparación de los resultados con datos obtenidos en otros trabajos ya mencionados en el capítulo de Antecedentes.

### *7.1. Recolección de Muestras*

Las muestras se dividen en dos campañas, en la campaña de diciembre 2012 se recolectaron 22 muestras de todas las unidades, mientras que la campaña de mayo 2013 consta de 28 muestras de las mismas unidades, con excepción de la unidad 7 la cual se encontraba en mantenimiento. La Tabla 8 muestra la distribución de las muestras.

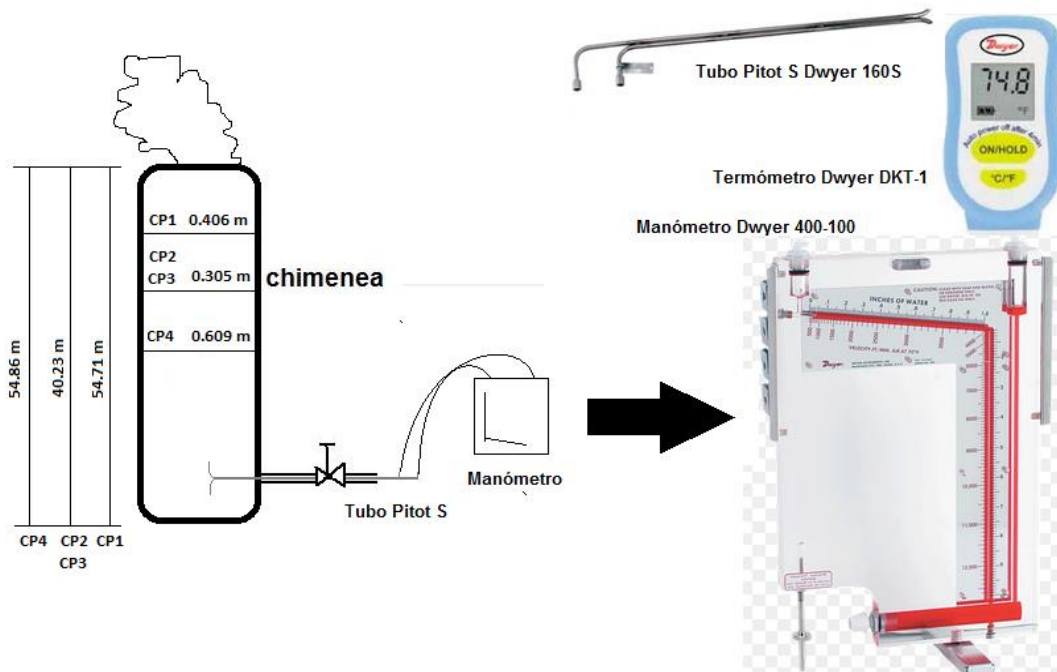
***Tabla 8: Número de muestras que se recolectaron por campaña y unidad.***

<b>Unidad</b>	<b>Diciembre 2012</b>	<b>Mayo 2013</b>
<b>U5</b>	8	5
<b>U6</b>	3	6
<b>U7</b>	3	0
<b>U8</b>	2	6
<b>U9</b>	2	6
<b>U 10-13 (UGral)</b>	4	5

Primero se obtuvieron los parámetros básicos de los ductos de cada una de las unidades de cada casa de máquinas: diámetro interno, altura y área, así como la temperatura y la velocidad de los gases, los cuales se utilizaron para calcular las tasas de emisión y el

caudal. Cabe mencionar que se realizó un barrido de velocidades para observar si existían cambios en la velocidad de los gases en el ducto de venteo.

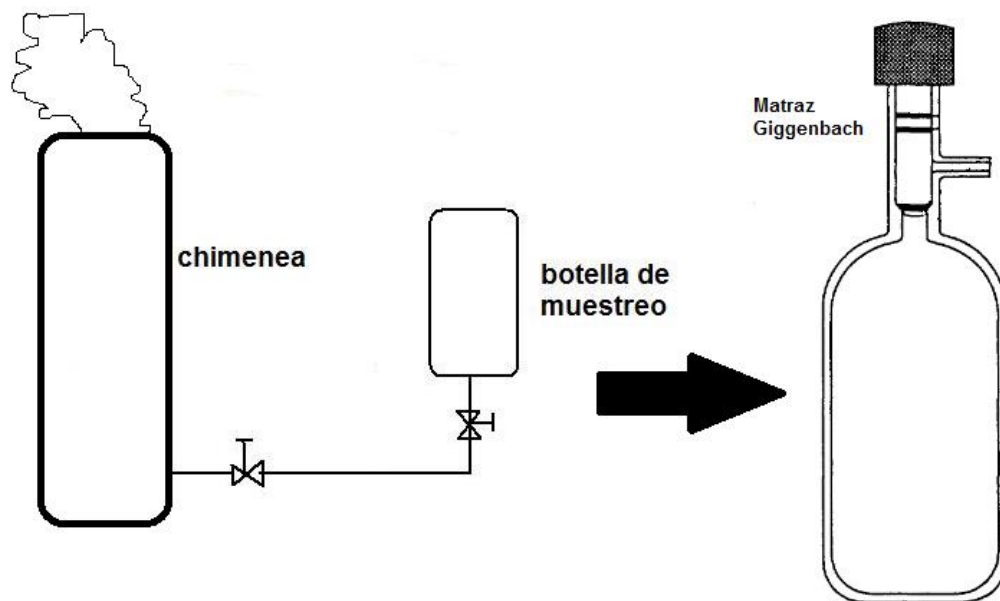
Los aparatos empleados en esta etapa fueron un tubo pitot tipo S marca Dwyer modelo 160S el cual va conectado a uno manómetro diferencial marca Dwyer modelo 400-10, ambos estaban calibrados para determinar la velocidad de los gases en los ductos y realizar el barrido; y un termómetro con sonda de inserción y rango de detección de 25 - 500 °C marca Dwyer modelo DKT-1 para registrar la temperatura directamente en el puerto de muestreo. La Figura 9 muestra el equipo utilizado para esta sección.



**Figura 9: Diagrama de obtención de parámetros y material empleado.**

Posteriormente se tomaron muestras de gases en los ductos de venteo de las unidades utilizando matraces de bola de 1 litro marca Pyrex preparadas al vacío a  $10^{-3}$  mbar, estas botellas están modificadas del cuello, a el cuello se le coloco una llave teflón y tiene un cuello de 0.5 pulgadas de diámetro para la conexión directa al cromatógrafo de gases. Las cuales se conectan a una toma de salida directa de los ductos de venteo. La toma de muestras tiene un diámetro de 4 pulgadas por lo cual se tuvieron que utilizar reducciones

hasta obtener una de media pulgada dentro de estas reducciones se coloca una llave de paso. La ubicación de la toma de muestra depende la unidad, en la unidad 5 se encuentra a 6 m del codo de la chimenea, la unidades 6 a 9 la tienen a 10 m del suelo y 30 m desde la parte más alta de la chimenea y la unidad general a 6 m del suelo y 48 m de la parte más alta de la chimenea. La Figura 10 muestra el diagrama de recolección de muestra de los gases incondensables.



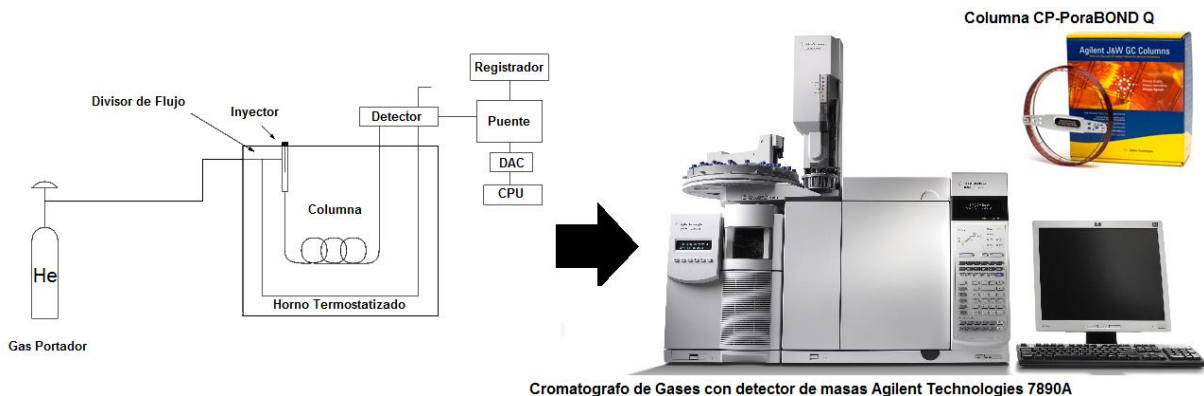
**Figura 10: Diagrama de recolección de muestra y material utilizado.**

Primero se purga la conexión, esto se realiza dejando escapar una pequeña cantidad del gas y después se cierra la llave de paso; se conecta el matraz, se abre la botella y se deja abierta por 2 minutos para que el vacío que contiene la botella jale el gas y se cierra la llave, todo este procedimiento es de acuerdo a la norma ASTM E1675 – 95a (Muestreo de Fluidos Geotérmicos de dos fases para propósitos de análisis químicos), la cual nos dice como se debe muestrear gases geotérmicos.

## 7.2. Análisis de Muestras

Las muestras de gases contenidas en matraces de bola Pyrex con llaves de teflón de un litro fueron analizadas por la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas por el Dr. Rafael Navarro en el Laboratorio de Química de Plasmas y Estudios Planetarios del Instituto de Ciencias Nucleares UNAM.

Los gases fueron inyectados a través de una válvula de seis puertos a un cromatógrafo de gases de la marca Agilent Technologies modelo 7890A acoplado a un detector de espectrometría de masa del tipo cuadrupolo de Agilent Technologies modelo 7890A. El equipo utilizó una columna CP-PoraBOND Q de silica fundida con fase estacionaria de vinil-estireno de 50 m de longitud, con diámetro exterior de 0.45 mm y 0.32 mm de interior, con un grosor de película de 5  $\mu\text{m}$ . El gas de acarreo fue Helio de Ultra-Alta pureza (99.9995%) a un flujo constante de 1.2 ml/min. El programa cromatográfico presentó las siguientes características: Isoterma a 50°C por 6 minutos, posteriormente un incremento de temperatura a 10°C/min hasta 240°C, y finalmente una isoterma a 240°C durante 6 minutos. La temperatura del inyector fue de 250 °C, con relación de split de 8.68:1; la temperatura en la zona transferencia al espectrómetro de masas fue de 250 °C. La Figura 11 muestra el equipo cromatográfico.



**Figura 11: Diagrama de partes de un cromatógrafo de gases y equipo utilizado.**

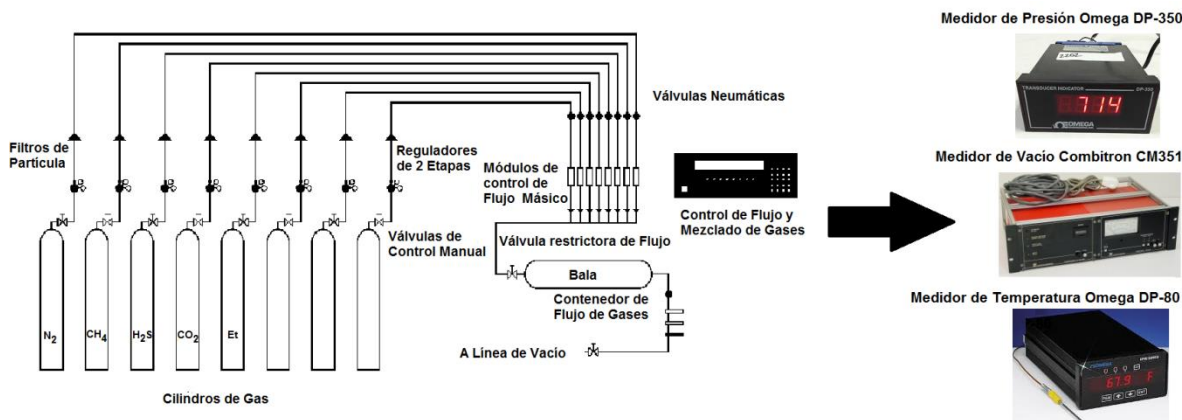
El espectrómetro de masas funcionó en modo de barrido continuo de masas de 10 a 150 m/z con la técnica de impacto electrónico a 70eV. Los espectros obtenidos fueron comparados con las bibliotecas de espectros de librería NIST (The NIST Mass Spectral Search Program for the NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library Version 2.0f build out Oct 22, 2009).

Para la cuantificación del CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> se realizaron curvas de calibración, para estos casos se utilizaron gases de alta pureza (99.97%). El resto de los gases fueron cuantificados en base a las curvas de calibración del dióxido de carbono para los gases inorgánicos (nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, óxido nítrico, sulfuro de carbonilo, dióxido de azufre y sulfuro de carbono) y del metano para los gases orgánicos (propano, isobutano, butano, isopentano, pentano, hexano, metilciclopentano, benceno, ciclohexano, tolueno, orto xileno, para xileno, meta xileno y etilbenceno).

Cada tanque de gas para las curvas de calibración y el tanque de nitrógeno se conectan a un regulador de dos etapas que además tiene un filtro de línea para partículas menores a 2 µm, uno de los cuatro gases posteriormente pasa a un sistema de mezclado donde se prepara la mezcla de calibración con nitrógeno. La mezcla se preparó utilizando una mezcladora marca Linde modelo FM-4660 la cual está equipada con un medidor de presión marca Omega modelo DP-350, un medidor de vacío marca Combitron modelo CM 351 y un medidor de temperatura marca Omega modelo DP-80. Además consta de ocho canales electrónicos los cuales controlan y miden el flujo másico de gas por medio de conductividad térmica (cada canal es utilizado para un gas específico y está conectado por medio de la tubería de acero con el tanque respectivo, con un flujo máximo por canal de 20 mL/min y un mínimo de 2 mL/min).

La mezcla de gases se almacenó en una bala (a la cual previamente se le hace un vacío de  $8.0 \times 10^{-3}$  mbar) en donde se expande y termina de mezclarse hasta el momento de su uso. Posteriormente se dejó a que terminara de mezclarse por completo por 24 horas. Una vez mezclados los gases se pasó a través de un tubo de acero inoxidable en donde se encuentra una válvula restrictora de flujo de seguridad para evitar que la mezcla de gases

regrese o cambie de línea. La Figura 12 muestra el equipo utilizado para la obtención de curvas de calibración.



**Figura 12:** Equipo para realizar mezcla de gases para curva de calibración.

La bala se llenó con una mezcla al 20% del gas a calibrar, 80% de N<sub>2</sub> (V/V) de la cual se tomaron muestras desde 1,000 hasta 400mbar y se inyectaron en el sistema acoplado de análisis. Posteriormente se realizaron diluciones de la mezcla anterior con nitrógeno con factores de dilución al 20 %, 40 %, 60 % y 80 %, se tomaron muestras a diferentes presiones y se determinaron las respectivas áreas de los picos de cada una de las inyecciones realizadas en el sistema acoplado de análisis. Los valores de presión se transforman en número de moléculas utilizando la ecuación (7) de los gases ideales y el número de Avogrado. Cabe mencionar que las curvas se realizaron por triplicado para obtener análisis estadístico confiable.

$$M_x = \frac{PVN}{RT} \quad (7)$$

Donde **M<sub>x</sub>** es el número de moléculas del gas a calibrar; **P** es la presión parcial de X en la mezcla de calibración (mbar); **V** es el volumen del reactor utilizado (L); **N** es el número de Avogrado con un valor de 6.022x10<sup>23</sup> moléculas/mol (número de Avogrado), **R** es la constante universal de los gases ideales 83.140 mbar·L/mol·K y **T** es la temperatura a la cual se realiza el experimento (K).



Por último se realizó un análisis estadístico a las curvas de calibración y se obtuvieron los parámetros de la cada una de las curvas de calibración (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). En la Tabla 9 muestra los parámetros del análisis estadístico. En el Anexo 4 se muestran las curvas de calibración y el análisis estadístico de estas.

***Tabla 9: Parámetros del análisis estadístico de las curvas de calibración.***

<b>Valor</b>	<b>Dióxido de carbono</b>	<b>Metano</b>	<b>Etano</b>	<b>Sulfuro de Hidrógeno</b>
<b>Pendiente</b>	2.73×10 <sup>8</sup>	1.38×10 <sup>6</sup>	4.48×10 <sup>3</sup>	6.06×10 <sup>6</sup>
<b>Desviación estándar de la pendiente</b>	±8.40×10 <sup>6</sup>	±8.26×10 <sup>4</sup>	±2.06×10 <sup>2</sup>	±2.38×10 <sup>5</sup>
<b>Ordenada</b>	2.88×10 <sup>7</sup>	5.32×10 <sup>3</sup>	2.37×10 <sup>4</sup>	6.75×10 <sup>5</sup>
<b>Desviación estándar de la ordenada</b>	±1.95×10 <sup>6</sup>	±2.42×10 <sup>3</sup>	±7.21×10 <sup>3</sup>	±9.32×10 <sup>4</sup>
<b>Coefficiente de correlación</b>	0.9943	0.9556	0.9832	0.9878
<b>Límite inferior para la pendiente</b>	2.51×10 <sup>8</sup>	56.00	4.00×10 <sup>3</sup>	5.50×10 <sup>6</sup>
<b>Límite inferior para la ordenada</b>	2.38×10 <sup>7</sup>	1.20×10 <sup>6</sup>	6.63×10 <sup>3</sup>	4.54×10 <sup>5</sup>

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Parámetros básicos de Ductos

Los parámetros básicos de los ductos constan de cinco partes: el diámetro interno, la altura, el área, la temperatura, la velocidad de los gases y el caudal. Los diámetros, las áreas y las alturas de los ductos fueron proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mientras que las velocidades, las temperaturas y los caudales fueron medidos y calculados.

La velocidad de los gases se corrigió utilizando la composición de los gases y la temperatura de los mismos utilizando la siguiente ecuación (8), la cual calcula la velocidad utilizando la presión dinámica de los gases.

$$V=0.9K \sqrt{\frac{2q}{\rho}} \quad (8)$$

Donde **K** es el coeficiente del tubo de pitot **S** y tiene un valor de 0.87; el **0.9** corresponde al valor de aproximación de la medida, ya que el fabricante menciona que 90 %  $V_{medida} = V_{real}$ ; **q** es igual a la presión dinámica del gas el cual se obtiene del manómetro diferencial (Pa ó  $kg/m \cdot s^2$ ); y por último la **ρ** que es la densidad de los gases la cual se calcula utilizando la composición de la mezcla de gases de venteo y la temperatura de la misma ( $kg/m^3$ ), considerando que los gases que la componen se comportan como gases ideales debido a que la temperatura de los gases es alta y van a alta velocidad.

Tomando las consideraciones anteriores la anterior ecuación (8) quedaría como la siguiente ecuación (9).

$$V=0.9K \sqrt{\frac{2qRT}{P_{abs} \sum_i X_i PM_i}} \quad (9)$$

Donde **R** es la constante universal de los gases ideales y es igual a 0.08206 L·atm/K·mol; **T** es temperatura medida utilizando el termopar (K); **P<sub>abs</sub>** es igual a la presión atmosférica y tiene un valor de 1 atm; y por último, **X<sub>i</sub>PM<sub>i</sub>** es el producto de la fracción molar de cada gas presente en la mezcla de gases por su respectivo peso molecular.

Teniendo la velocidad medida con la ecuación anterior, se calculó el caudal de los ductos utilizando la ecuación general (10), el caudal nos dice la cantidad de flujo (cantidad de la mezcla de gases) que pasa a través de una sección del ducto en cierta cantidad de tiempo.

$$Q=AV \quad (10)$$

Donde **Q** es el caudal (m<sup>3</sup>/s); **A** es el área (m<sup>2</sup>); y **V** es la velocidad medida (m/s).

La Tabla 10 muestra la altura, el diámetro y el área que son los valores constantes de los ductos; la Tabla 11 muestra los valores medidos de la temperatura y la presión; y la Tabla 12 tiene los valores calculados de la velocidad y el caudal de los ductos en ambas campañas.

**Tabla 10: Medidas de los ductos de las unidades del Cerro Prieto (CFE, 2011).**

Ducto	Altura (m)	Diámetro Interno (m)	Área (m <sup>2</sup> )
5	50.71	0.406	0.129
6A	40.23	0.305	0.073
6B	40.23	0.305	0.073
7A	40.23	0.305	0.073
7B	40.23	0.305	0.073
8A	40.23	0.305	0.073
8B	40.23	0.305	0.073
9A	40.23	0.305	0.073
9B	40.23	0.305	0.073
General	54.86	0.609	0.291

**Tabla 11: Temperatura y presión de los gases en ductos. \*No se determinó debido a que la unidad no estaba en funcionamiento.**

Ducto	Temperatura (°C)		Presión Dinámica (Pa)	
	12/12	05/13	12/12	05/13
5	36	36.6	94.65	161.90
6A	184	188	871.78	361.17
6B	198	207	169.37	194.28
7A	161	---*	1120.86	---*
7B	175	---*	186.81	---*
8A	176	184	622.70	547.98
8B	145	190	87.18	323.80
9A	145	175	697.42	440.34
9B	156	234	2.49	229.15
General	46.1	42.5	119.56	32.38

Se calcularon los incrementos y decrementos de las temperaturas, las presiones, las velocidades y los caudales de los dos años, tomando como referencia los datos del año 2012, es decir el valor se tomo como un 100 % y con una relación de linealidad (regla de tres) se cálculo el porcentaje del valor del año 2013.

La unidad 5 de la casa de máquinas 1 (CP1) mantiene la temperatura en ambas campañas ya que tan solo hubo un aumento del 1.67 % pero la presión aumenta un 71.05 %, por lo cual se esperarí un aumento similar en la velocidad, pero se observó que solo aumentó un 35.77 %. Esto se refleja directamente en los flujos de las emisiones del ducto a la

atmósfera, las cuales se encuentran dentro de un intervalo de operación de 1.29 – 1.75 m<sup>3</sup>/s.

La casa de máquinas 2 (CP2) tiene en operación las unidades 6 y 7, ambas unidades cuentan con dos ductos de venteo (A y B). Los gases en el ducto de venteo 6A tienen un cambio en la temperatura de 2.17 % y en la presión tiene un decremento de 58.43 %, por lo tanto a velocidad en este caso disminuyó un 38.26 %. El ducto 6B registró un aumento de temperatura y presión 4.55 % y 14.70 % y su velocidad solo aumentó un 2.87 %. En el muestreo realizado en mayo de 2013 la unidad 7 estaba fuera de operación, por lo tanto no se tomaron mediciones en los ductos en esa campaña, por lo cual se tienen solo los valores de la primera campaña.

La casa de máquinas 3 (CP3) se comportó de manera similar a CP2 ya que siempre la velocidad de los gases en los ductos B (baja presión) tiene menor velocidad que los ductos A (alta presión) en todos los casos. Pero si hacemos la comparación entre campaña vemos que los valores de temperatura y presión en dos casos son muy diferentes y por lo tanto existen cambios demasiado drásticos en las velocidades, por ejemplo para la unidad 8 en el ducto 8B aumentó la temperatura 31.03 % y la presión lo también aumentó un 271.43 %. En el caso de las velocidades, para 8A hay un decremento del 4.37 %, en 8B hay un aumento del 103.67 %, 9A tiene un decremento de 15.70 % y finalmente 9B tiene un aumento del 986.86 %.

Por último CP4 el ducto general de descarga tiene decremento en la temperatura del 7.81 % y en la presión del 72.42 %, lo que provocó que la velocidad disminuyera un 49.41 %.

Estas diferencias nos permiten ver la importancia de la calidad del vapor proveniente de los pozos de producción, ya que si el vapor es más húmedo, la presión de este disminuye y por lo tanto su velocidad y su caudal. La principal causa de que la temperatura y presión del reservorio disminuya es porque hay recarga de agua fría en el mismo. Otra razón que influye a la velocidad es la composición de la mezcla de gases, si esta contiene mayor cantidad de gases pesados la velocidad disminuye y si tiene mayor concentración de gases ligeros la velocidad aumenta.

**Tabla 12:** Velocidad y caudal de los gases en ductos. *\*No se determinó debido a que la unidad no estaba en funcionamiento.*

Ducto	Velocidad (m/s)			Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
	Prom	12/12	05/13	Prom	12/12	05/13
5	11.76	9.98	13.55	1.52	1.29	1.75
6A	28.52	35.27	21.77	2.08	2.58	1.59
6B	15.90	15.67	16.12	1.16	1.14	1.18
7A	39.03	39.03	---*	2.85	2.85	---*
7B	16.33	16.33	---*	1.19	1.19	---*
8A	27.10	27.71	26.50	1.98	2.02	1.94
8B	15.30	10.08	20.53	1.12	0.74	1.50
9A	26.59	28.86	24.33	1.94	2.11	1.78
9B	10.39	1.75	19.02	0.76	0.13	1.39
<b>General</b>	7.68	10.22	5.17	2.24	2.98	1.50

En la campaña del mes de mayo del 2013 se realizaron perfiles y barridos de velocidad en los ductos de CP4 (UG), CP2 (U6B) y CP1 (U5), estos experimentos en los ductos son para observar el comportamiento de la velocidad en el centro del ducto a lo largo del tiempo y el comportamiento de la misma en diferentes puntos del ducto (perfil). La Figura 13, la Tabla 13 y la Tabla 14 muestran los valores obtenidos de los ductos muestreados, así como sus respectivos gráficos.

En los tres ductos existe un comportamiento similar, la medición en un punto del ducto de los tres ductos indicó que el flujo de los gases se mantiene constante, y el perfil mostró que la velocidad de los gases disminuye si nos vamos alejando del centro del ducto hacia las paredes, esto último se debe a que existe fuerza de fricción entre los gases y el ducto.

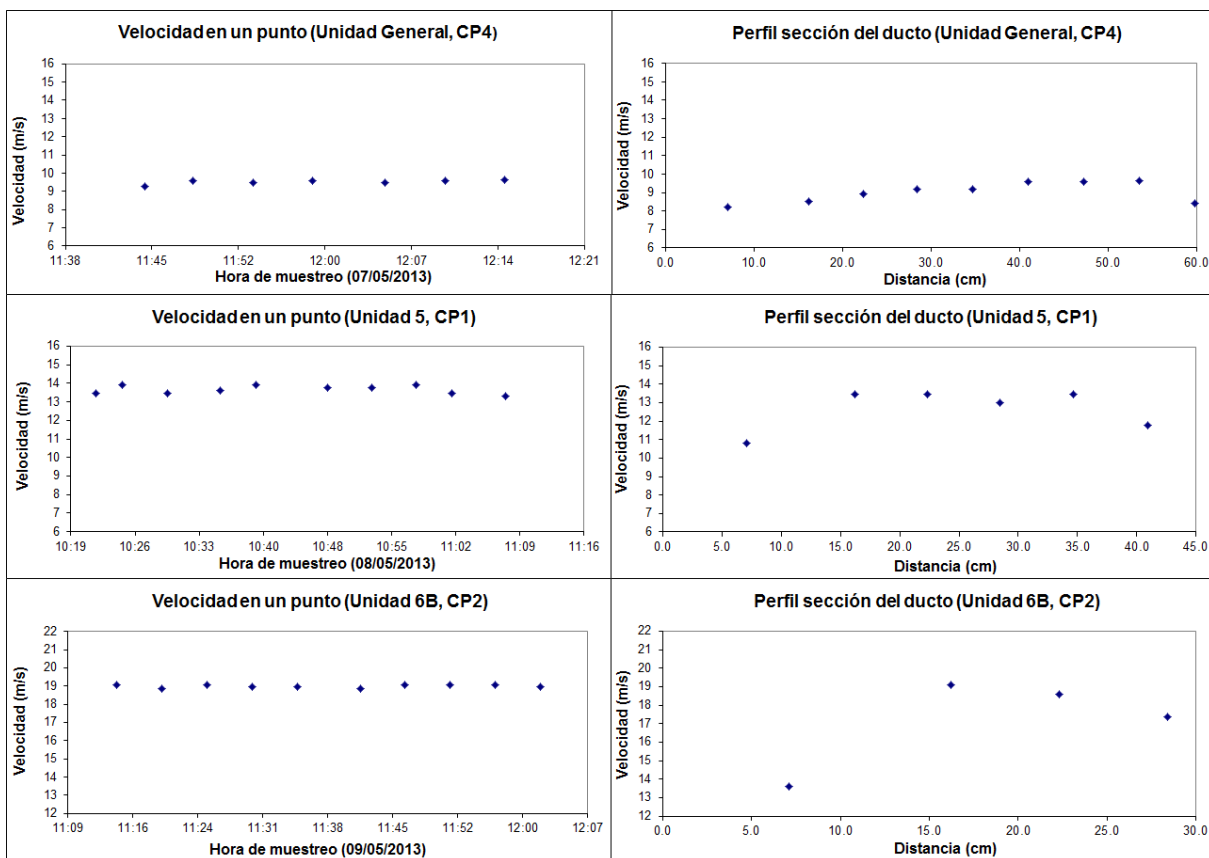
**Tabla 13:** Datos del comportamiento en un punto de velocidad en los ductos de Cerro Prieto.

<b>Comportamiento de la Velocidad</b>					
<b>General</b>		<b>6B</b>		<b>5</b>	
<i>Hora</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Hora</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Hora</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>
07/05/2013 11:45	9.29	09/05/2013 11:15	19.08	08/05/2013 10:22	13.46
07/05/2013 11:49	9.56	09/05/2013 11:20	18.88	08/05/2013 10:25	13.90
07/05/2013 11:54	9.47	09/05/2013 11:25	19.08	08/05/2013 10:30	13.46
07/05/2013 11:59	9.56	09/05/2013 11:30	18.98	08/05/2013 10:36	13.61
07/05/2013 12:05	9.47	09/05/2013 11:35	18.98	08/05/2013 10:40	13.90
07/05/2013 12:10	9.56	09/05/2013 11:42	18.88	08/05/2013 10:48	13.75
07/05/2013 12:15	9.65	09/05/2013 11:47	19.08	08/05/2013 10:53	13.75
		09/05/2013 11:52	19.08	08/05/2013 10:58	13.90
		09/05/2013 11:57	19.08	08/05/2013 11:02	13.46
		09/05/2013 12:02	18.98	08/05/2013 11:08	13.31

Este comportamiento de los ductos indica que estos tienen un comportamiento estable durante el tiempo en que se realiza la recolección de muestras, ya que las mediciones en el centro del ducto duraron entre 30 min a 60 min y el tiempo de recolección de muestra es de aproximadamente 15 min, por lo cual se puede considerar que las muestras que se recolectaron no estarán afectadas por este parámetro.

**Tabla 14:** Datos de los perfiles de velocidad en una sección en ductos de Cerro Prieto.

<b>Perfil de Velocidad</b>					
<b>General</b>		<b>6B</b>		<b>5</b>	
<i>Distancia de la Sección(cm)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Distancia de la Sección(cm)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Distancia de la Sección(cm)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>
7.1	8.20	7.1	13.62	7.1	10.80
16.2	8.51	16.2	19.08	16.2	13.46
22.3	8.91	22.3	18.59	22.3	13.46
28.4	9.20	28.4	17.38	28.4	13.00
34.7	9.20			34.7	13.46
41.0	9.56			41.0	11.75
47.2	9.56				
53.5	9.65				
59.8	8.41				



**Figura 13: Perfiles y Barridos de velocidad de los ductos General, 5 y 6B de Cerro Prieto.**

## 8.2. Concentración de Gases en Venteos

La concentración de los gases de venteo de todas las chimeneas de las unidades de Cerro Prieto se calcularon con los cromatogramas que se obtuvieron con la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Se determinó la concentración de veinticinco compuestos diferentes en cada muestra. En el Anexo 1 se muestran las concentraciones de cada muestra.

La Figura 14 muestra como ejemplo un cromatograma obtenido de una muestra con nombre 6B CP2 15:30 Mayo 2013, lo cual indica que la muestra fue tomada en la campaña de mayo del 2013 de la unidad 6B de la casa de máquinas 2 a las 15:30 horas. En este cromatograma se pueden observar los 25 compuestos a excepción del oxígeno, nitrógeno, óxido nítrico, metano y monóxido de carbono; los primeros cuatro se encuentran en el

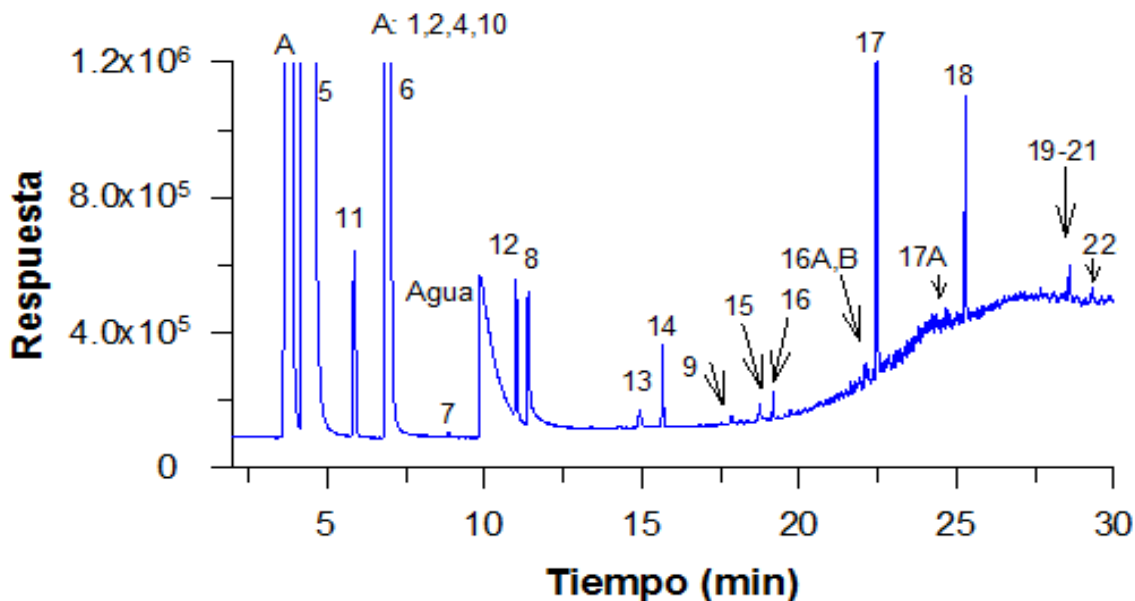


pico A ya que son de masas muy similares (32, 28, 30 y 15 respectivamente). Para cuantificación de estos cuatro compuestos se utilizó el método de ion específico (SIM), en el cual se indica la relación  $m/z$  que se quiere analizar. Para el monóxido de carbono sucede que la concentración de este gas es muy pequeña (al orden de trazas, por cada 1 %mol de  $\text{CO}_2$  hay un 6 ppm de CO (DesMarais y Nehring, 1981)) y por lo tanto no se puede determinar.

La columna utilizada fue CP-PoraBOND Q de sílice fundida de baja polaridad está diseñada para la separación de compuestos del petróleo; separa el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CH}_4$  del  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  y CO, además sirve para separación de compuestos de bajo peso molecular que contengan azufre y por último separan hidrocarburos de C1 a C6. Lo cual cumple los requisitos para ser utilizada en este caso y esto queda demostrado en el cromatograma, ya que se observa que la separación adecuada de los gases inorgánicos (1 al 9) como de los orgánicos (10-22) en ambos casos el orden de retención depende del peso molecular de los compuestos analizados.

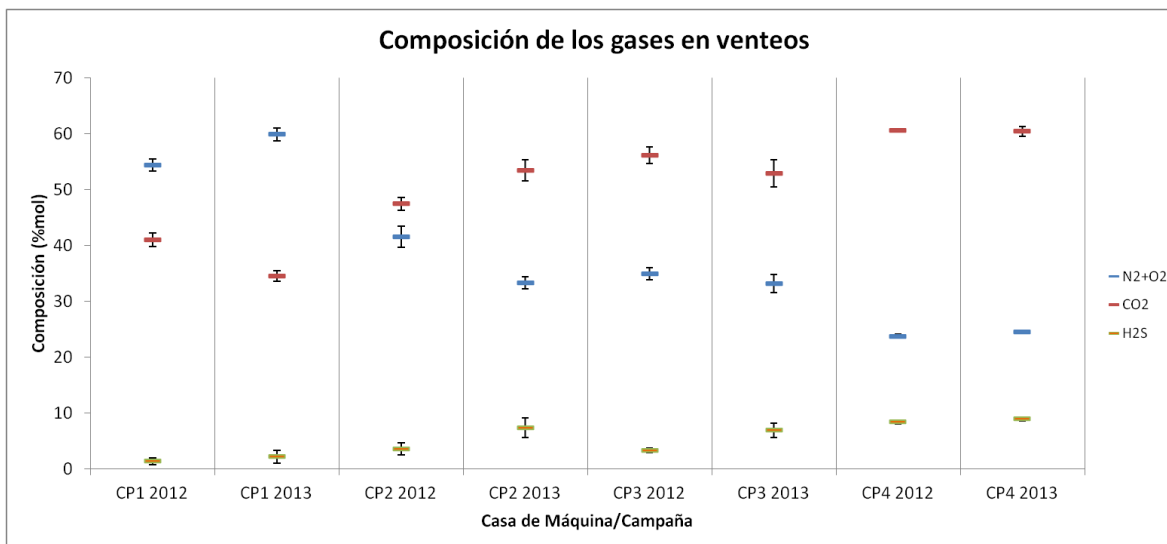
En el cromatograma se observa un pico el cual fue identificado como agua, la presencia del agua se puede explicar de 2 formas; la primera que los gases incondensables disuelvan una pequeña cantidad de vapor de agua y la segunda el aire que se inyecta para extraer los gases incondensables contiene vapor de agua disuelto.

Como tenemos agua en las muestras, no podemos identificar un gas relevante en este estudio, este gas es el  $\text{NH}_3$  es cual se encuentra en los fluidos geotérmicos, esto se debe a que el amoniaco tiene propiedades muy similares a las del agua (PM 17 y 18 y momento dipolar de 1.42 y 1.83 respectivamente para ambos casos) y por lo tanto se enciman los picos.



**Figura 14:** Ejemplo de un cromatograma de una muestra de gases incondensables en Cerro Prieto. 1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

En el Anexo 2 se muestran los cromatogramas de todas las muestras analizadas en las dos campañas y en el Anexo 3 están los espectros de masas teóricos de todos los gases detectados. Las Figuras 15 y 16 muestran la distribución de las concentraciones de los gases más abundantes en las muestras, estos gases son N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en la primera figura, CH<sub>4</sub>, Benceno y otros (la suma de los gases restantes) en la segunda, estas figuras muestran los resultados por casa de máquina y por año. La Tabla 15 y Tabla 16 muestran la concentración y los errores calculados mostrados en las figuras.

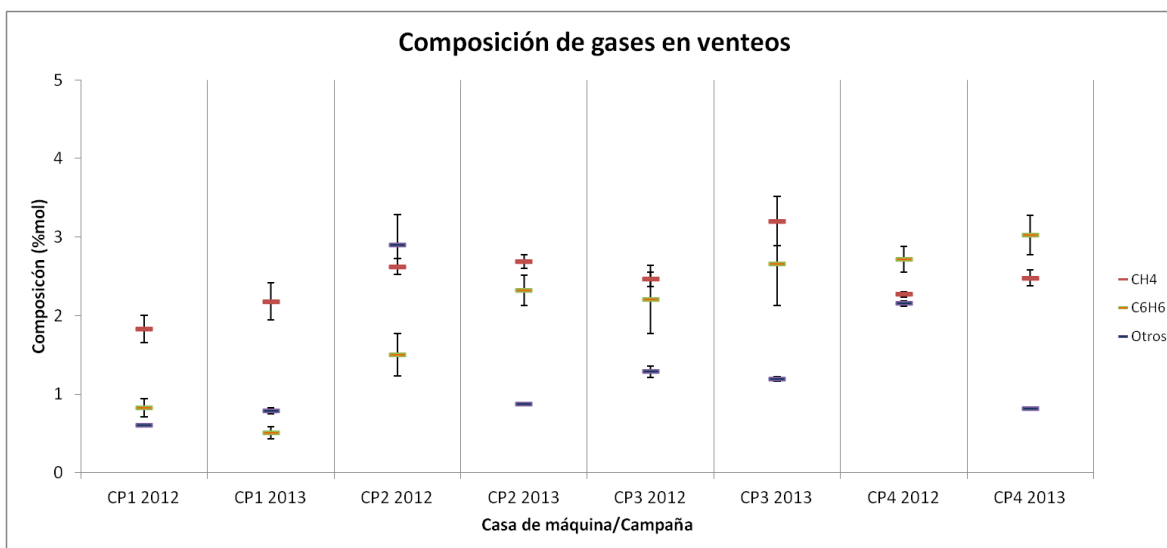


**Figura 15:** *Composición de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en los venteos por casa de máquinas y campaña.*

Se puede observar en la Figura 15 que la concentración tanto para el CO<sub>2</sub>, como para H<sub>2</sub>S en el año 2013 en general fue ligeramente mayor que en el año 2012, lo cual corresponde a las temperaturas determinadas, es decir tienen la misma tendencia, quizás debido a la naturaleza de los pozos que alimentan las casas de máquinas y/o a los sistemas de generación eléctrica. La concentración de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S fue menor en CP1 y va aumentando hacia CP4, se logra observar esta tendencia con mayor facilidad con el CO<sub>2</sub>, esta tendencia obtenida corresponde con los resultados de los pozos obtenidos por Taran et. al. (2013), ya que en sus diagramas se observa este mismo patrón en la concentración.

También se puede observar la gran cantidad de aire (N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>) presente en los gases de venteo debido a que se agrega aire en el sistema de extracción de gases incondensables, además sabemos que el nitrógeno y el oxígeno se encuentran presentes en los gases de venteo pero en cantidades mínimas, esto se conoce por los resultados obtenidos por Nehring y Fausto (1979) y por Nehring y D'Amore (1984) ya que las concentraciones que obtuvieron para N<sub>2</sub> son menores al 2 %mol en ambos casos y para el O<sub>2</sub> es nula. No se puede realizar una discriminación (no se puede calcular la concentración real) de estos dos gases debido a que la CFE no tiene datos de la cantidad de aire que se inyecta a la

mezcla de gases incondensables, ya que ellos solo prenden las bombas de extracción de gases incondensables cuando detectan que la presión de la mezcla es baja, y por lo tanto no reportan la cantidad de aire que utilizan.



**Figura 16:** *Composición de CH<sub>4</sub>, benceno y otros\* en los venteos por casa de máquinas y campaña. (\* Suma de los hidrocarburos e inorgánicos restantes).*

La Figura 16 indica que por lo general el hidrocarburo más abundante es el metano, pero esto es normal ya que es el hidrocarburo que más fácil se forma energéticamente, pero la concentración es ligeramente mayor respecto a otros hidrocarburos (etano y benceno), lo cual corresponde a la explicación de DesMarais y Nehring (1981). La suma de todos los hidrocarburos con excepción del metano alcanza por mucho al 5 %mol lo cual no corresponde con lo reportado con Nehring y Fausto (1979) ya que la concentración encontrada por ellos es de 2 %mol, lo que indica que debe de haber una fuente durante el proceso de producción de electricidad que provoque el aumento de estos hidrocarburos, además al obtener las relaciones del benceno con el metano se obtuvieron valores entre 1 y 2 aproximadamente lo cual no concuerda con lo reportado en los pozos por Taran et. al. (2013) donde ellos encontraron una relación de 135.

**Tabla 15: Concentración promedio de gases por casa de máquinas (%mol).**

	2012				2013			
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP1	CP2	CP3	CP4
<b>N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub></b>	54.3750	41.5167	34.9000	23.7200	59.8600	33.3167	33.1625	24.5320
<b>CO<sub>2</sub></b>	41.0250	47.4167	56.1500	60.5667	34.5400	53.4500	52.8875	60.4200
<b>H<sub>2</sub>S</b>	1.3475	3.5717	3.3150	8.3533	2.1380	7.3500	6.9075	8.8760
<b>CH<sub>4</sub></b>	1.8288	2.6233	2.4625	2.2700	2.1820	2.6917	3.2038	2.4800
<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	0.8259	1.5033	2.2075	2.7200	0.5083	2.3183	2.6550	3.0240
<b>Otros</b>	0.6039	2.9043	1.2862	2.1564	0.7872	0.8722	1.1935	0.8140

En las Tablas 15 y 16 se puede ver los datos y errores presentados en las Figuras 15 y 16. Los errores para N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros son pequeños (menores al 10%), los gases que tienen errores más altos (entre 10 % y 20 %) en ambas campañas son el benceno y el H<sub>2</sub>S, esto nos indica que los datos para estos dos últimos gases están más dispersos.

**Tabla 16: Error en la concentración de gases por casa de máquinas.**

	2012				2013			
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP1	CP2	CP3	CP4
<b>N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub></b>	2.10%	4.47%	3.10%	1.48%	1.84%	3.35%	4.97%	1.05%
<b>CO<sub>2</sub></b>	2.98%	2.53%	2.69%	0.42%	2.71%	3.62%	4.48%	1.45%
<b>H<sub>2</sub>S</b>	14.46%	16.82%	12.05%	4.12%	13.29%	12.72%	10.68%	3.18%
<b>CH<sub>4</sub></b>	9.63%	3.80%	3.73%	1.59%	10.93%	3.21%	9.64%	4.06%
<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	13.87%	18.17%	19.75%	6.02%	14.37%	8.37%	19.68%	8.26%
<b>Otros</b>	3.23%	13.03%	5.39%	1.58%	4.87%	1.64%	2.20%	1.44%

En las Tablas 17 y 18, la cuales contienen la concentración promedio por ducto en los dos años; se puede observar que las concentraciones de gases en los ductos de alta y baja presión (A y B) para las unidades 6 a 9 mantienen una concentración similar en las dos campañas, lo cual se esperaba ya que en el sistema flash doble la mezcla de gases al pasar por el primer separador (A), el condensado de este se recalienta para pasar a un segundo separador (B) por lo tanto la mezcla de gases debe de ser similar.

**Tabla 17: Concentración promedio de gases en venteo por ducto diciembre 2012 (%mol).**

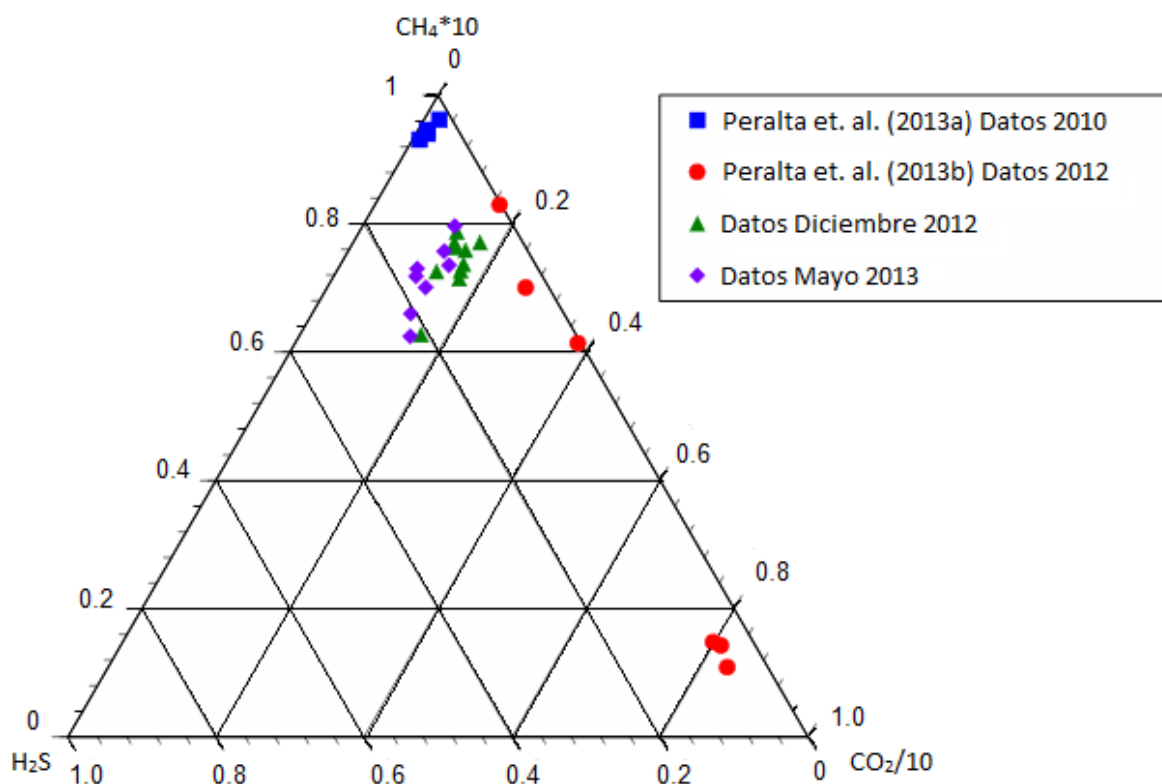
Nombre	Formula	U5	U6A	U6B	U7A	U7B	U8A	U8B	U9A	U9B	UGral
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	45.0350	31.6800	33.9400	36.2000	41.4400	28.2900	28.0000	28.5000	30.7800	23.1550
Oxígeno	O <sub>2</sub>	9.3400	5.9700	6.2600	8.4000	8.0600	5.4100	5.5000	5.9000	7.2200	4.6600
Monóxido de Carbono	CO										
Óxido Nítrico	NO	0.0873	0.0464	0.0551	0.0567	0.0640	0.0302	0.0364	0.0405	0.0491	0.0165
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	41.0250	47.7500	49.0000	47.4000	46.3000	57.1000	56.9000	56.7000	53.9000	57.6000
Sulfuro de Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	1.3475	4.7900	3.2300	3.1100	2.7550	3.5500	3.6900	3.2300	2.7900	7.2300
Sulfuro de Carbonilo	COS	0.0027	0.0068	0.0073	0.0051	0.0055	0.0046	0.0047	0.0055	0.0065	0.0083
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	0.0758	3.6150	2.6200	0.5740	1.9125	0.2320	0.3150	0.3690	0.4580	2.0050
Sulfuro de Carbono	CS <sub>2</sub>	0.0037	0.0107	0.0135	0.0070	0.0096	0.0042	0.0051	0.0039	0.0057	0.0064
Metano	CH <sub>4</sub>	1.8288	2.5250	2.6100	2.6200	2.7300	2.4600	2.3400	2.4900	2.5600	2.1800
Etano	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	0.0798	0.1115	0.1100	0.0929	0.1024	0.1590	0.1730	0.1940	0.1670	0.1190
Propano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0284	0.0304	0.0300	0.0276	0.0299	0.0419	0.0451	0.0584	0.0508	0.0275
Isobutano	CH <sub>3</sub> CH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>3</sub>	0.0190	0.0145	0.0148	0.0146	0.0153	0.0216	0.0233	0.0335	0.0294	0.0133
Butano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0241	0.0256	0.0252	0.0222	0.0239	0.0294	0.0316	0.0457	0.0396	0.0203
Isopentano	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0097	0.0087	0.0087	0.0086	0.0092	0.0111	0.0118	0.0196	0.0174	0.0058
Pentano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	0.0076	0.0106	0.0106	0.0089	0.0093	0.0133	0.0137	0.0213	0.0184	0.0066
Hexano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>						0.0080	0.0082	0.0119	0.0101	0.0032
Metilciclopentano	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> CH <sub>3</sub>						0.0041	0.0048	0.0082	0.0069	0.0028
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.8259	1.7250	1.7500	1.2200	1.3000	2.9900	2.4700	1.8600	1.5100	2.4375
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>						0.0038	0.0040	0.0064	0.5350	0.0027
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub>	0.1918	0.2005	0.1900	0.1820	0.1950	0.3040	0.3420	0.3520	0.2600	0.2678
o-Xileno	o-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0182	0.0172	0.0203	0.0157	0.0154	0.0241	0.0224	0.0327	0.0223	0.0178
m-Xileno	m-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0335	0.0385	0.0397	0.0326	0.0366	0.0463	0.0474	0.0668	0.0442	0.0344
p-Xileno	p-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>										
Etilbenceno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0223	0.0140	0.0154	0.0192	0.0203	0.0282	0.0282	0.0357	0.0367	0.0163

**Tabla 18:** *Concentración promedio de gases en venteo por ducto mayo 2013 (%mol). \* No determinado.*

Nombre	Formula	U5	U6A	U6B	U7A*	U7B*	U8A	U8B	U9A	U9B	UGral
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	48.2600	29.3497	27.2347			29.9916	26.9328	32.5500	37.7100	19.9320
Oxígeno	O <sub>2</sub>	11.6000	5.3170	4.7288			5.4750	15.7672	6.3000	6.8900	4.6000
Monóxido de Carbono	CO										
Óxido Nítrico	NO	0.1122	0.0314	0.0252			0.0295	0.0303	0.0546	0.0539	0.0837
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	34.5400	52.9000	54.0000			52.1667	51.8500	52.1500	46.4667	60.4200
Sulfuro de Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	2.1380	6.4700	8.2300			7.7667	7.7150	4.0450	3.9300	8.8760
Sulfuro de Carbonilo	COS	0.0042	0.0049	0.0047			0.0058	0.0055	0.0044	0.0048	0.0056
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	0.2366	0.2000	0.1423			0.1853	0.2090	0.1834	0.1957	0.0191
Sulfuro de Carbono	CS <sub>2</sub>	0.0070	0.0070	0.0071			0.0053	0.0037	0.0075	0.0073	0.0041
Metano	CH <sub>4</sub>	2.1820	2.7433	2.6400			3.2967	3.4750	2.5650	2.6667	2.4800
Etano	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	0.0824	0.1390	0.1443			0.2300	0.2375	0.1384	0.1480	0.1574
Propano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0270	0.0366	0.0382			0.0632	0.0638	0.0389	0.0411	0.0369
Isobutano	CH <sub>3</sub> CH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>3</sub>	0.0158	0.0191	0.0199			0.0356	0.0355	0.0219	0.0233	0.0180
Butano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0220	0.0311	0.0322			0.0482	0.0485	0.0300	0.0315	0.0274
Isopentano	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0094	0.0110	0.0111			0.0190	0.0191	0.0126	0.0130	0.0088
Pentano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	0.0093	0.0110	0.0113			0.0213	0.0214	0.0123	0.0125	0.0102
Hexano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>	0.0048	0.0062	0.0062			0.0122	0.0123	0.0063	0.0065	0.0056
Metilciclopentano	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> CH <sub>3</sub>	0.0048	0.0056	0.0060			0.0078	0.0079	0.0051	0.0056	0.0045
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.5083	2.2967	2.3400			3.0000	2.9950	1.5215	1.5243	3.0240
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0.0036	0.0058	0.0057			0.0065	0.0065	0.0050	0.0046	0.0036
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub>	0.1718	0.2983	0.3007			0.4757	0.4660	0.2355	0.2302	0.3424
o-Xileno	o-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0161	0.0192	0.0192			0.0310	0.0319	0.0162	0.0206	0.0167
m-Xileno	m-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0328	0.0493	0.0490			0.0770	0.0756	0.0364	0.0349	0.0429
p-Xileno	p-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0078									
Etilbenceno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.0195	0.0226	0.0231			0.0446	0.0424	0.0166	0.0262	0.0273

Se observó en las Tablas anteriores que los resultados son muy similares entre sí tanto para el año 2012 como para el año 2013, tanto para los gases más abundantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  y benceno) como para los gases menos abundantes (Hidrocarburos de C2 a C8,  $\text{NO}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CS}_2$ ). Lo importante a destacar es la diversidad de hidrocarburos que se han encontrado en estas muestras, DesMarais y Nehring (1981) ya habían reportado su presencia, pero no se sabía la concentración individual de ellos.

En los dos muestreos se encontró que el hidrocarburo más abundante es el metano (1.5 a 3.5 %mol), de este sigue el benceno (0.5 a 3.1 %mol), de aquí siguen los alcanos tanto lineales como isométricos (0.1 a 0.5 %mol), después los cicloalcanos que se han encontrado a nivel de trazas (0.004 a 0.016 %mol) y por último derivados de benceno como tolueno, xilenos y etilbenceno los cuales tiene concentraciones similares a los alcanos (0.1 a 0.5 %mol).



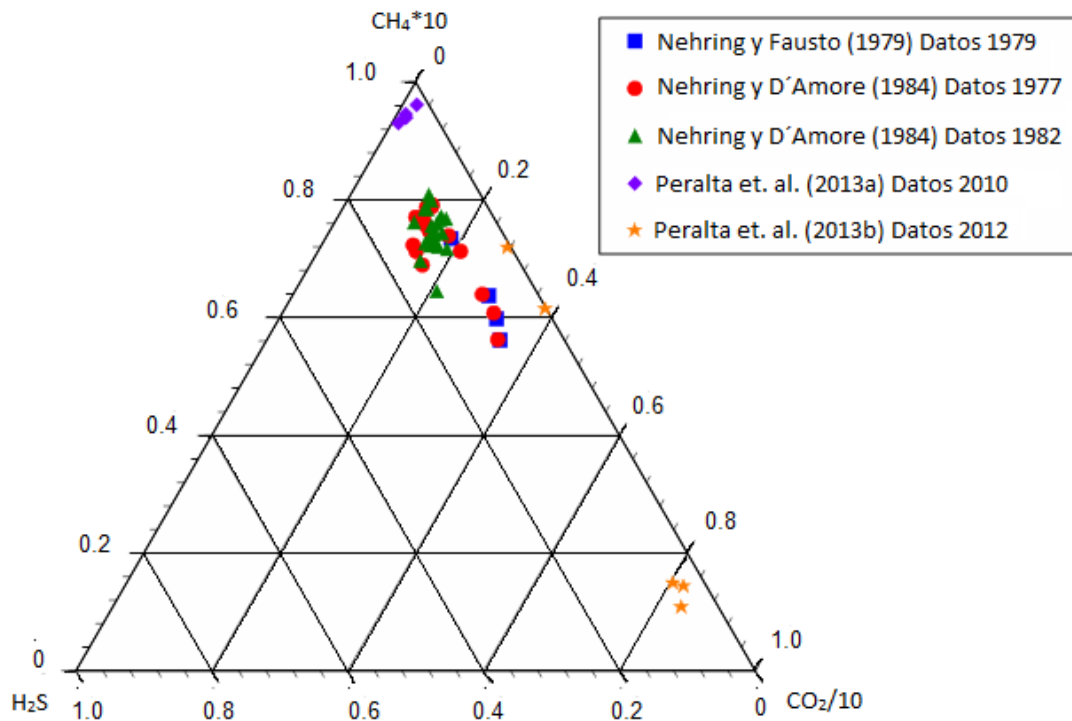
**Figura 17:** Comparación de la composición relativa de  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{S}$ - $\text{CH}_4$  de los venteos en Cerro Prieto.



La Figura 17 muestra la comparación de las concentraciones relativas  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{S-CH}_4$  obtenidas en este estudio con las concentraciones obtenidas en los venteos en estudios de Peralta et. al. (2013a, 2013b) y.

La Figura 17 indicó que existen altas concentraciones de metano en los datos del 2010, esto puede ser debido a que la toma de recolección de los gases fue diferente, ya que en la toma de muestra conectaron un sistema en T, de un lado colocaron una bomba de vacío y del otro lado conectaron el matraz de recolección de muestra, por lo tanto esto pudo aumentar la concentración de los gases de bajo peso molecular debido a la succión de la bomba, por esta razón el metano se encontró en concentraciones muy altas; otro detalle es que el programa cromatográfico en este caso fue diferente, el tiempo de análisis fue menor en este caso y además el barrido de masas fue hasta 100 m/z, lo cual provoca que se detectaran menos compuestos, ya que el análisis se determinó por número de moles y por lo tanto si tenemos en este caso específico menos hidrocarburos aumenta el valor (%mol) de los hidrocarburos detectados.

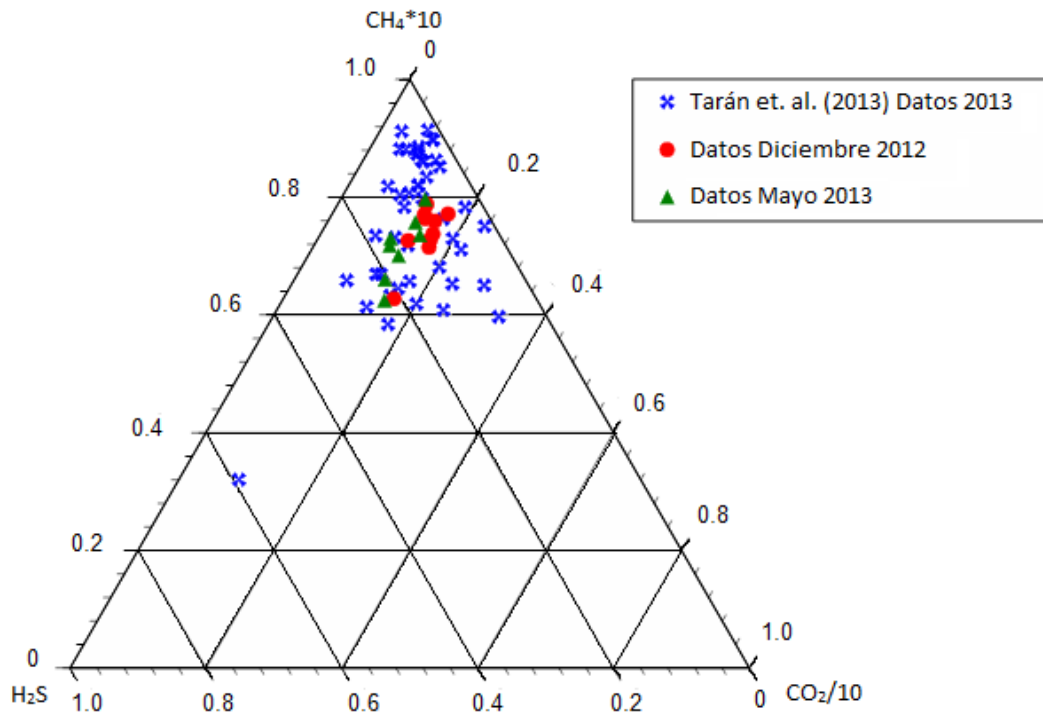
Con los datos de Peralta et. al. del 2012 se encontraron concentraciones de aire bajas en las unidades 8 a 10-13 esto nos indica que las bombas de aire no estaban funcionando en este momento, mientras que la concentración de aire en las otras unidades es alta, lo que indica que las bombas en estas unidades si estaban funcionando. La concentración de todos los hidrocarburos es mucho más baja que en nuestro estudio, ya que ellos obtuvieron concentraciones de metano cuatro veces más bajas que las que se obtuvieron en este estudio (0.10 a 0.85 %mol), para benceno aproximadamente seis veces más bajas (0.05 a 0.55 %mol), para los alcanos cinco veces menor (0.03 a 0.09 %mol) y para aromáticos también cinco veces menor (0.02 a 0.10 %mol). Lo que nos indica que existe una relación, no por la concentración de los hidrocarburos, sino por la proporción de ellos en la muestra, es decir si la concentración de metano baja, podemos ver que la concentración de los demás hidrocarburos también baja, pero no solo baja, sino que lo hace de manera proporcional a la cantidad que baja el metano.



**Figura 18: Comparación de la composición relativa de  $CO_2$ - $H_2S$ - $CH_4$  de los venteos y pozos en Cerro Prieto.**

En las Figuras 18 y 19 se puede observar que las concentraciones relativas que se obtuvieron son similares a las de los pozos tanto para los datos del 1977 a 1982 como para los del 2013, lo cual nos indica que si existe un cambio aparente en la concentración en alguno de estos gases, los otros sufrirán un cambio similar; es decir que no existen reacciones que afecten en gran medida la concentración de estos gases durante en proceso de producción de electricidad.

Esto indica que el cálculo de emisiones para estos 3 gases debe de ser similar tanto para los pozos como para los venteos, ya que estas Figuras nos indica que lo que los gases incondensables que salen de los pozos de producción deben de salir en cantidades similares en los ductos de venteo.



**Figura 19:** Comparación de la composición relativa de  $CO_2$ - $H_2S$ - $CH_4$  de los venteos y pozos en Cerro Prieto.

En las Tablas 19 y 20 se muestran las tasas de emisión de cada gas por ducto en cada campaña, para poder saber las emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto, el cálculo se realizó utilizando la ecuación (12), la cual se basa en la ley de gases ideales.

$$E = Q \cdot PM \cdot \%mol \tag{12}$$

Donde **E** es la tasa de emisión (ton/día), **Q** es el flujo másico (mol/día) calculado para cada ducto utilizando el caudal y **PM** es el peso molecular de cada compuesto (ton/mol).

Tomando las consideraciones anteriores la anterior ecuación (12) quedaría como la siguiente ecuación (13).

$$E = \frac{CP}{RT} \cdot PM \cdot \%mol \quad (13)$$

Donde **C** es el caudal (m<sup>3</sup>/día), **P** es la presión atmosférica con valor de 1 (atm), **R** es la constante universal de los gases ideales y es igual a 0.000082 m<sup>3</sup>·atm/K·mol, **T** es la temperatura del ducto (K) y **PM** es el peso molecular de cada compuesto (ton/mol).

**Tabla 19: Emisiones de gases de venteo por ducto diciembre 2012 (ton/día).**

Nombre	U5	U6A	U6B	U7A	U7B	U8A	U8B	U9A	U9B	UGral	TOTAL
Nitrógeno	52.41	49.86	22.90	66.27	30.69	35.48	13.82	40.10	2.60	60.28	374.41
Oxígeno	12.42	10.74	4.83	17.57	6.82	7.75	3.10	9.49	0.70	13.86	87.29
Monóxido de Carbono	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
Óxido Nítrico	0.12	0.08	0.04	0.12	0.05	0.04	0.02	0.06	0.00	0.05	0.59
Dióxido de Carbono	79.40	124.98	54.98	144.31	57.02	119.10	46.70	132.69	7.57	249.38	1016.13
Sulfuro de Hidrógeno	2.02	9.69	2.80	7.32	2.62	5.72	2.34	5.84	0.30	24.19	62.84
Sulfuro de Carbonilo	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.05	0.16
Dióxido de Azufre	0.21	13.76	4.28	2.54	3.43	0.70	0.38	1.26	0.09	12.63	39.28
Sulfuro de Carbono	0.01	0.05	0.03	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.05	0.23
Metano	1.29	2.40	1.06	2.90	1.22	1.87	0.70	2.12	0.13	3.43	17.12
Etano	0.11	0.20	0.08	0.19	0.09	0.23	0.10	0.31	0.02	0.35	1.67
Propano	0.05	0.08	0.03	0.08	0.04	0.09	0.04	0.14	0.01	0.12	0.68
Isobutano	0.05	0.05	0.02	0.06	0.02	0.06	0.03	0.10	0.01	0.08	0.47
Butano	0.06	0.09	0.04	0.09	0.04	0.08	0.03	0.14	0.01	0.12	0.69
Isopentano	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.08	0.00	0.04	0.32
Pentano	0.02	0.05	0.02	0.04	0.02	0.05	0.02	0.08	0.00	0.05	0.35
Hexano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.05	0.00	0.03	0.13
Metilciclopentano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.02	0.09
Benceno	2.83	8.00	3.48	6.58	2.84	11.06	3.59	7.72	0.38	18.71	65.19
Ciclohexano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.14	0.02	0.22
Tolueno	0.78	1.10	0.45	1.16	0.50	1.33	0.59	1.72	0.08	2.42	10.12
o-Xileno	0.08	0.11	0.05	0.12	0.05	0.12	0.04	0.18	0.01	0.19	0.95
m-Xileno	0.16	0.24	0.11	0.24	0.11	0.23	0.09	0.38	0.01	0.36	1.93
p-Xileno	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
Etilbenceno	0.10	0.09	0.04	0.14	0.06	0.14	0.06	0.20	0.01	0.17	1.02

**Tabla 20: Emisiones de gases de venteo por ducto mayo 2013 (ton/día). \*Se utilizaron las emisiones de diciembre 2012.**

Nombre	U5	U6A	U6B	U7A*	U7B*	U8A	U8B	U9A	U9B	UGral	TOTAL
Nitrógeno	76.05	28.22	18.66	66.27	30.69	35.49	24.32	36.05	28.82	26.42	370.99
Oxígeno	20.89	5.84	3.70	17.57	6.82	7.40	6.27	7.97	6.02	6.97	99.47
Monóxido de Carbono	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
Óxido Nítrico	0.2	0.03	0.02	0.12	0.05	0.04	0.03	0.07	0.05	0.13	0.74
Dióxido de Carbono	90.51	84.59	61.54	144.31	57.02	102.67	77.88	96.06	59.06	133.18	906.82
Sulfuro de Hidrógeno	4.33	7.99	7.25	7.32	2.62	11.81	8.95	5.76	3.86	15.12	75.01
Sulfuro de Carbonilo	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.13
Dióxido de Azufre	0.9	0.47	0.24	2.54	3.43	0.53	0.46	0.49	0.36	0.06	9.47
Sulfuro de Carbono	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.21
Metano	2.08	1.6	1.09	2.90	1.22	2.36	1.9	1.72	1.23	1.99	18.08
Etano	0.15	0.15	0.11	0.19	0.09	0.31	0.24	0.17	0.13	0.24	1.78
Propano	0.07	0.06	0.04	0.08	0.04	0.12	0.1	0.07	0.05	0.08	0.72
Isobutano	0.05	0.04	0.03	0.06	0.02	0.09	0.07	0.05	0.04	0.05	0.51
Butano	0.08	0.07	0.05	0.09	0.04	0.13	0.1	0.07	0.05	0.08	0.75
Isopentano	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.35
Pentano	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02	0.07	0.05	0.04	0.03	0.04	0.37
Hexano	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02	0.20
Metilciclopentano	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.16
Benceno	2.36	6.51	4.73	6.58	2.84	10.47	7.97	4.97	3.43	11.82	61.68
Ciclohexano	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.14
Tolueno	0.94	1	0.72	1.16	0.50	1.96	1.46	0.91	0.61	1.58	10.83
o-Xileno	0.1	0.07	0.05	0.12	0.05	0.15	0.12	0.07	0.06	0.09	0.88
m-Xileno	0.21	0.19	0.13	0.24	0.11	0.37	0.27	0.16	0.11	0.23	2.02
p-Xileno	0.05	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0.05
Etilbenceno	0.12	0.09	0.06	0.14	0.06	0.21	0.15	0.07	0.08	0.14	1.14

En las tablas anteriores se observa que el ducto general de la casa de máquinas 4 es la que emite más CO<sub>2</sub> a la atmósfera en el año 2012 y 2013 (249.38 y 133.18 ton/día respectivamente), lo cual era de esperarse debido a que la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en este ducto, pero si hacemos el cálculo por casa de máquinas podemos ver que la casa de máquinas que contamina más es CP2 (381.29 y 347.46 tonCO<sub>2</sub>/día), seguido de CP3 (306.06 y 335.67 tonCO<sub>2</sub>/día), CP4 y por último CP1 (79.40 y 90.51 tonCO<sub>2</sub>/día); este patrón se repite para la mezcla en general. Al calcular las tasas de emisión por MW podemos saber que la casa de maquinas más eficiente es CP3 (1.46 tonCO<sub>2</sub>/díaMW), después le siguen CP2 (1.65 tonCO<sub>2</sub>/díaMW), CP4 (1.91 tonCO<sub>2</sub>/díaMW) y finalmente CP1 (2.84 tonCO<sub>2</sub>/díaMW).

Se compararon las emisiones de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno con las emisiones reportadas por Taran et. al. (2013), y se encontró que hay una buena estimación en el caso del H<sub>2</sub>S ya que existe una diferencia muy pequeña, para el caso del CO<sub>2</sub> existe una diferencia mayor pero se considera que es una buena estimación ya que Taran et. al. (2013) realizaron una aproximación ya que no midió las concentraciones de todos los pozos activos.

***Tabla 21: Emisiones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (ton/día).***

	CO <sub>2</sub>	Diferencia CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	Diferencia H <sub>2</sub> S
<b>Pozos</b>	824 ± 50	0.00	69 ± 4	0.00
<b>Venteo</b>	961 ± 57	16.71%	68 ± 14	0.13%

## 9. CONCLUSIONES

- Los ductos no tienen irregularidades con respecto al flujo de gases, ya que se observó que no hubo cambios en las velocidades medidas en el centro de cada ducto, y con los perfiles se comprobó que existe mayor velocidad en el centro de los ductos.
- La operatividad de la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto depende mucho de los pozos con los cuales se están alimentando las unidades y a la calidad del vapor de los mismos, y esto se puede observar tanto en la velocidad y temperatura de los gases, ya que en ambas campañas se obtienen velocidades muy diferentes, pero temperaturas muy parecidas. Lo cual se ve reflejado directamente en el caudal de los gases.
- Como era de esperarse las gases más abundantes que se emiten a la atmosfera en el Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto son nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno, metano y benceno. El benceno en concentraciones altas es poco común. Se cree que existe una fuente que contribuye al aumento ya que la relación es de dos órdenes de magnitud mayor a comparación de la de los pozos.
- Se encontró un patrón en la concentración promedio del dióxido de carbono y de sulfuro de hidrogeno, donde la concentración de ambos en CP1 es menor 37.78 % y 1.74 % respectivamente y en CP4 es mayor 59.01 % y 8.05 % respectivamente. Mientras CP2 y CP3 se comportan de manera muy similar debido a que las propiedades y la maquinaria de ambas son iguales 49.56 % y 4.76 % para CP2 y para CP3 son 53.40 % y 4.59 %.



- El punto anterior concuerda con los resultados obtenidos para el nitrógeno y oxígeno, donde la concentración de ambos en CP1 es mayor 35.72 % y 21.40 % respectivamente y en CP4 es menor 16.68 % y 9.50 %. y por lo tanto en CP2 y CP3 sucede lo mismo que en caso anterior. Para CP2 24.94 % y 13.99 % y para CP3 22.26 % y 9.50 %.
- La comparación que se realizó con la distribución de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en los pozos obtenida por Taran et. al. (2013), nos dice que hay un mismo patrón en el comportamiento del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto, en CP1 hay menor concentración y en CP4 hay mayor concentración de estos gases. Además de que las composiciones relativas para los gases más abundantes (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>) tienen un patrón muy similar.
- En México solo el 2 % de la energía eléctrica se produce por energía geotérmica. Cerro Prieto emite a la atmósfera aproximadamente 1000 ton/día de CO<sub>2</sub> de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, mientras una planta termoeléctrica que tiene una capacidad similar como la de Salamanca en Guanajuato (560MW combustóleo) la cual produce 5820 t/día (6.05 veces más) o El Sauz en Querétaro (610MW gas y combustóleo) la cual produce 5505 t/día (5.73 veces más). Lo que nos indica que este tipo de plantas (geotérmicas) contaminan en menos, la desventaja de ellas, es que solo se pueden construir en lugares donde exista actividad volcánica y exista un reservorio de agua.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. Arellano V. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) Tendencias Tecnológicas. Vol. 33, 102-114.
2. Barrenechea Z. (2013). Energía geotérmica en México y sus principales impactos ambientales. Monografía Licenciatura Facultad de Ciencias Químicas UV. México, 1-96.
3. Comisión Federal de Electricidad (CFE) (1982). Cuarto Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto. México. Vol. 2, 455-815.
4. Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2011). Proyecto geotermoeléctrico Cerro Prieto V. México. 1-20.
5. Coplen T., et. al. (1979). Origin of the geothermal waters in the Imperial Valley of southern California. University of California. California. E1-E33.
6. DesMarais D., Nehring N. (1981). Molecular carbon isotopic evidence for the origin of geothermal hydrocarbons. Nature. Vol. 22, 826-828. DOI: 10.1038/292826a0.
7. DiPippo R. (2012). Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact. Elsevier, Tercera Edición. Estados Unidos. 249-307.
8. Giggenbach W. (1980). Geothermal gas equilibria. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 44, 2021-2032. DOI: 10.1016/0016-7037(80)90200-8.
9. Giggenbach W. (1981). Geothermal mineral equilibria. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 45, 393-410. DOI: 10.1016/0016-7037(81)90248-9.

10. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (Mexicali Baja California). México. 1-9.
11. Mecado S. (1970). High activity in hydrothermal zones detected by Na/K, Cerro Prieto, Mexico. *Geothermics*. Vol. 2, 1367-1376. DOI: 10.1016/0375-6505(70)90454-2.
12. Mendoza E. y Hernández C. (2004). La protección ambiental en el campo geotérmico de los Azufres, Michoacán. *Geotermia CFE*. Vol. 17, 1-9.
13. Nehring N., D'Amore F. (1984). Gas chemistry and thermometry of the Cerro Prieto, Mexico, geothermal Field. *Geothermics*. Vol. 13, 75-89. DOI: 10.1016/0375-6505(84)90008-7.
14. Nehring N., Fausto F. (1979). Gases in steam from Cerro Prieto Geothermal well with a discussion of steam/gas ratio measurement. *Geothermics*. Vol. 8, 253-255. DOI: 10.1016/0375-6505(79)90048-8.
15. Peralta O., et. al. (2013a). H<sub>2</sub>S emissions from Cerro Prieto power plant, Mexico, and air pollutants measurements in the area. *Geothermics*. Vol. 46, 55-65. DOI: 10.1016/j.geothermics.2012.12.001.
16. Peralta O., et. al. (2013b). Informe Final Cerro Prieto Fase II. Meteorología en temporada fría y balance de materiales. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM. 1-42.
17. Sánchez M. (2012) Diseño conceptual de medidor de gases incondensables para los azufres Michoacán. Tesis Licenciatura Facultad de Ingeniería UNAM. México. 1-98.

18. Taran I., et. al. (2013) Informe del comportamiento químico del fluido del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, Baja California y el flujo de los gases tóxicos de los pozos productivos. Instituto de Geofísica UNAM. 1-24.
  
19. Truesdell A., et. al. (1979) Preliminary isotopic studies of fluid from Cerro Prieto geothermal field, Baja California Mexico. Geothermics. Vol. 8, 223-229. DOI: 10.1016/0375-6505(79)90044-0.
  
20. Truesdell A., et. al. (1981) The origin of the Cerro Prieto geothermal braine. Geothermics. Vol. 10, 225-238. DOI: 10.1065/0375-6506(81)90006-7.
  
21. Welhan J., et. al. (1979) Gas chemistry and helium isotopes at Cerro Prieto. Geothermics. Vol. 8, 241-244. DOI: 10.1016//0375-6505(79)90054-4.

# ANEXO 1: CONCENTRACIÓN GASES EN VENTEOS

**Tabla A1.1: Concentración de gases en venteo (Parte 1).**

Nombre	U5 14:50 12/12 875 mbar Sin Fugas	U5 14:55 12/12 786 mbar Sin Fugas	U5 15:00 12/12 808 mbar Sin Fugas	U5 15:05 12/12 978 mbar Sin Fugas	U5 15:10 12/12 786 mbar Sin Fugas	U5 15:15 12/12 970 mbar Sin Fugas	U5 15:20 12/12 779 mbar Sin Fugas	U5 15:25 12/12 956 mbar Sin Fugas	U6 12:00 12/12 963 mbar Sin Fugas	U6 12:20 12/12 860 mbar Sin Fugas
Nitrógeno	34.7000	38.8000	35.3000	34.4000	36.2000	34.7000	35.9000	34.2000	23.3000	25.0000
Oxígeno	18.4000	20.1000	18.6000	18.3000	19.2000	18.8000	19.0000	18.4000	13.3000	13.7000
Monóxido de Carbono										
Óxido Nítrico	0.0833	0.0867	0.0776	0.0940	0.0839	0.0984	0.0821	0.0926	0.0454	0.0473
Dióxido de Carbono	41.7000	38.4000	41.3000	41.8000	40.5000	41.4000	40.7000	42.4000	46.9000	48.6000
Sulfuro de Hidrógeno	1.6700	0.0000	1.5300	1.9900	1.1100	1.6100	1.3300	1.5400	5.1900	4.3900
Sulfuro de Carbonilo	0.0027	0.0018	0.0029	0.0029	0.0027	0.0027	0.0028	0.0028	0.0070	0.0067
Disulfuro de Oxígeno	0.0581	0.0000	0.0144	0.0445	0.2030	0.1190	0.0601	0.1070	3.5500	3.6800
Sulfuro de Carbono	0.0040	0.0037	0.0027	0.0040	0.0038	0.0036	0.0040	0.0040	0.0107	0.0106
Metano	2.0100	1.6000	1.9300	1.9700	1.8000	1.9600	1.8200	1.5400	2.5600	2.4900
Etano	0.0870	0.0609	0.0795	0.0884	0.0688	0.0845	0.0734	0.0962	0.1200	0.1030
Propano	0.0308	0.0220	0.0283	0.0319	0.0244	0.0297	0.0260	0.0339	0.0327	0.0281
Isobutano	0.0207	0.0147	0.0189	0.0215	0.0168	0.0196	0.0170	0.0235	0.0157	0.0133
Butano	0.0261	0.0188	0.0239	0.0270	0.0208	0.0255	0.0220	0.0284	0.0275	0.0237
Isopentano	0.0103	0.0078	0.0099	0.0107	0.0082	0.0103	0.0090	0.0115	0.0095	0.0079
Pentano	0.0112	0.0081	0.0103	0.0012	0.0090	0.0110	0.0091	0.0012	0.0114	0.0099
Hexano										
Metilciclopentano										
Benceno	0.9100	0.6500	0.8180	0.9390	0.7020	0.8710	0.7550	0.9620	1.8300	1.6200
Ciclohexano										
Tolueno	0.2020	0.1460	0.2000	0.2170	0.1660	0.2110	0.1700	0.2220	0.2280	0.1730
o-Xileno	0.0185	0.0135	0.0169	0.0203	0.0187	0.0203	0.0176	0.0199	0.0195	0.0149
m-Xileno	0.0352	0.0250	0.0329	0.0386	0.0304	0.0374	0.0314	0.0374	0.0439	0.0331
p-Xileno	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Etilbenceno	0.0214	0.0200	0.0223	0.0264	0.0217	0.0244	0.0198	0.0225	0.0153	0.0126

**Tabla A1.2: Concentración de gases en venteo (Parte 2).**

Nombre	U6 12:30 12/12 941 mbar Sin Fugas	U7 12:45 12/12 867 mbar Sin Fugas	U7 12:50 12/12 808 mbar Sin Fugas	U7 12:55 12/12 867 mbar Sin Fugas	U8 10:00 12/12 742 mbar Sin Fugas	U8 10:05 12/12 897 mbar Sin Fugas	U9 10:20 12/12 897 mbar Sin Fugas	U9 10:30 12/12 926 mbar Sin Fugas	U6 13:10 12/12 926 mbar Sin Fugas	U6 13:20 12/12 911 mbar Sin Fugas
Nitrógeno	25.7000	28.0000	29.0000	28.9000	21.9000	21.7000	22.0000	24.4000	14.9000	15.0000
Oxígeno	14.5000	15.9000	16.1000	15.7000	11.8000	11.8000	12.4000	13.6000	8.5300	8.4400
Monóxido de Carbono										
Óxido Nítrico	0.0551	0.0651	0.0629	0.0567	0.0302	0.0364	0.0405	0.0491	0.0096	0.0089
Dióxido de Carbono	49.0000	45.8000	46.8000	47.4000	57.1000	56.9000	56.7000	53.9000	60.3000	60.8000
Sulfuro de Hidrógeno	3.2300	2.3400	3.1700	3.1100	3.5500	3.6900	3.2300	2.7900	8.0800	8.7400
Sulfuro de Carbonilo	0.0073	0.0065	0.0046	0.0051	0.0046	0.0047	0.0055	0.0065	0.0101	0.0087
Disulfuro de Oxígeno	2.6200	3.1800	0.6450	0.5740	0.2320	0.3150	0.3690	0.4580	1.6900	1.4200
Sulfuro de Carbono	0.0135	0.0139	0.0054	0.0070	0.0042	0.0051	0.0039	0.0057	0.0050	0.0056
Metano	2.6100	2.7800	2.6800	2.6200	2.4600	2.3400	2.4900	2.5600	2.2600	2.2400
Etano	0.1100	0.1110	0.0938	0.0929	0.1590	0.1730	0.1940	0.1670	0.1420	0.1370
Propano	0.0300	0.0323	0.0274	0.0276	0.0419	0.0451	0.0584	0.0508	0.0317	0.0316
Isobutano	0.0148	0.0163	0.0143	0.0146	0.0216	0.0233	0.0335	0.0294	0.0149	0.0149
Butano	0.0252	0.0257	0.0220	0.0222	0.0294	0.0316	0.0457	0.0396	0.0236	0.0230
Isopentano	0.0087	0.0096	0.0089	0.0086	0.0111	0.0118	0.0196	0.0174	0.0066	0.0063
Pentano	0.0106	0.0098	0.0087	0.0089	0.0133	0.0137	0.0213	0.0184	0.0078	0.0074
Hexano										
Metilciclopentano										
Benceno	1.7500	1.4200	1.1800	1.2200	2.9900	2.4700	1.8600	1.5100	2.8600	2.7600
Ciclohexano										
Tolueno	0.1900	0.2170	0.1730	0.1820	0.3040	0.3420	0.3520	0.2600	0.3080	0.3060
o-Xileno	0.0203	0.0147	0.0160	0.0157	0.0241	0.0224	0.0327	0.0223	0.0219	0.0198
m-Xileno	0.0397	0.0401	0.0331	0.0326	0.0468	0.0474	0.0668	0.0442	0.0395	0.0397
p-Xileno	0.0000	0.0000								
Etilbenceno	0.0154	0.0206	0.0199	0.0192	0.0282	0.0282	0.0357	0.0367	0.0147	0.0243

**Tabla A1.3: Concentración de gases en venteo (Parte 3).**

Nombre	UG 13:30 12/12 750 mbar Con Aire	UG 13:35 12/12 691 mbar Sin Fugas	U5 13:08 05/13 999 mbar Sin Fugas	U5 13:12 05/13 992 mbar Sin Fugas	U5 13:16 05/13 997 mbar Sin Fugas	U5 13:20 05/13 997 mbar Sin Fugas	U5 13:25 05/13 992 mbar Sin Fugas	U6 15:02 05/13 970 mbar Sin Fugas	U6 15:05 05/13 963 mbar Sin Fugas	U6 15:09 05/13 956 mbar Sin Fugas
Nitrógeno	15.8000	26.1000	35.8000	35.8000	35.0000	38.4000	34.6000	20.6000	21.6000	23.8000
Oxígeno	8.4900	14.0000	24.3000	24.4000	23.7000	24.1000	23.2000	12.1000	12.3000	13.6000
<b>Monóxido de Carbono</b>										
Oxido Nítrico	0.0082	0.0393	0.1110	0.1140	0.1100	0.1170	0.1090	0.0248	0.0285	0.0408
Dióxido de Carbono	60.6000	48.7000	34.0000	35.7000	34.6000	33.3000	35.1000	52.6000	55.9000	50.2000
Sulfuro de Hidrógeno	8.2400	3.8600	2.8600	0.8530	2.9000	0.8570	3.2200	8.5300	4.0200	6.8600
Sulfuro de Carbonilo	0.0082	0.0063	0.0032	0.0060	0.0035	0.0043	0.0038	0.0050	0.0050	0.0048
Disulfuro de Oxígeno	1.5000	3.4100	0.1970	0.2330	0.1260	0.5010	0.1260	0.1820	0.1480	0.2700
Sulfuro de Carbono	0.0052	0.0100	0.0046	0.0081	0.0061	0.0098	0.0065	0.0069	0.0064	0.0077
Metano	2.3100	1.9100	2.2300	2.3900	2.2500	1.7700	2.2700	2.7800	2.7700	2.6800
Etano	0.1250	0.0719	0.0827	0.0930	0.0855	0.0632	0.0878	0.1510	0.1490	0.1170
Propano	0.0288	0.0180	0.0270	0.0308	0.0276	0.0209	0.0286	0.0393	0.0394	0.0311
Isobutano	0.0141	0.0093	0.0154	0.0180	0.0168	0.0124	0.0171	0.0205	0.0203	0.0164
Butano	0.0209	0.0138	0.0220	0.0251	0.0227	0.0170	0.0233	0.0336	0.0335	0.0262
Isopentano	0.0061	0.0041	0.0090	0.0103	0.0088	0.0081	0.0107	0.0115	0.0121	0.0095
Pentano	0.0068	0.0044	0.0092	0.0108	0.0095	0.0072	0.0098	0.0116	0.0118	0.0095
Hexano	0.0032	0.0021	0.0048	0.0056	0.0048	0.0038	0.0051	0.0067	0.0068	0.0052
Metilciclo pentano	0.0031	0.0017	0.0048	0.0053	0.0050	0.0037	0.0052	0.0059	0.0060	0.0049
Benceno	2.5400	1.5900	0.0414	0.0462	0.8650	0.6670	0.9220	2.4500	2.4900	1.9500
Ciclohexano	0.0021	0.0020	0.0033	0.0042	0.0039	0.0025	0.0044	0.0064	0.0062	0.0047
Tolueno	0.2750	0.1820	0.1880	0.1870	0.1700	0.1340	0.1800	0.3160	0.3250	0.2540
o-Xileno	0.0159	0.0135	0.0212	0.0187	0.0126	0.0106	0.0172	0.0204	0.0214	0.0157
m-Xileno	0.0333	0.0249	0.0351	0.0359	0.0312	0.0264	0.0356	0.0517	0.0540	0.0422
p-Xileno			0.0078							
Etilbenceno	0.0139	0.0121	0.0249	0.0240	0.0189	0.0151	0.0145	0.0240	0.0215	0.0223

**Tabla A1.4: Concentración de gases en venteo (Parte 4).**

Nombre	U6 15:22 05/13 956 mbar Sin Fugas	U6 15:26 05/13 963 mbar Sin Fugas	U6 15:30 05/13 956 mbar Sin Fugas	U8 13:05 05/13 Con Fugas	U8 13:10 05/13 992 mbar Sin Fugas	U8 13:13 05/13 978 mbar Sin Fugas	U8 13:18 05/13 985 mbar Sin Fugas	U8 13:21 05/13 999 mbar Sin Fugas	U8 13:24 05/13 992 mbar Sin Fugas	U9 14:03 05/13 808 mbar Sin Fugas
Nitrógeno	20.3000	20.5000	20.4000		19.3000	19.4000	19.2000	19.5000	19.3000	36.7000
Oxígeno	11.8000	11.4000	11.5000		13.5000	13.2000	13.0000	13.4000	13.0000	23.9000
<b>Monóxido de Carbono</b>										
Oxido Nítrico	0.0254	0.0255	0.0247		0.0302	0.0303	0.0286	0.0310	0.0289	0.0814
Dióxido de Carbono	53.4000	54.4000	54.2000		51.6000	52.1000	52.4000	51.7000	52.4000	35.2000
Sulfuro de Hidrógeno	8.5200	7.9800	8.1900		7.8600	7.5700	7.8400	7.7300	7.7300	1.1600
Sulfuro de Carbonilo	0.0052	0.0044	0.0046		0.0053	0.0057	0.0060	0.0056	0.0057	0.0047
Disulfuro de Oxígeno	0.1550	0.1380	0.1340		0.1660	0.2520	0.1270	0.2030	0.2260	0.1760
Sulfuro de Carbono	0.0069	0.0072	0.0072		0.0027	0.0048	0.0052	0.0050	0.0058	0.0103
Metano	2.7400	2.5800	2.6000		3.4900	3.4600	3.3900	3.2800	3.2200	1.9700
Etano	0.1500	0.1410	0.1420		0.2380	0.2370	0.2360	0.2290	0.2250	0.0629
Propano	0.0392	0.0375	0.0379		0.0640	0.0636	0.0635	0.0635	0.0626	0.0181
Isobutano	0.0203	0.0194	0.0199		0.0357	0.0353	0.0359	0.0352	0.0357	0.0107
Butano	0.0329	0.0316	0.0321		0.0489	0.0480	0.0483	0.0484	0.0480	0.0141
Isopentano	0.0113	0.0109	0.0112		0.0192	0.0189	0.0193	0.0188	0.0190	0.0072
Pentano	0.0116	0.0109	0.0114		0.0214	0.0213	0.0214	0.0215	0.0209	0.0056
Hexano	0.0063	0.0061	0.0062		0.0123	0.0122	0.0121	0.0126	0.0118	0.0033
Metilciclo pentano	0.0063	0.0058	0.0060		0.0078	0.0079	0.0078	0.0078	0.0077	0.0025
Benceno	2.3900	2.3000	2.3300		3.0300	2.9600	2.9600	3.0300	3.0100	0.6130
Ciclohexano	0.0058	0.0056	0.0057		0.0071	0.0060	0.0067	0.0065	0.0063	0.0023
Tolueno	0.3040	0.3020	0.2960		0.4730	0.4590	0.4630	0.4800	0.4840	0.0855
o-Xileno	0.0198	0.0192	0.0186		0.0333	0.0305	0.0330	0.0305	0.0295	
m-Xileno	0.0490	0.0500	0.0479		0.0766	0.0746	0.0763	0.0781	0.0767	0.0153
p-Xileno										
Etilbenceno	0.0258	0.0255	0.0181		0.0429	0.0419	0.0418	0.0452	0.0467	

**Tabla A1.5: Concentración de gases en venteos (Parte 5).**

Nombre	U9 14:08 05/13 956 mbar Sin Fugas	U9 14:13 05/13 978 mbar Sin Fugas	U9 14:22 05/13 360 mbar No lleno	U9 14:26 05/13 968 mbar Sin Fugas	U9 14:30 05/13 923 mbar Sin Fugas	UG 16:51 05/13 999 mbar Sin Fugas	UG 17:00 05/13 999 mbar Sin Fugas	UG 17:03 05/13 987 mbar Sin Fugas	UG 17:06 05/13 965 mbar Sin fugas	UG 17:09 05/13 985 mbar Sin Fugas
Nitrógeno	20.8000	25.2000	43.8000	17.8000	25.8000	15.5000	15.3000	15.3000	15.4000	15.5000
Oxígeno	13.7000	13.5000	19.1000	11.5000	22.6000	9.6000	9.3100	9.1100	8.9700	8.6700
Monóxido de Carbono										
Óxido Nítrico	0.0328	0.0476	0.0115	0.0248	0.0843	0.0107	0.1070	0.1060	0.0999	0.0948
Dióxido de Carbono	52.3000	51.9000	36.6000	58.7000	45.6000	59.5000	59.9000	60.3000	60.6000	61.8000
Sulfuro de Hidrógeno	6.3400	4.2900	0.0017	5.9000	2.1900	9.0100	9.0700	9.0400	8.8700	8.3900
Sulfuro de Carbonilo	0.0057	0.0042	0.0018	0.0044	0.0044	0.0054	0.0056	0.0054	0.0055	0.0060
Disulfuro de Oxígeno	0.2390	0.1720	0.0001	0.0928	0.2740	0.0028	0.0173	0.0179	0.0215	0.0358
Sulfuro de Carbono	0.0071	0.0044	0.0068	0.0054	0.0097	0.0031	0.0034	0.0047	0.0051	0.0041
Metano	3.3400	2.6900	0.2440	2.7600	2.3700	2.6100	2.5300	2.4800	2.4400	2.3400
Etano	0.2350	0.1460	0.0104	0.2030	0.0738	0.1650	0.1630	0.1600	0.1570	0.1420
Propano	0.0637	0.0414	0.0037	0.0574	0.0204	0.0386	0.0380	0.0375	0.0368	0.0334
Isobutano	0.0359	0.0233	0.0024	0.0324	0.0114	0.0186	0.0186	0.0184	0.0176	0.0167
Butano	0.0485	0.0318	0.0035	0.0442	0.0158	0.0283	0.0285	0.0280	0.0274	0.0250
Isopentano	0.0186	0.0132	0.0020	0.0171	0.0081	0.0092	0.0091	0.0091	0.0085	0.0082
Pentano	0.0191	0.0129	0.0020	0.0181	0.0064	0.0105	0.0103	0.0103	0.0101	0.0096
Hexano	0.0097	0.0065	0.0006	0.0092	0.0038	0.0056	0.0059	0.0055	0.0056	0.0052
Metilciclo pentano	0.0086	0.0057		0.0076	0.0026	0.0048	0.0047	0.0046	0.0044	0.0042
Benceno	2.3500	1.6100	0.1870	2.2900	0.7530	3.4000	3.0400	3.0100	2.9700	2.7000
Ciclohexano	0.0070	0.0043		0.0067	0.0038	0.0035	0.0040	0.0038	0.0037	0.0031
Tolueno	0.3500	0.2550	0.0374	0.3600	0.1110	0.3530	0.3520	0.3540	0.3460	0.3070
o-Xileno	0.0236	0.0175		0.0243	0.0081	0.0157	0.0192	0.0192	0.0146	0.0146
m-Xileno	0.0501	0.0394		0.0547	0.0181	0.0451	0.0453	0.0447	0.0422	0.0373
p-Xileno										
Etilbenceno	0.0311	0.0213		0.0268	0.0064	0.0269	0.0265	0.0295	0.0285	0.0249

## ANEXO 2: CROMATOGRAMAS

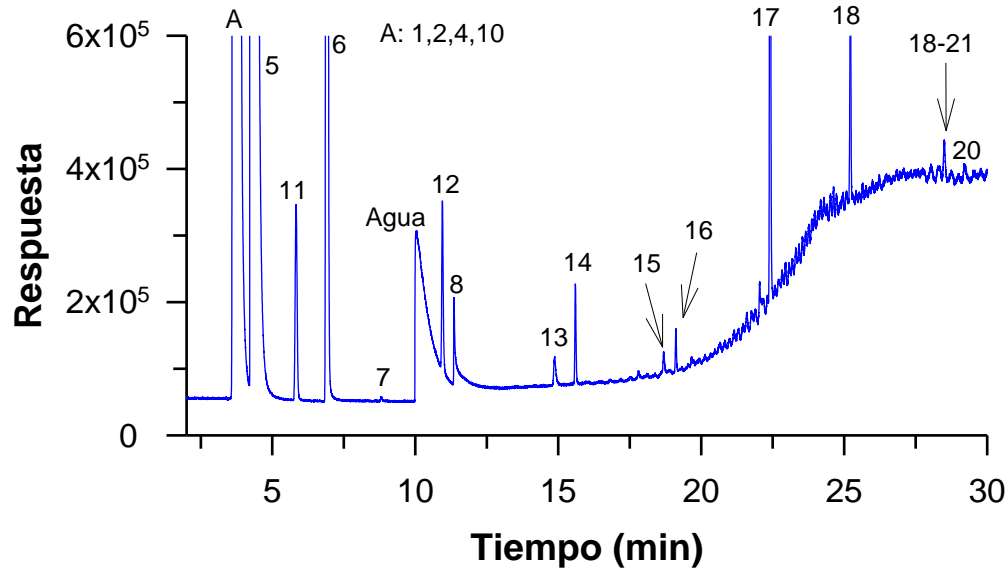


Figura A2.1. Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 14:50 Diciembre 2012.

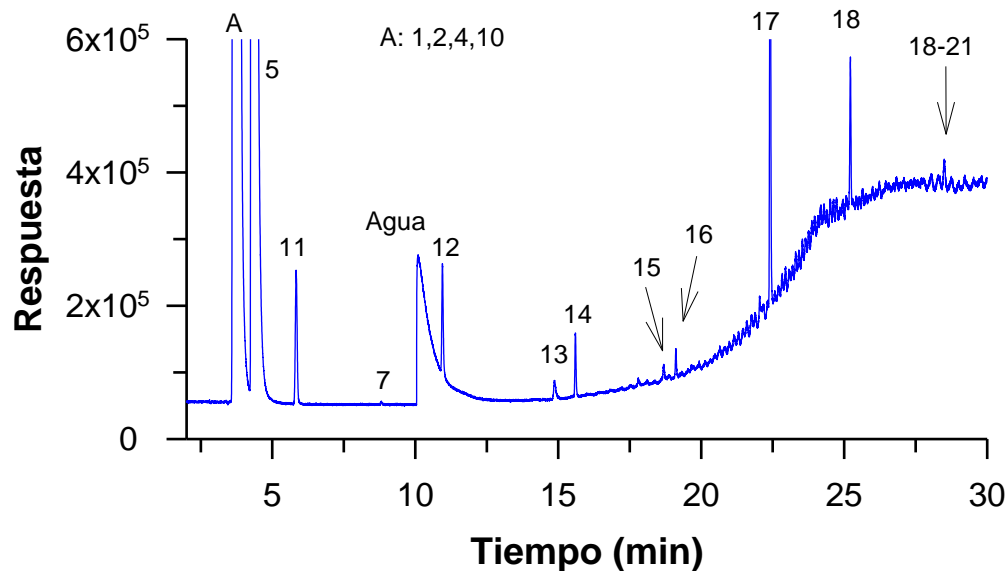
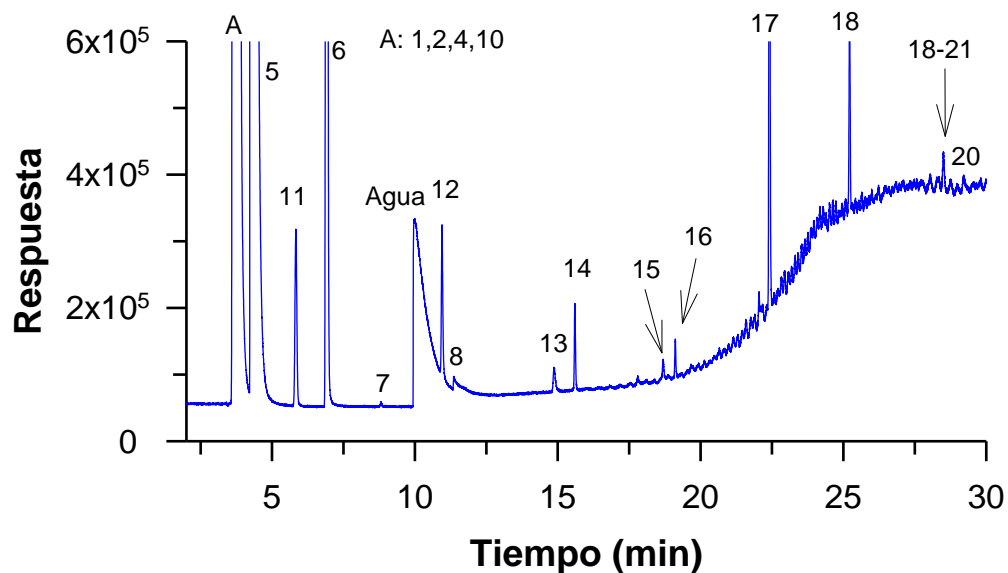


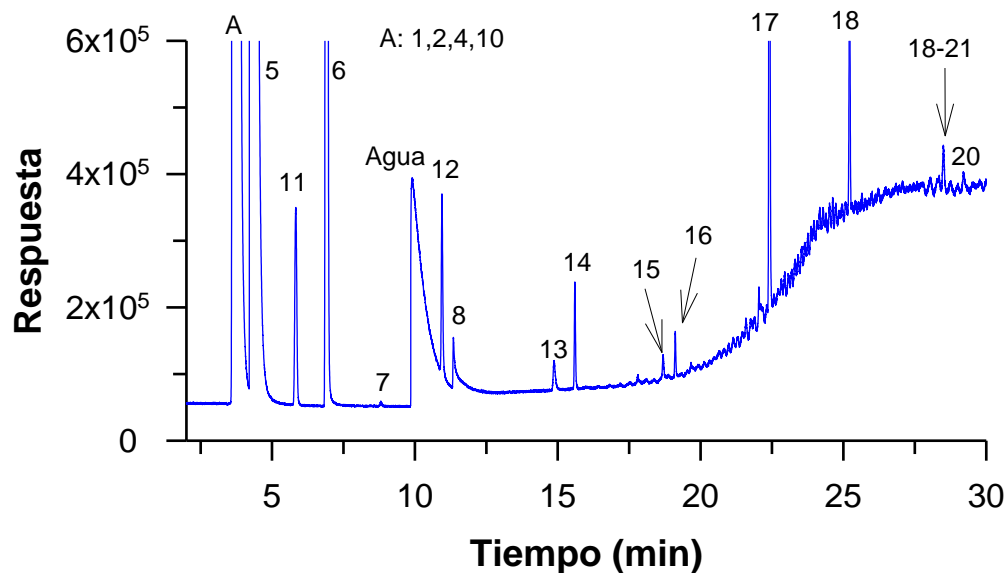
Figura A2.2. Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 14:55 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.



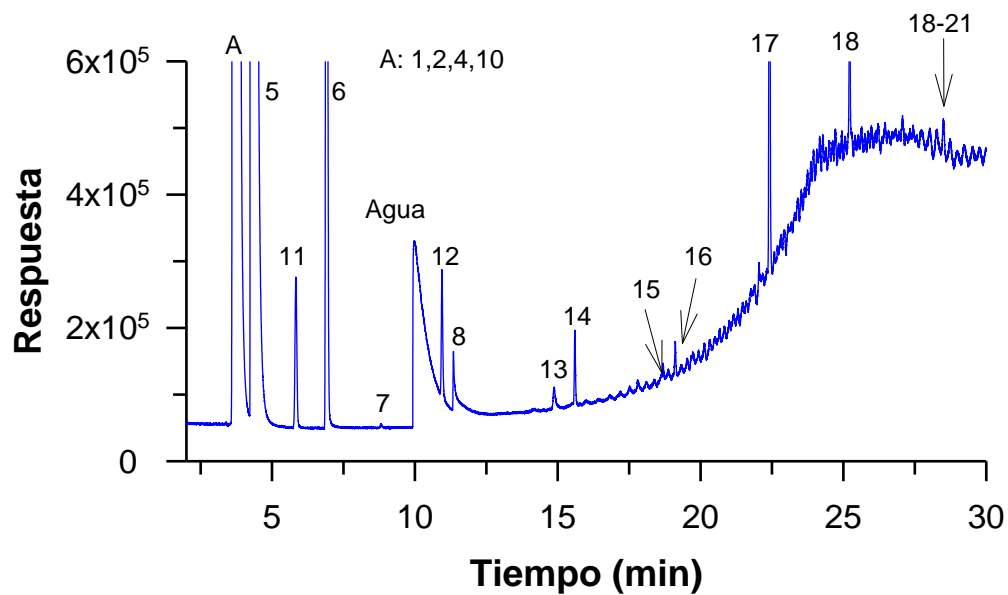


**Figura A2.3.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 15:00 Diciembre 2012.

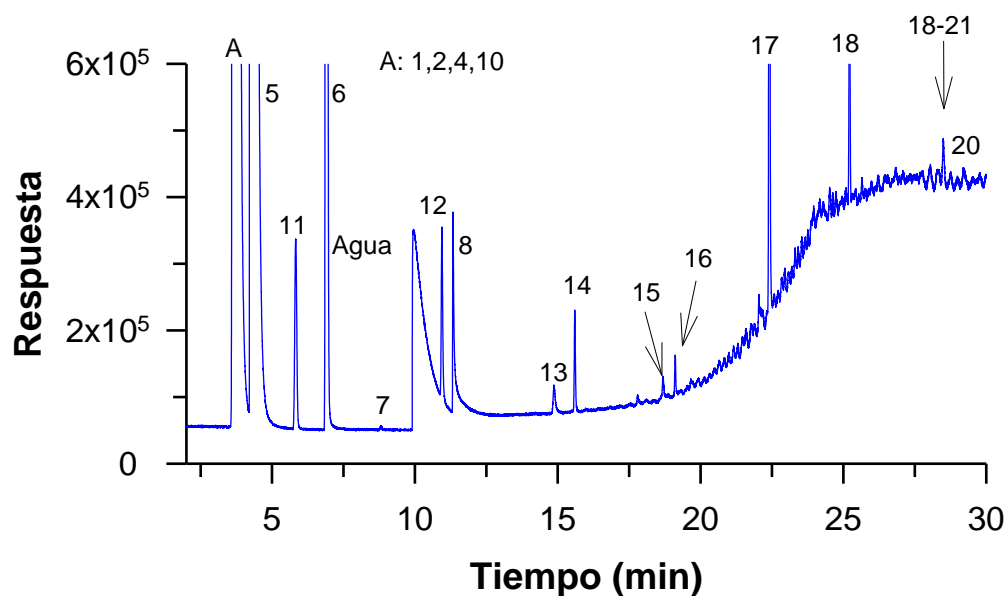


**Figura A2.4.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 15:05 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

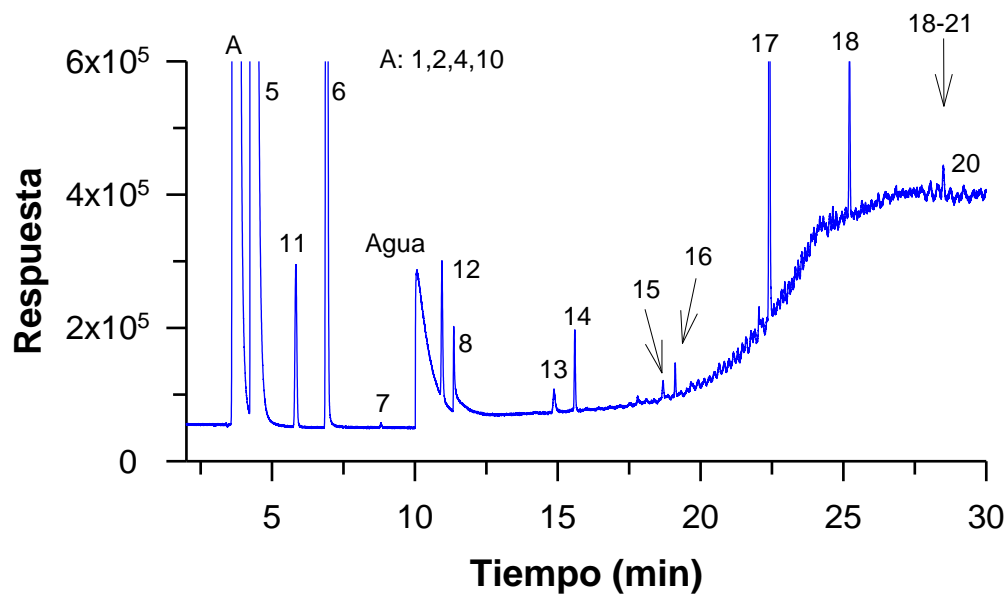


**Figura A2.5.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 15:10 Diciembre 2012.

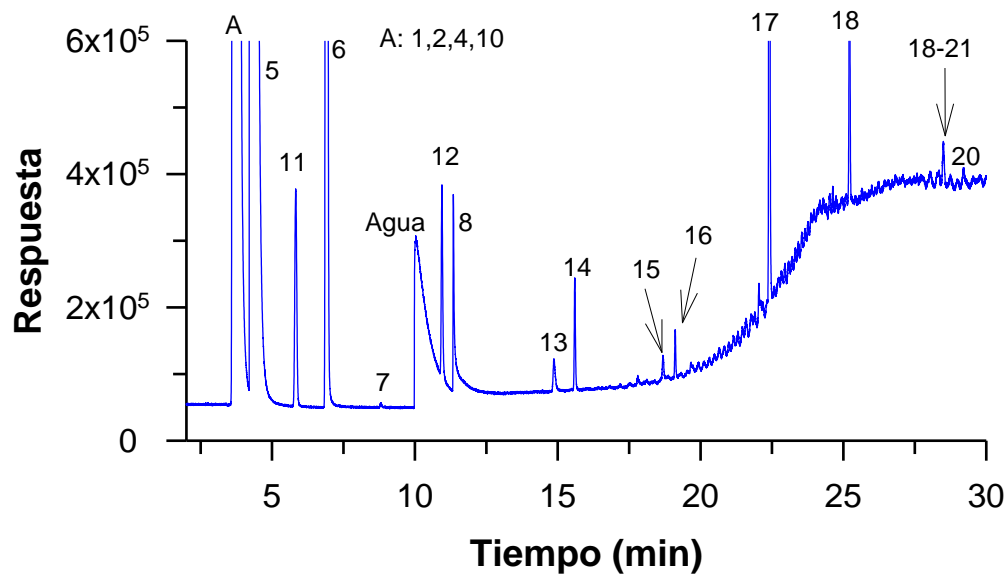


**Figura A2.6.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 15:15 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

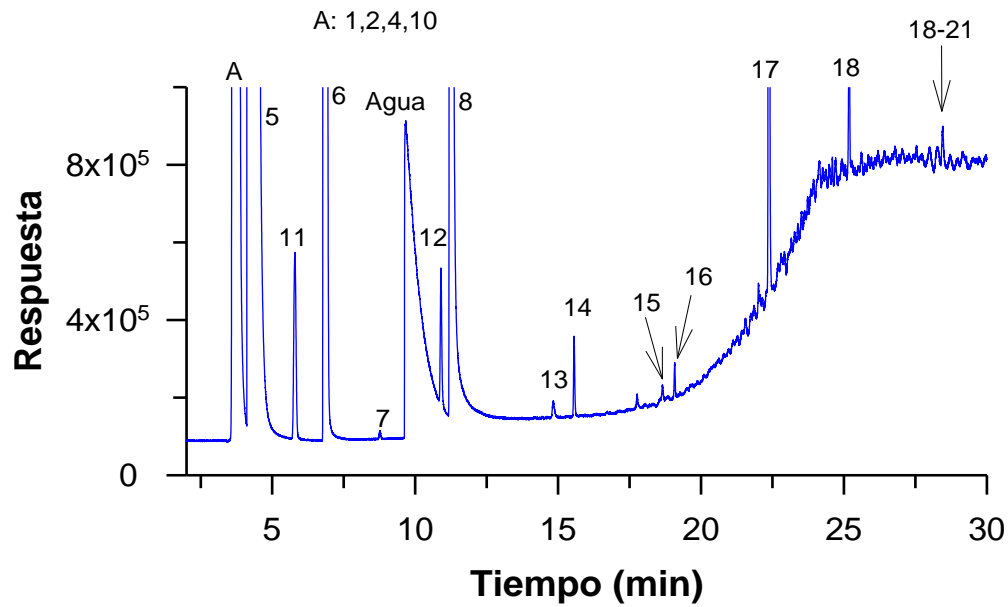


**Figura A2.7.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 15:20 Diciembre 2012.

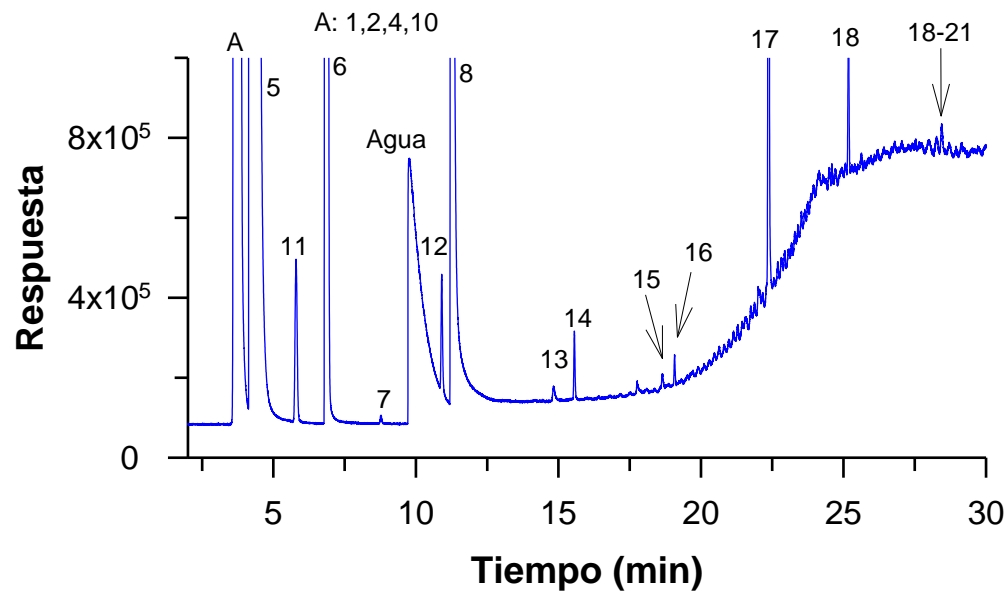


**Figura A2.8.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 15:25 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

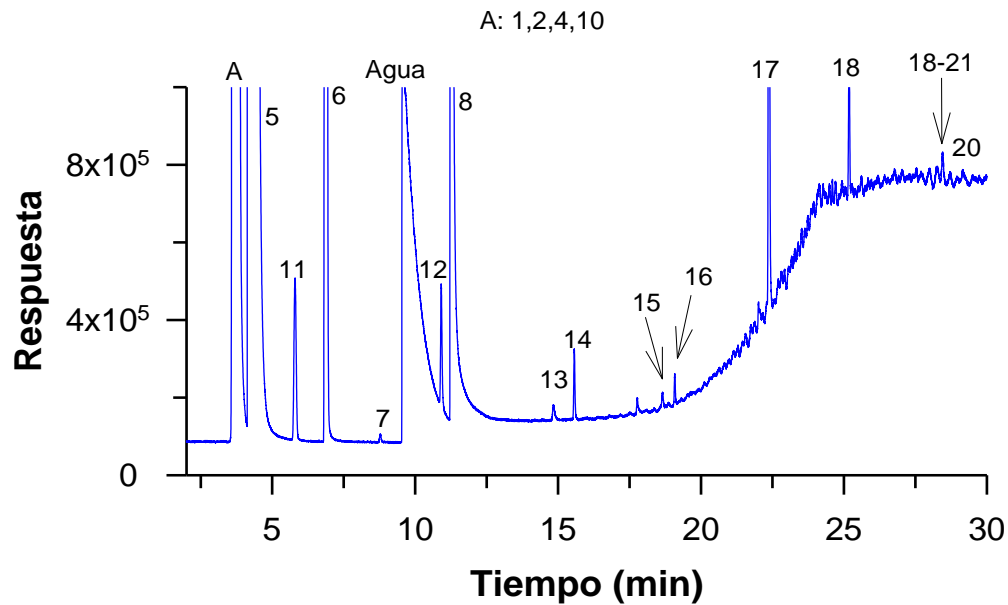


**Figura A2.9.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6A CP2 12:00 Diciembre 2012.

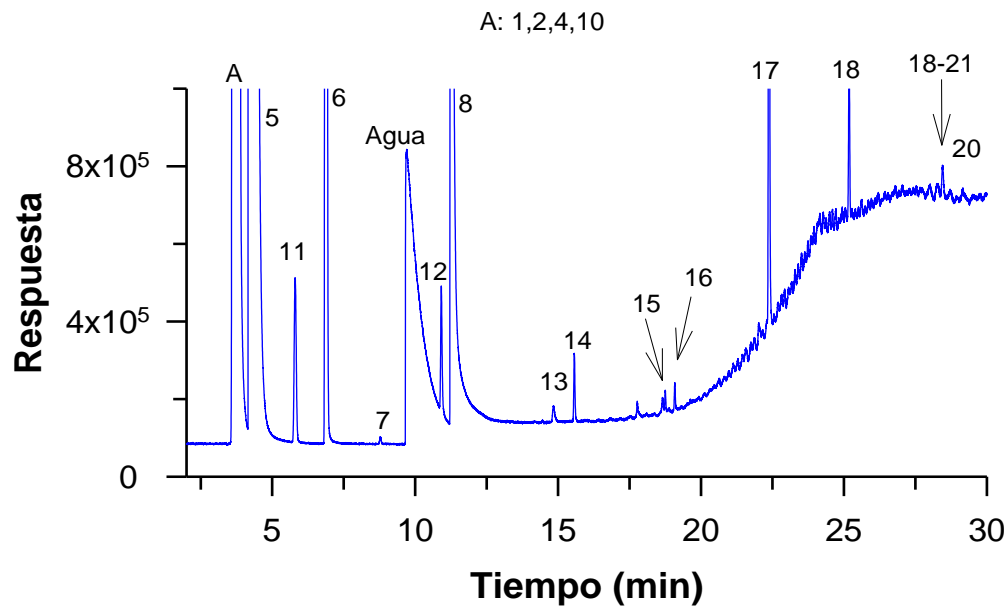


**Figura A2.10.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6B CP2 12:20 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

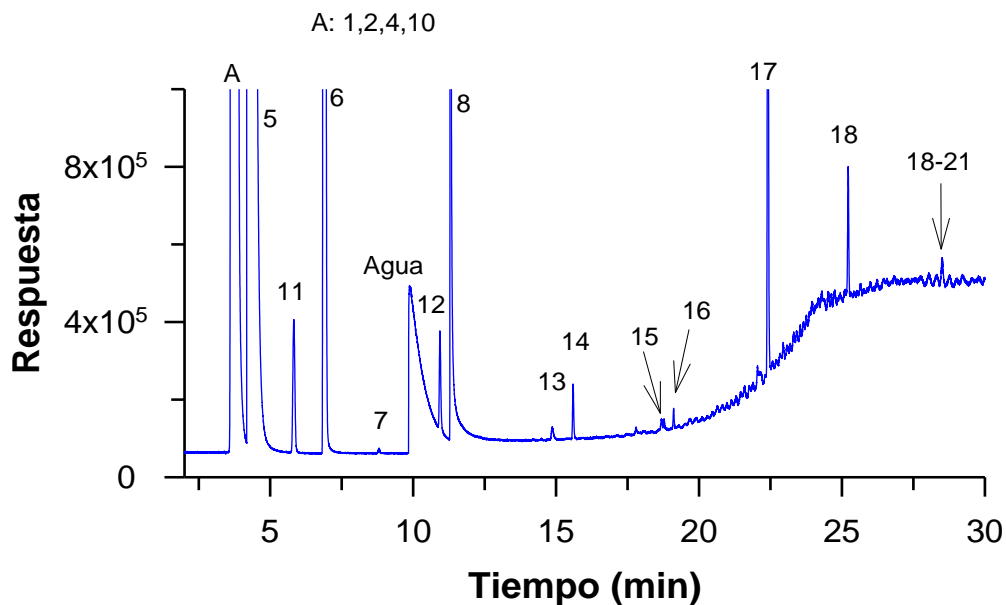


**Figura A2.11.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6B CP2 12:30 Diciembre 2012.

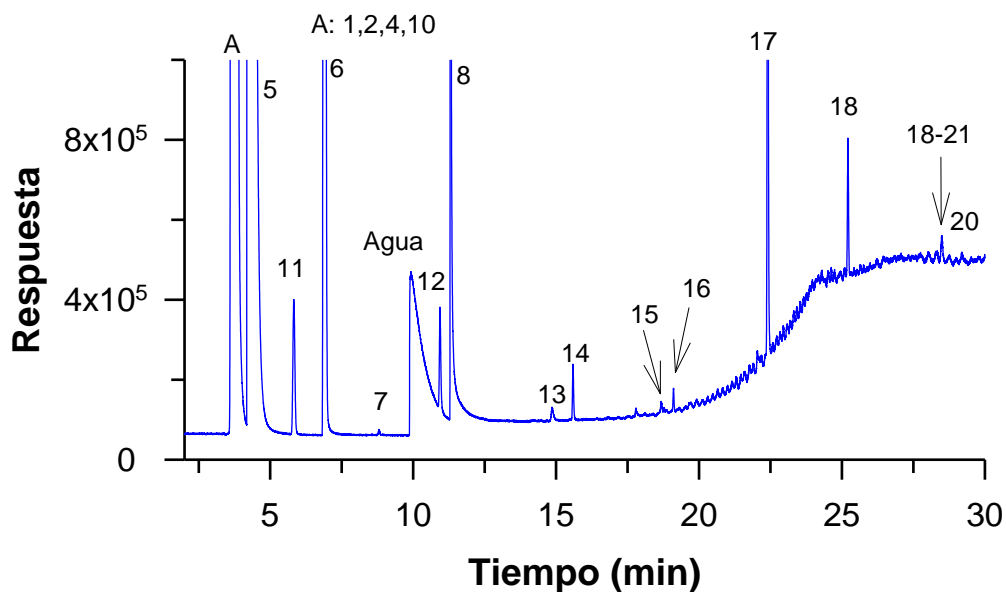


**Figura A2.12.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 7B CP2 12:45 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

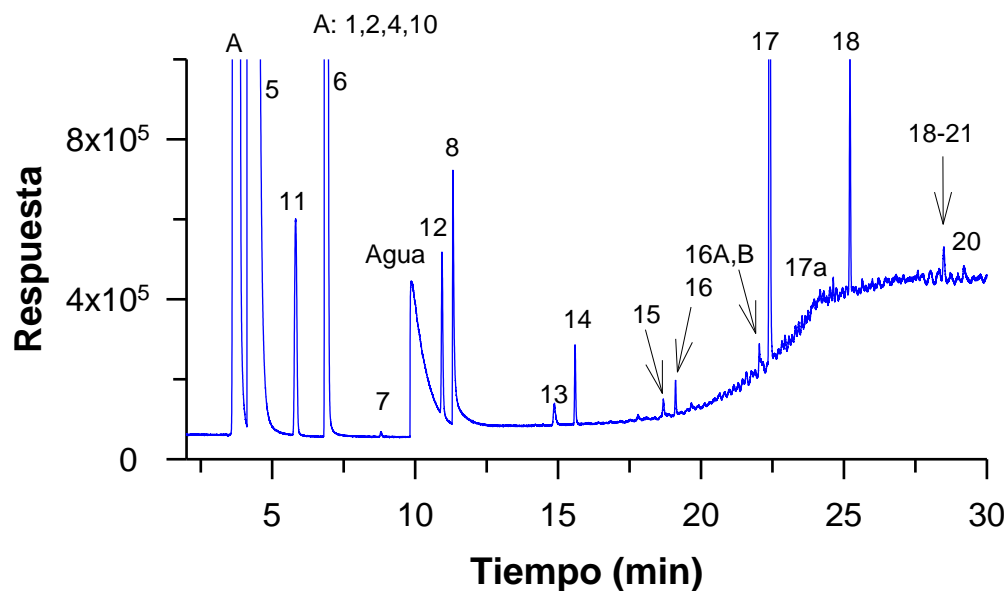


**Figura A2.13.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 7B CP2 12:50 Diciembre 2012.

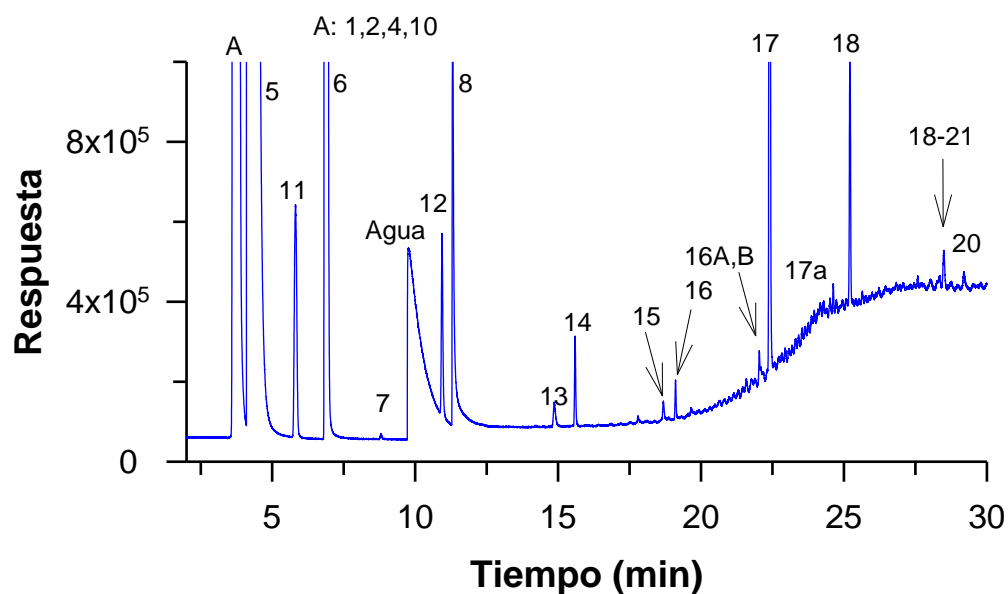


**Figura A2.14.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 7A CP2 12:55 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

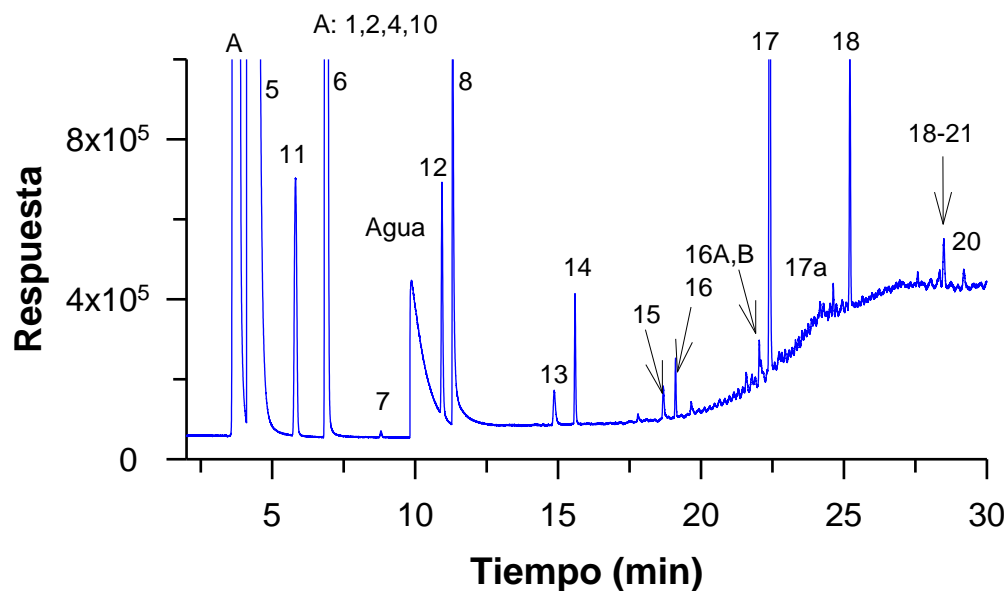


**Figura A2.15.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8A CP3 10:00 Diciembre 2012.

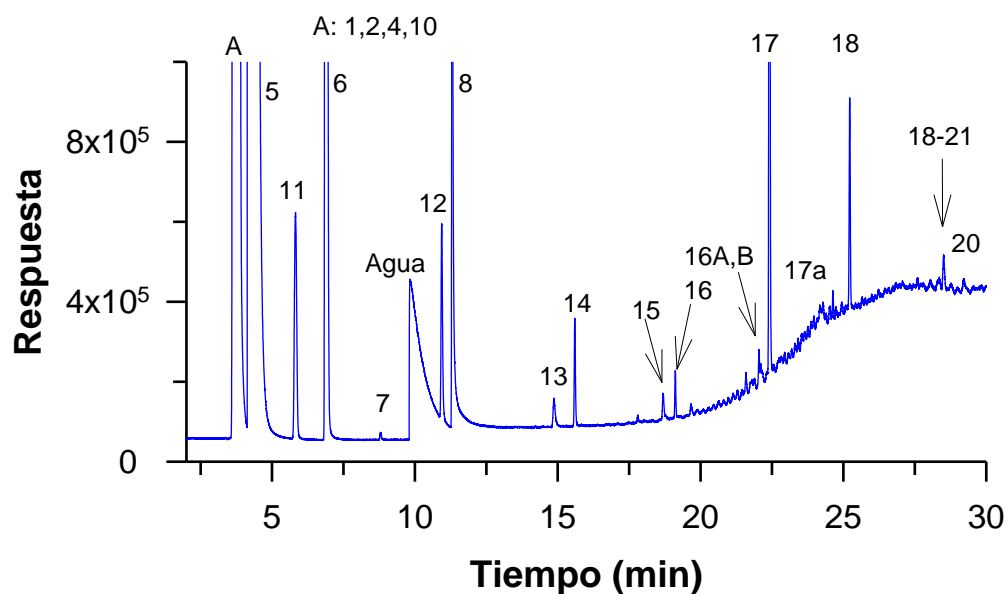


**Figura A2.16.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8B CP3 10:05 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.



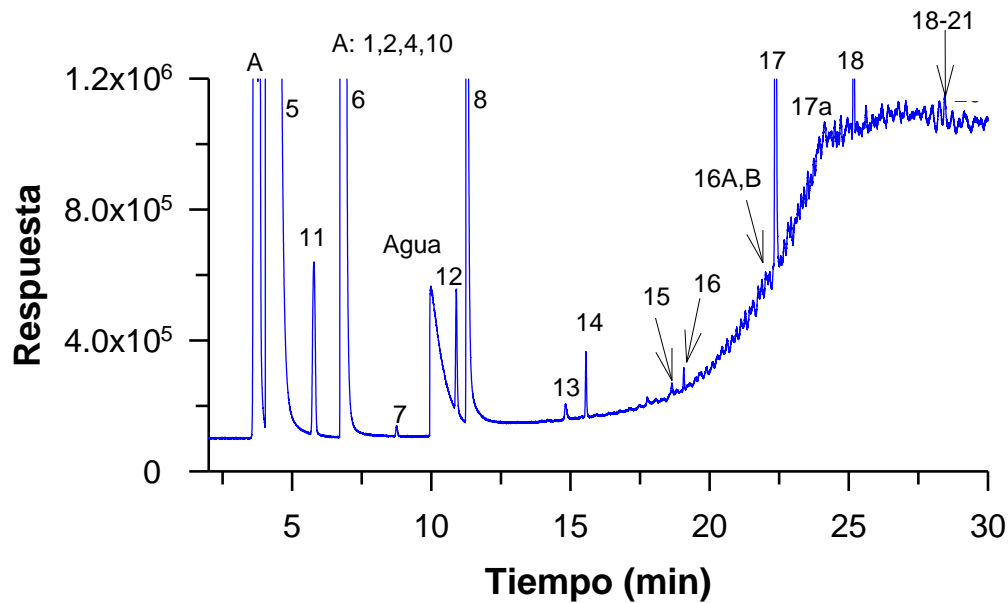
**Figura A2.17.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9A CP3 10:20 Diciembre 2012.



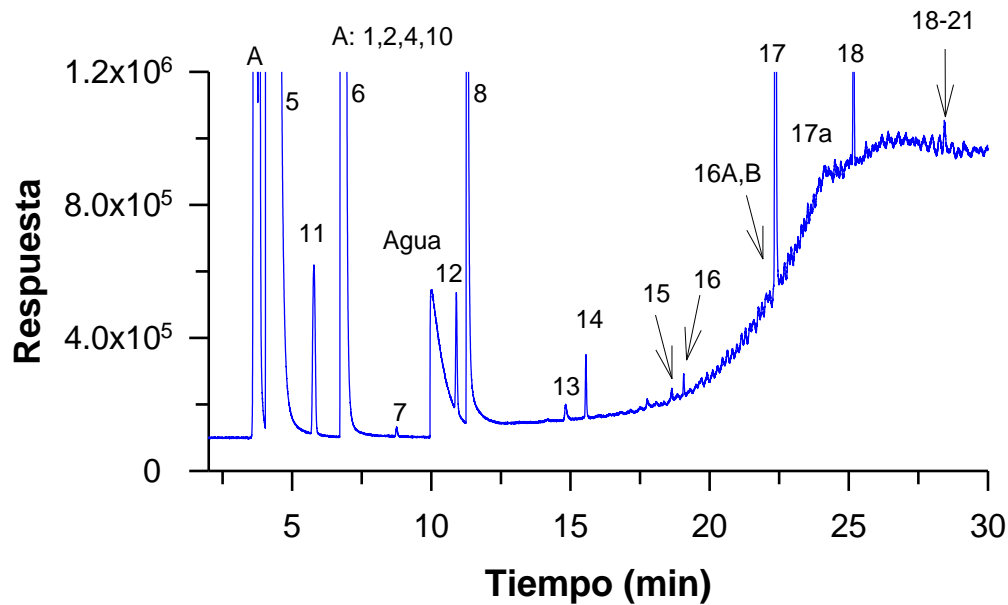
**Figura A2.18.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9B CP3 10:30 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.



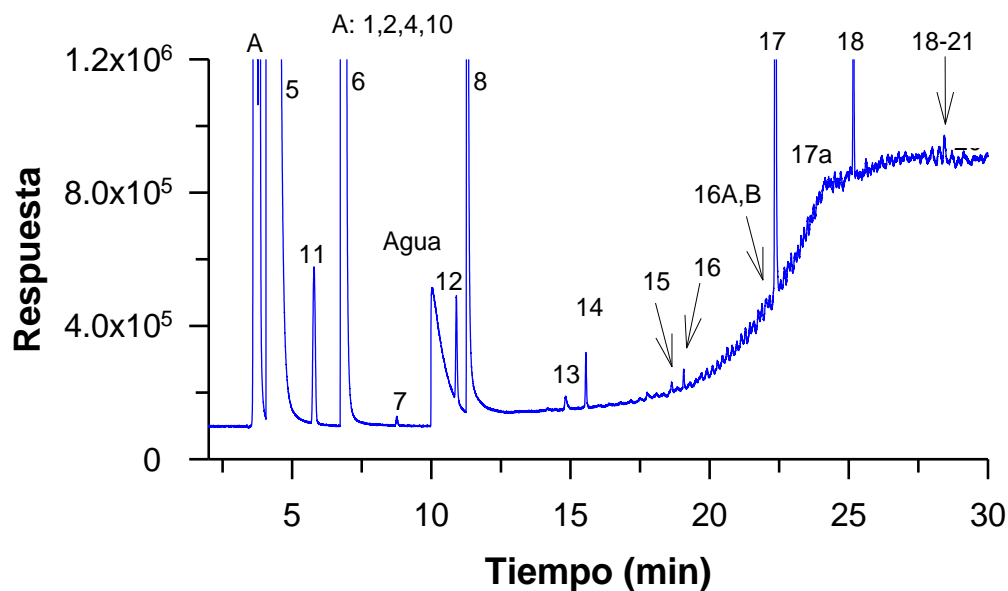


**Figura A2.19.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 13:10 Diciembre 2012.

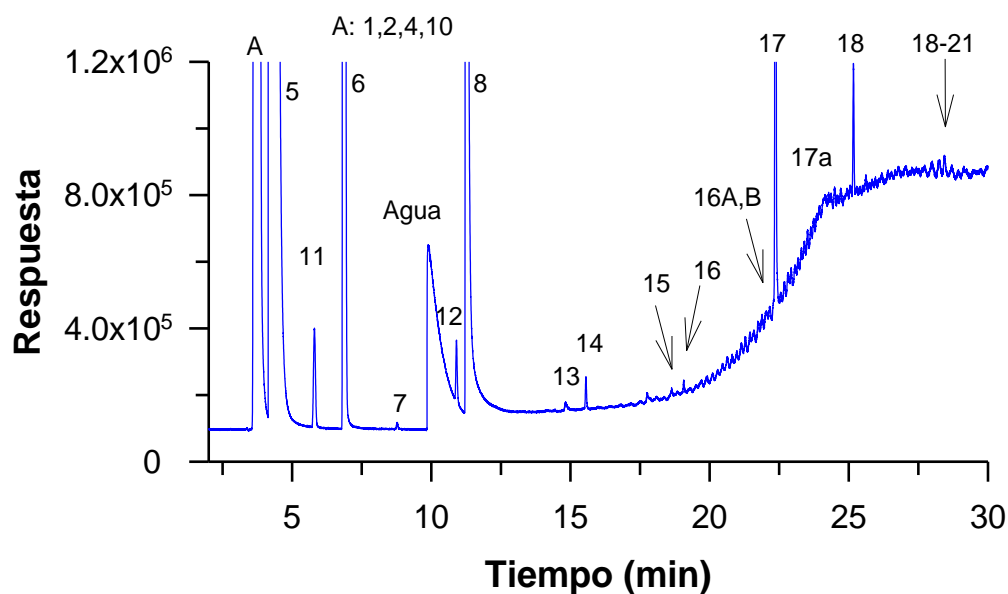


**Figura A2.20.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 13:20 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

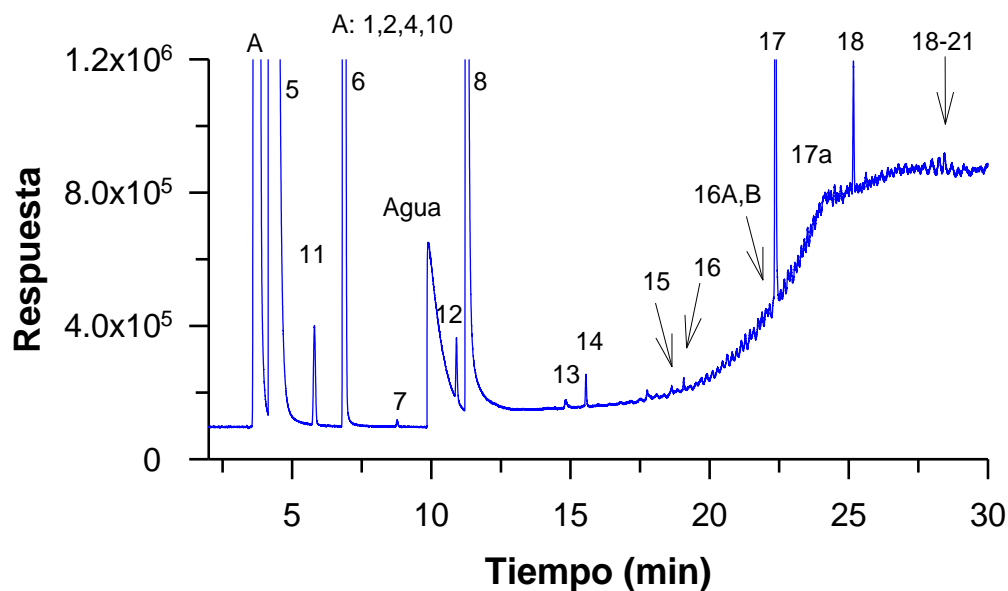


**Figura A2.21.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 13:30 Diciembre 2012.

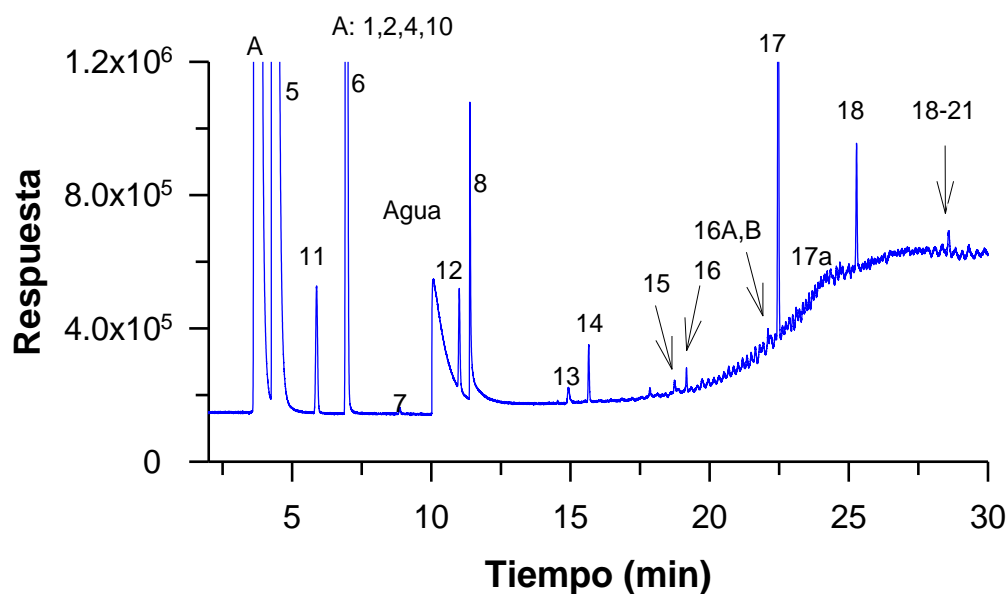


**Figura A2.22.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 13:35 Diciembre 2012.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

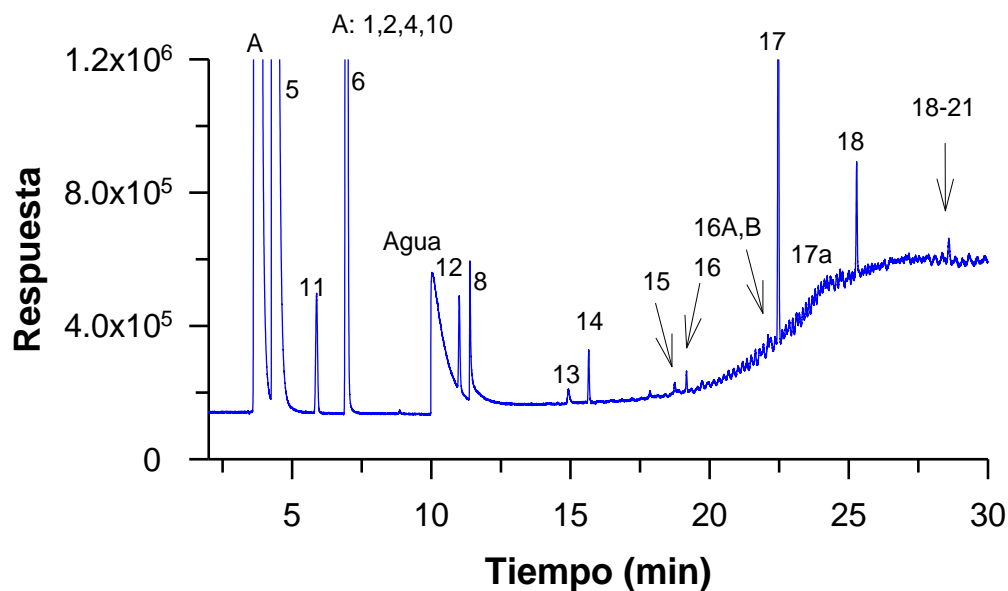


**Figura A2.23.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 13:08 Mayo 2013.

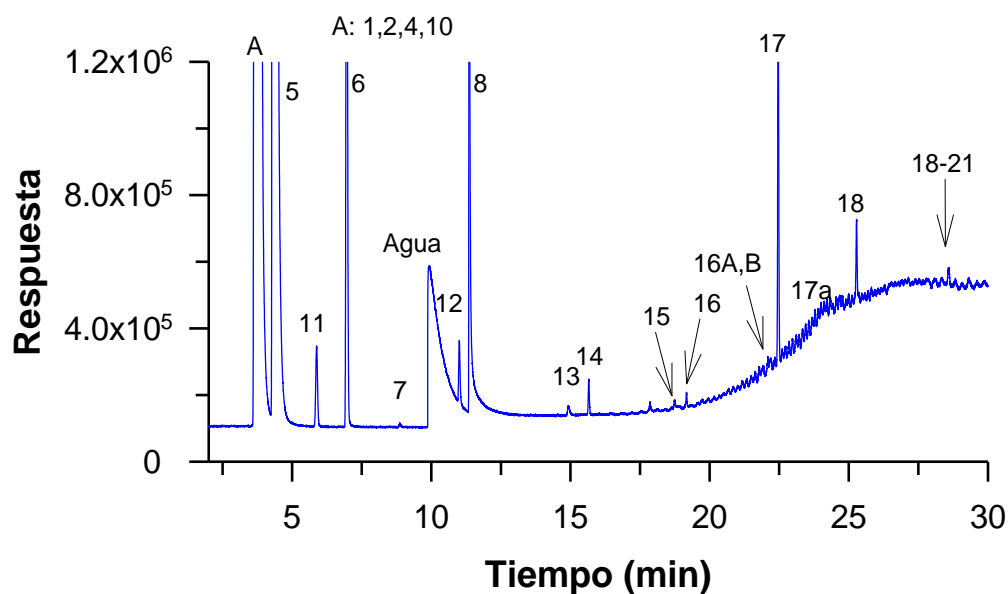


**Figura A2.24.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 13:12 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

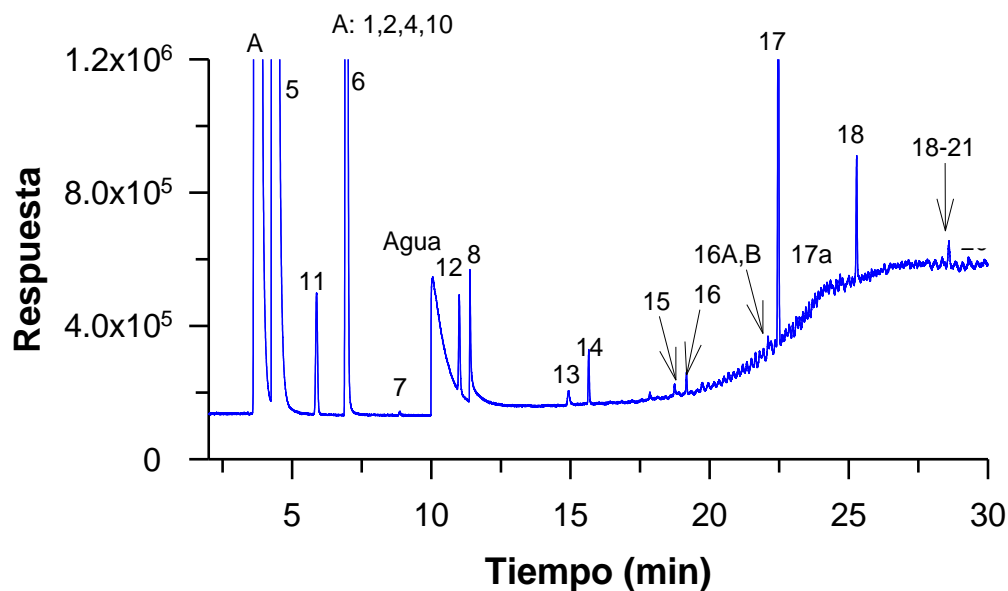


**Figura A2.25.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 13:16 Mayo 2013.

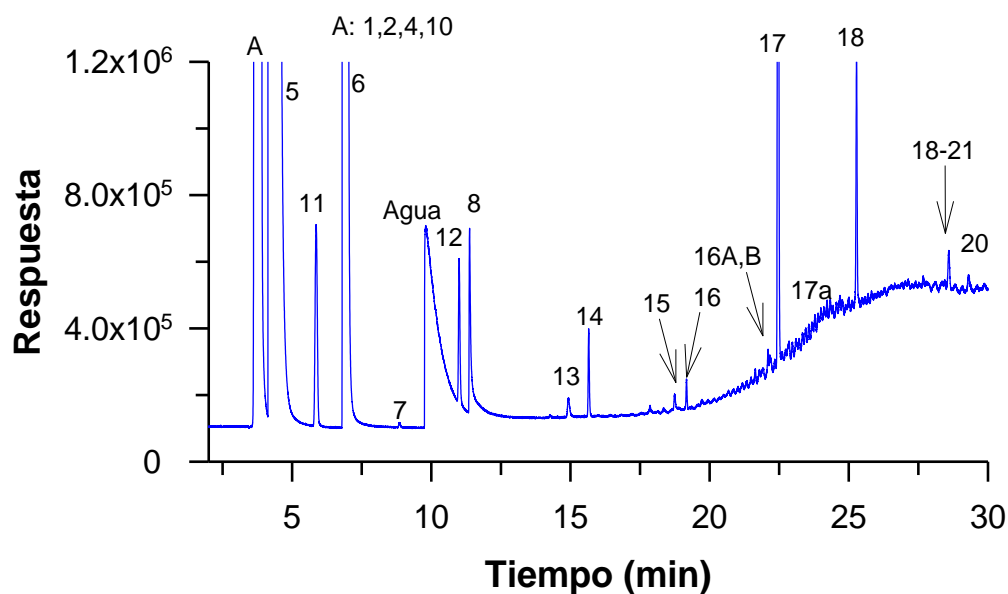


**Figura A2.26.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 13:20 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

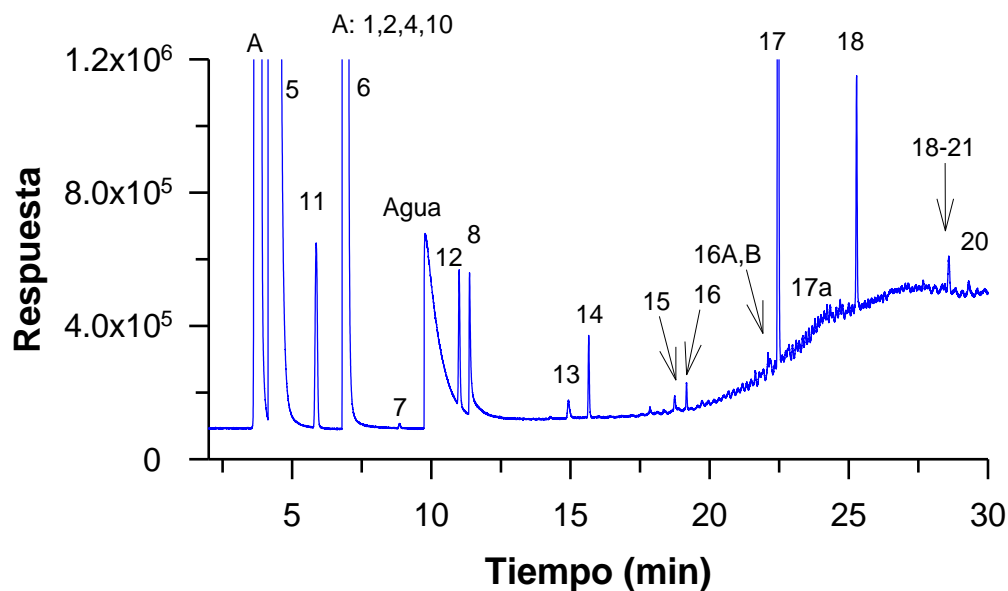


**Figura A2.27.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 5 CP1 13:25 Mayo 2013.

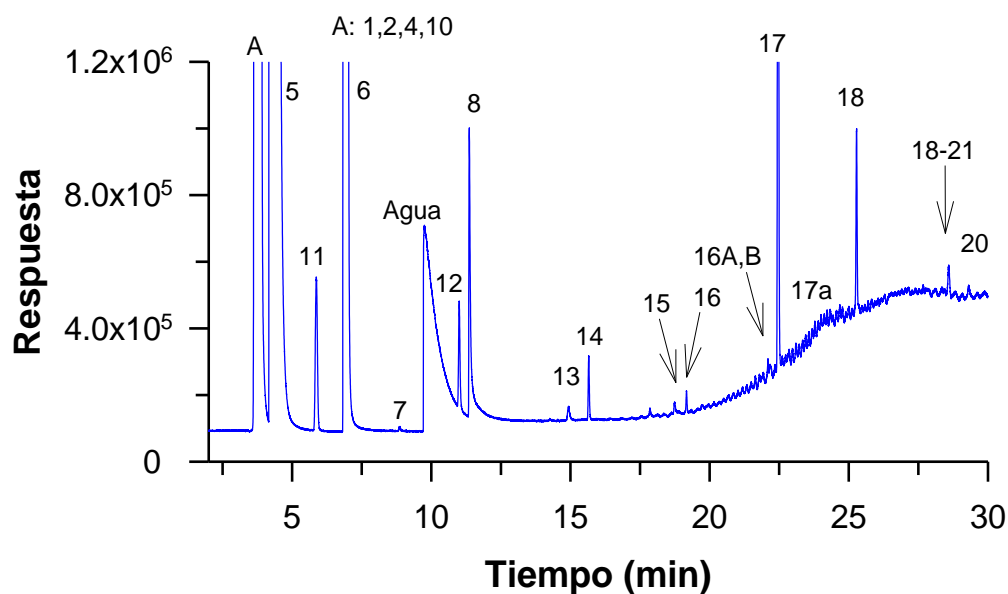


**Figura A2.28.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6A CP2 15:02 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

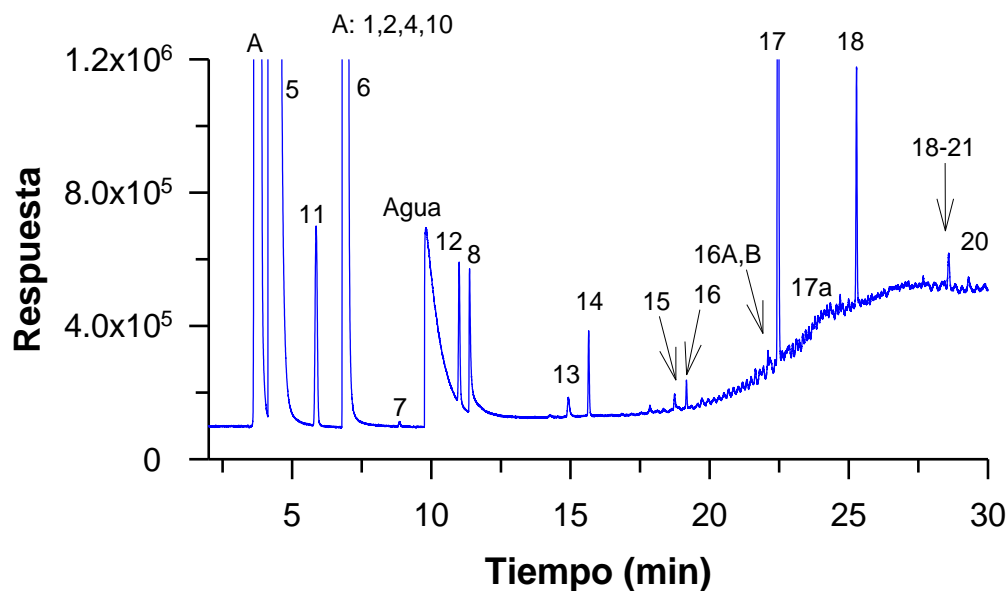


**Figura A2.29.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6A CP2 15:05 Mayo 2013.

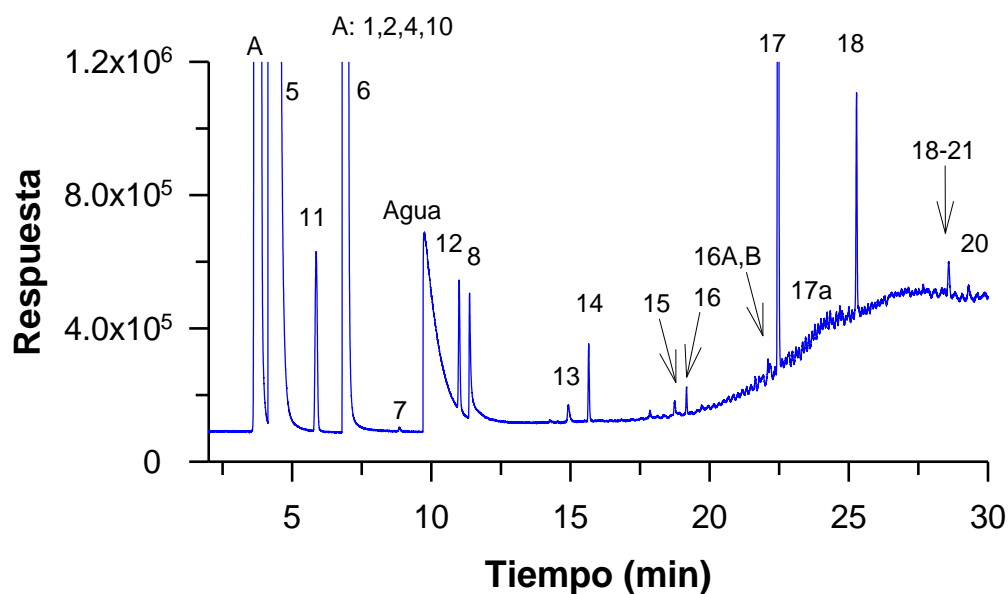


**Figura A2.30.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6A CP2 15:09 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

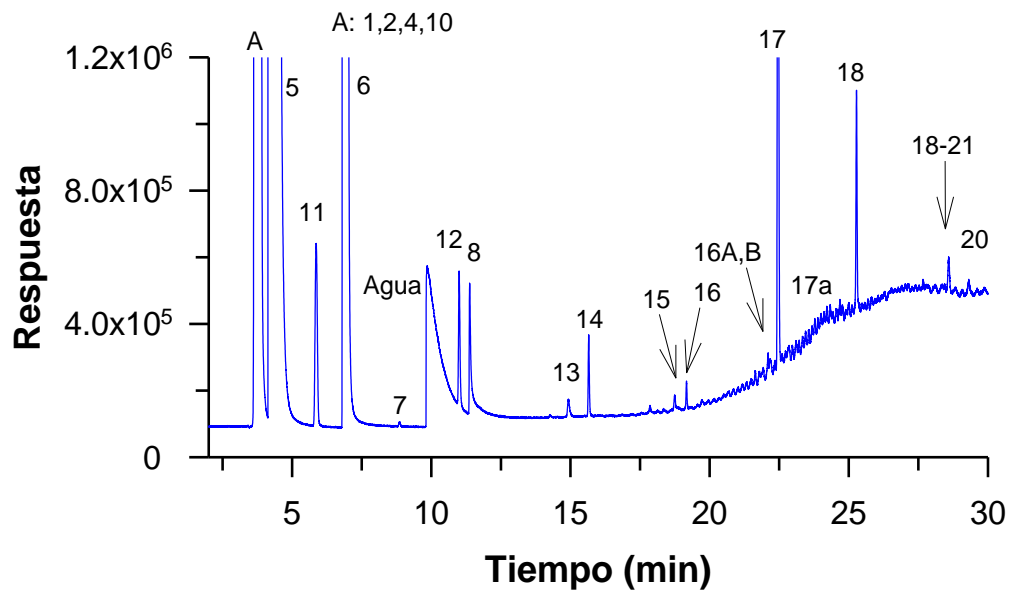


**Figura A2.31.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6B CP2 15:22 Mayo 2013.

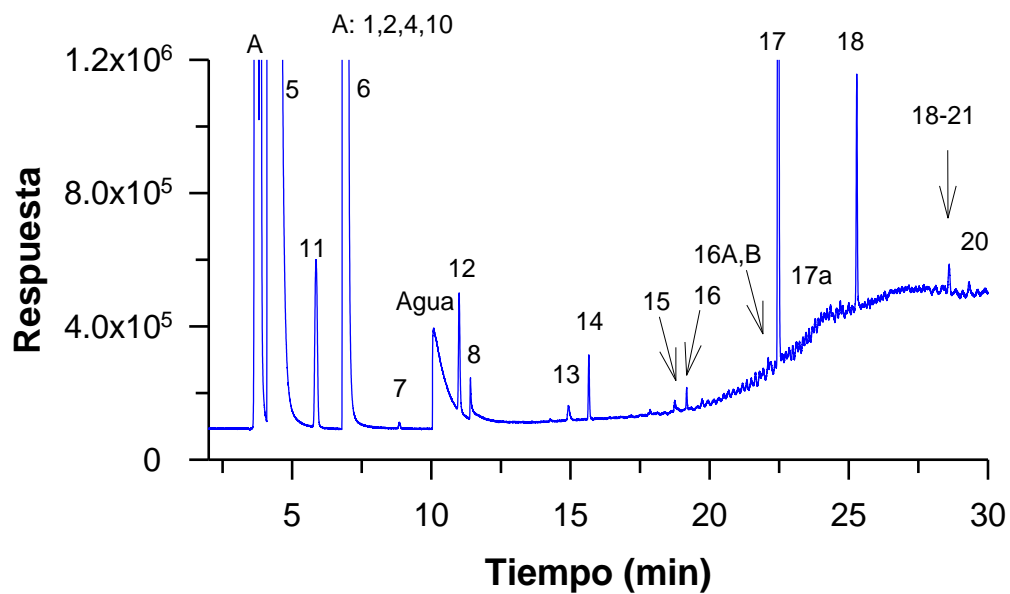


**Figura A2.32.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6B CP2 15:26 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.



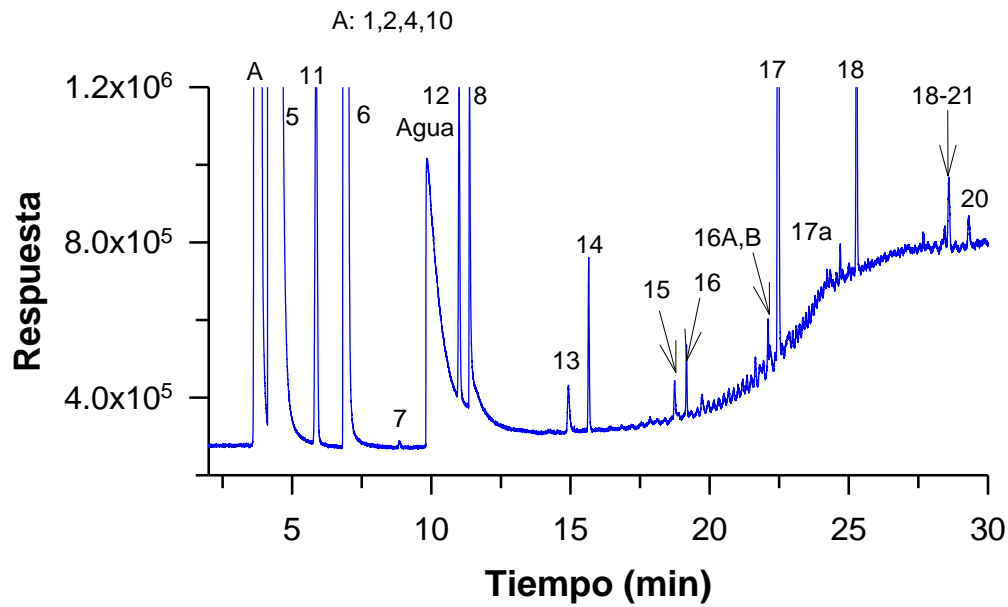
**Figura A2.33.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 6B CP2 15:30 Mayo 2013.



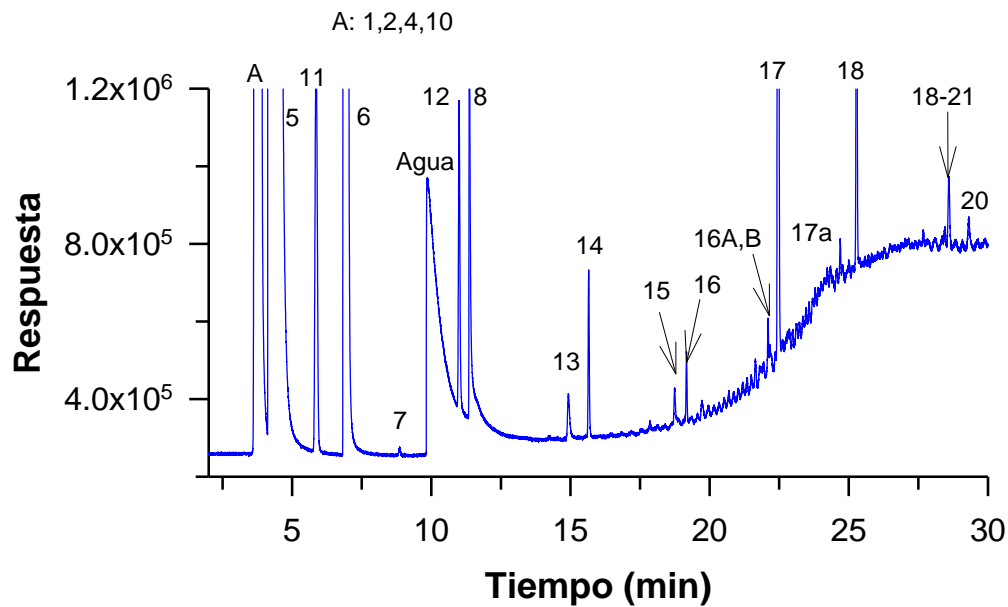
**Figura A2.34.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 17:09 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.



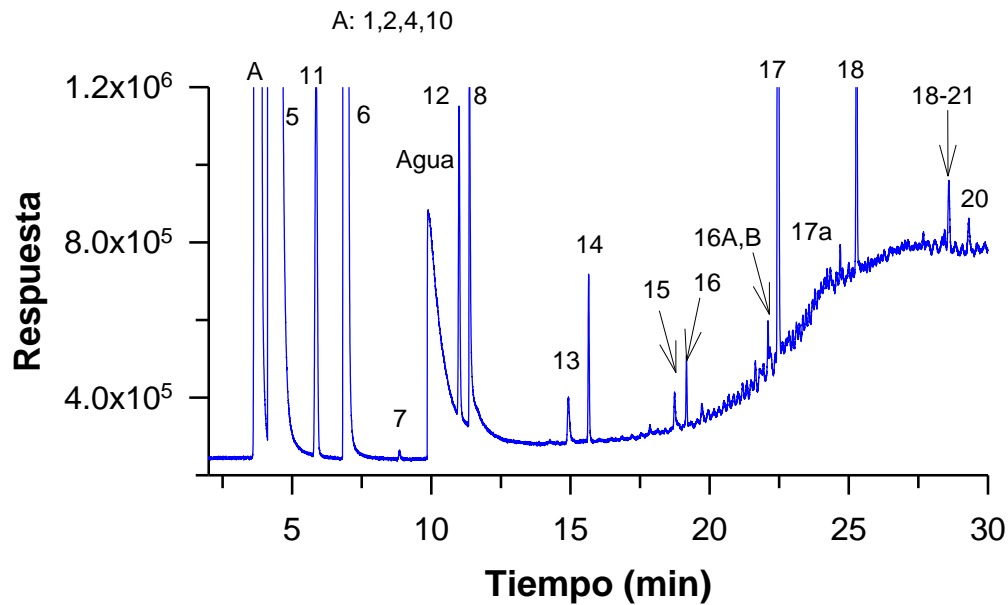


**Figura A2.35.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8B CP3 13:10 Mayo 2013.

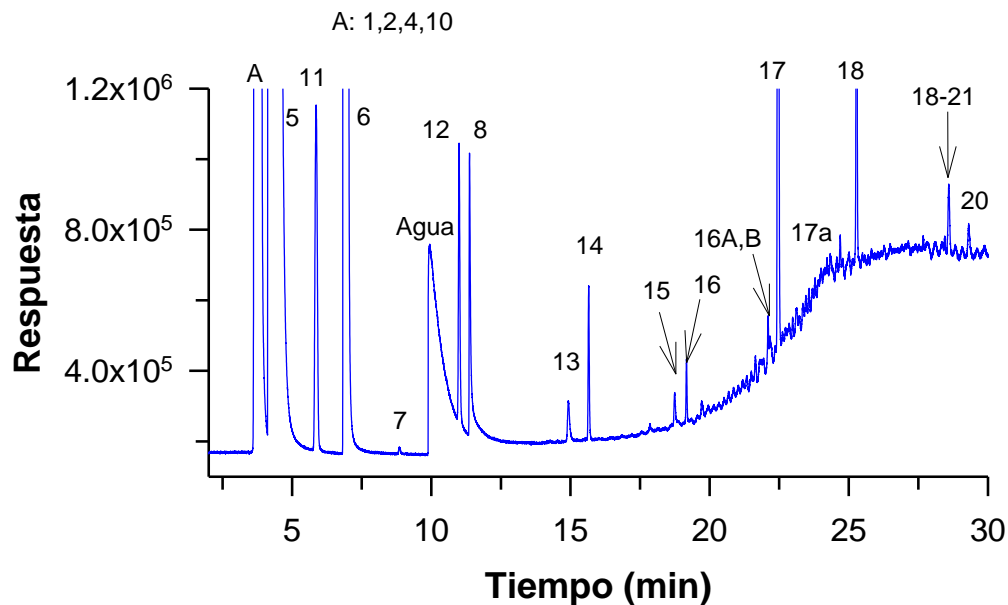


**Figura A2.36.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8B CP3 13:13 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

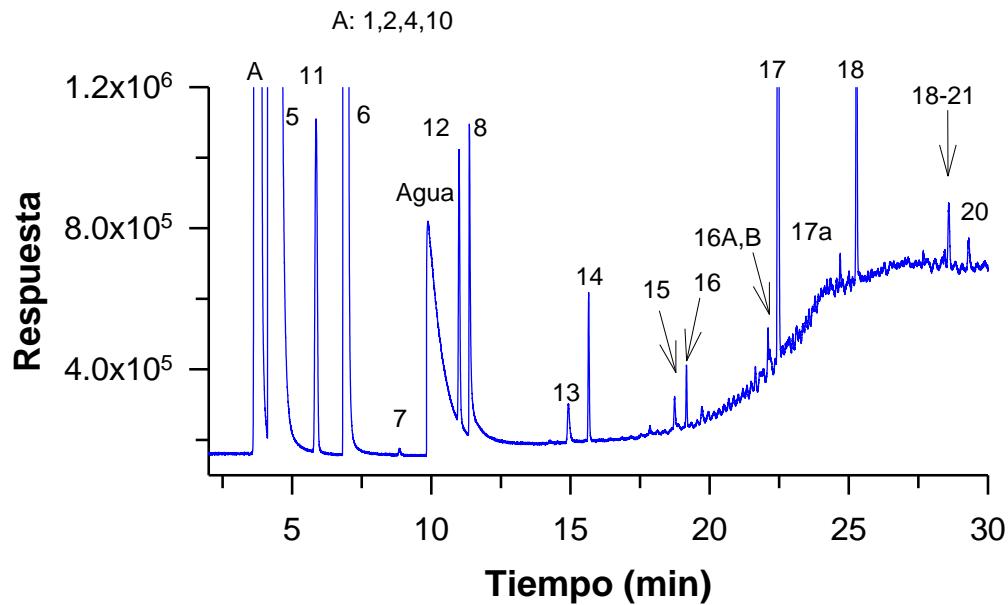


**Figura A2.37.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8A CP3 13:18 Mayo 2013.

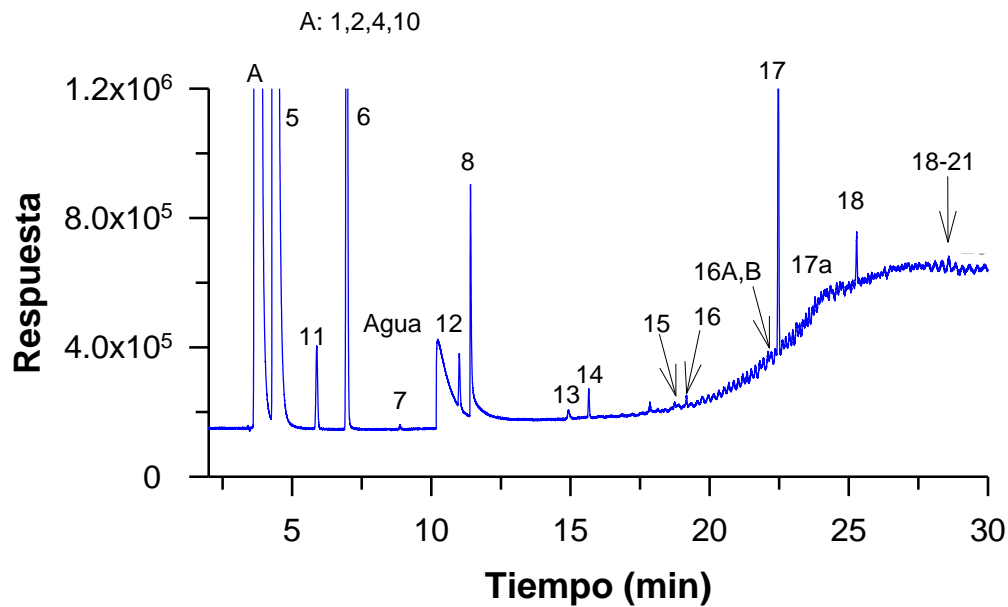


**Figura A2.38.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8A CP3 13:21 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

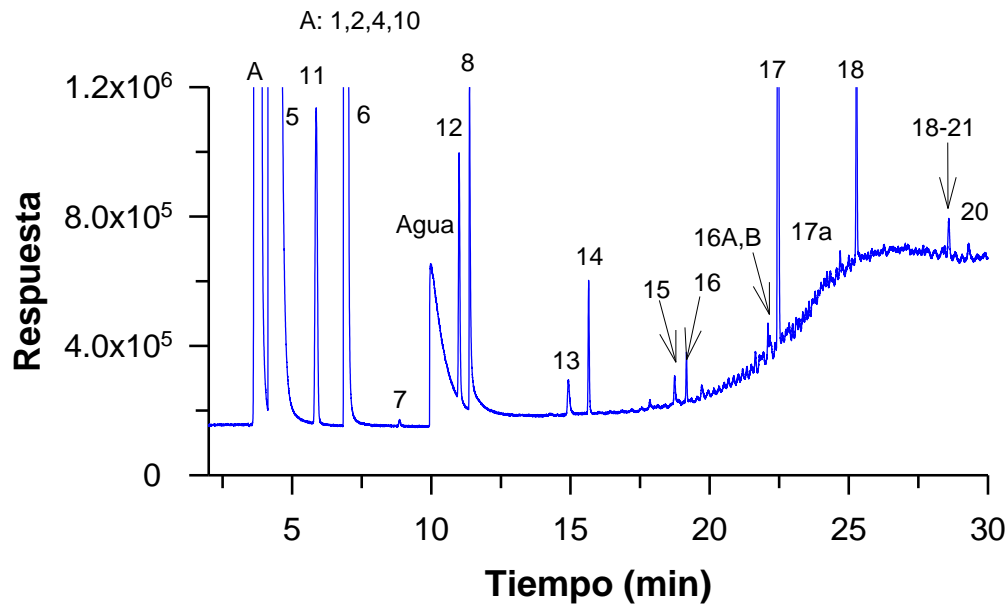


**Figura A2.39.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 8A CP3 13:24 Mayo 2013.

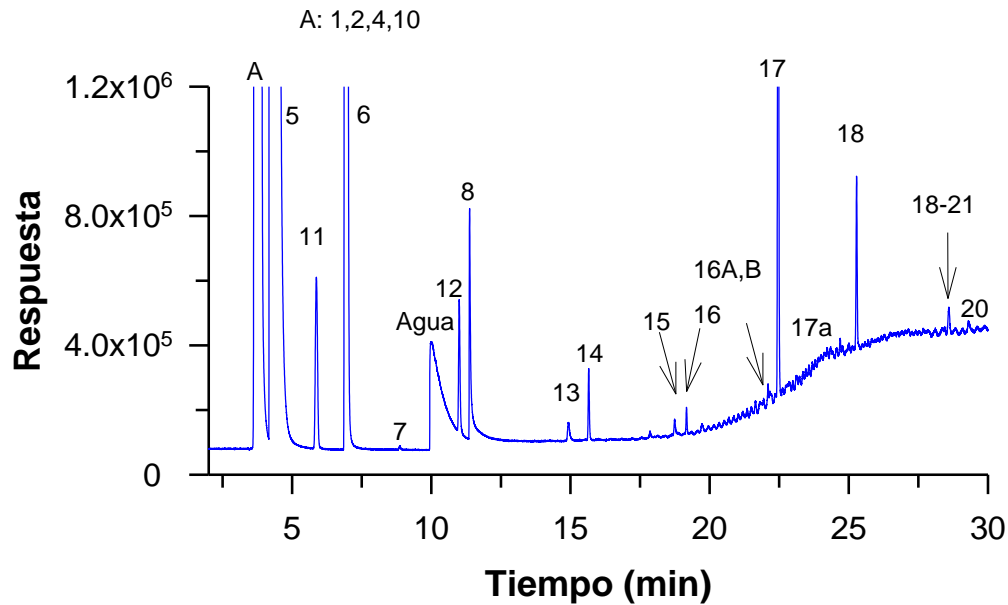


**Figura A2.40.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9B CP3 14:03 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

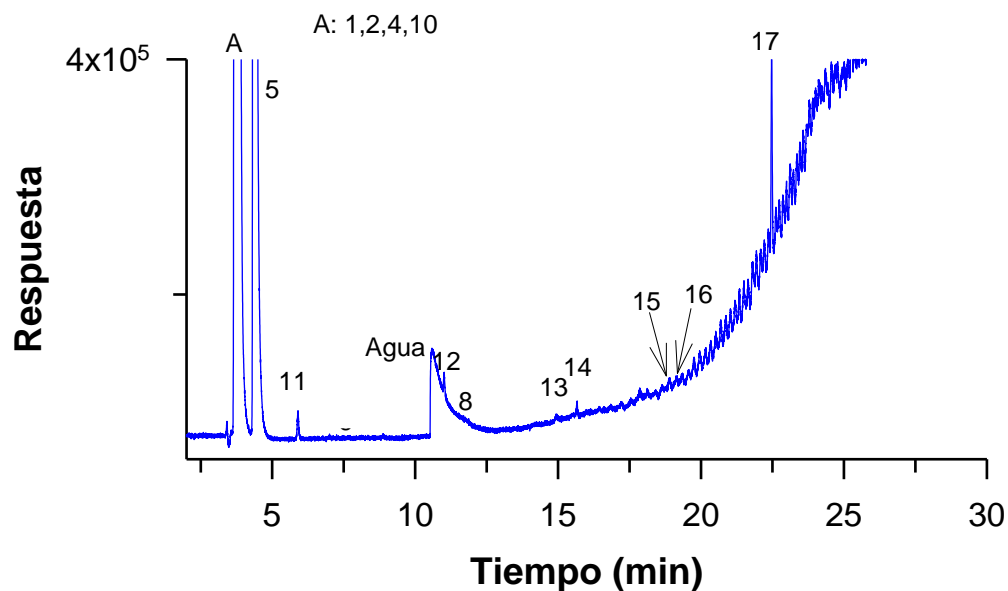


**Figura A2.41.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9B CP3 14:08 Mayo 2013.

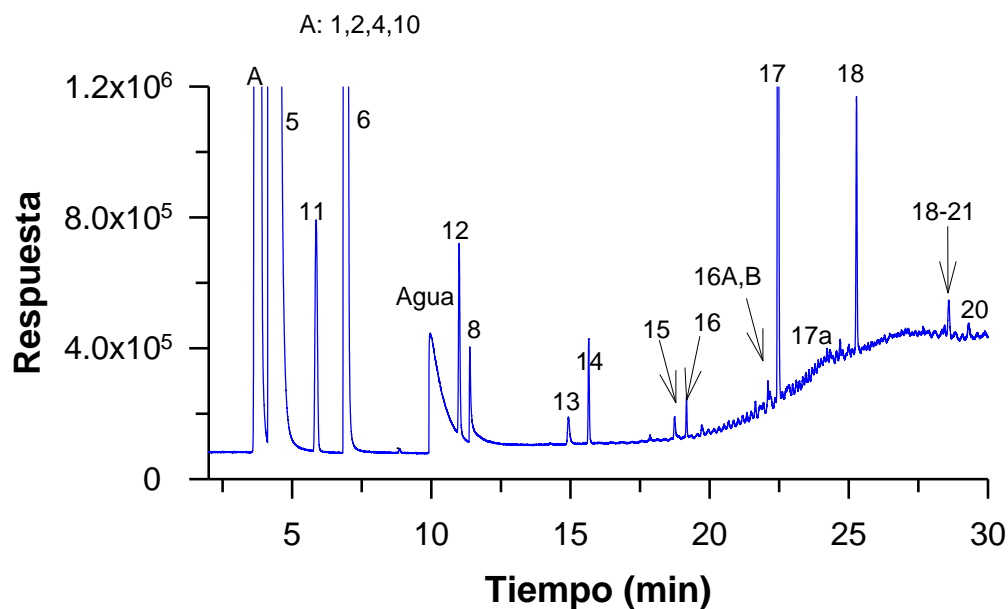


**Figura A2.42.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9B CP3 14:13 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

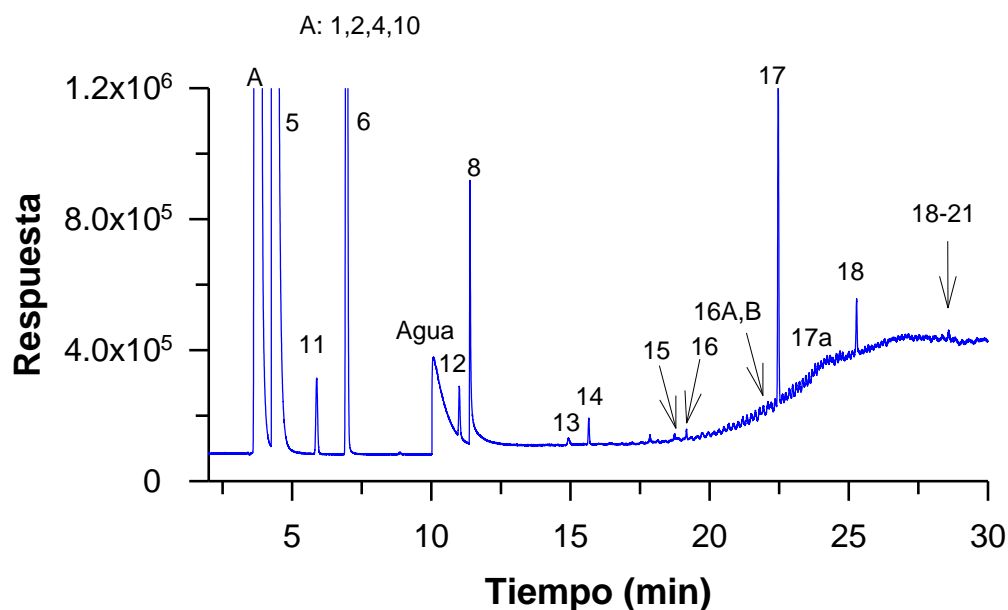


**Figura A2.43.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9A CP3 14:22 Mayo 2013.

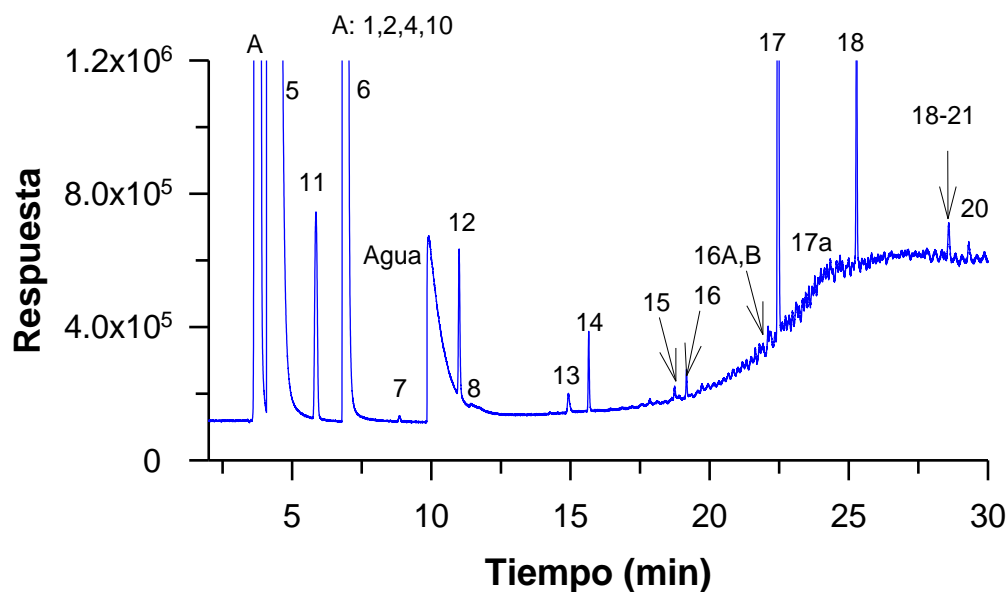


**Figura A2.44.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9A CP3 14:26 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

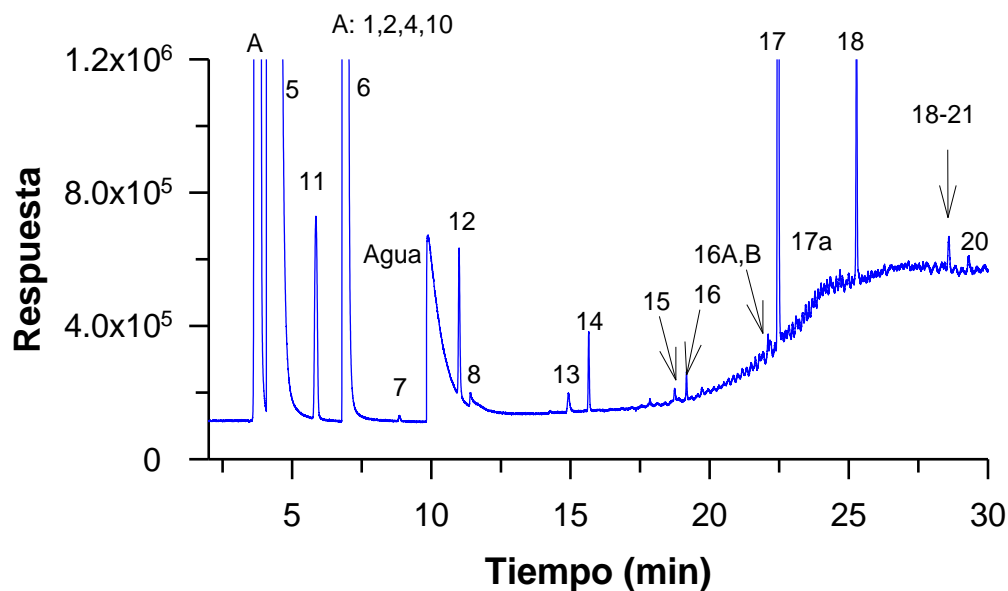


**Figura A2.45.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad 9A CP3 14:30 Mayo 2013.

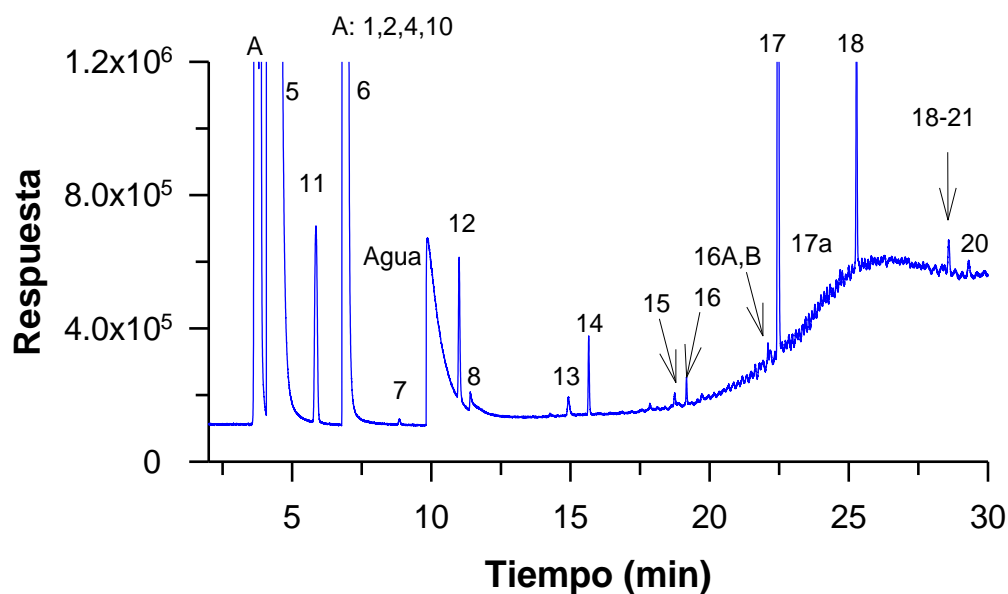


**Figura A2.46.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 16:51 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

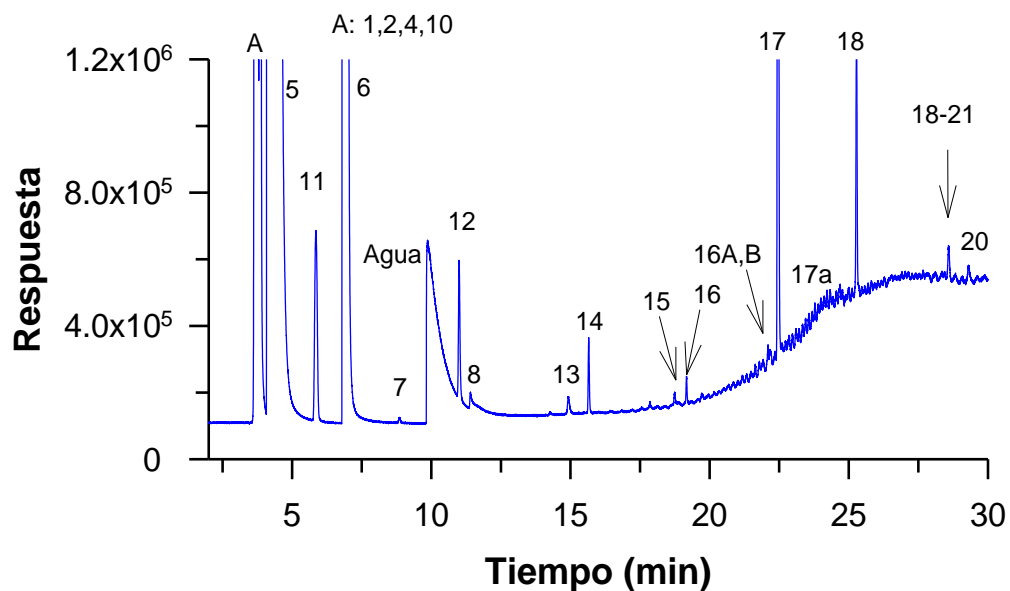


**Figura A2.47.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 17:00 Mayo 2013.



**Figura A2.48.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 17:03 Mayo 2013.

1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.

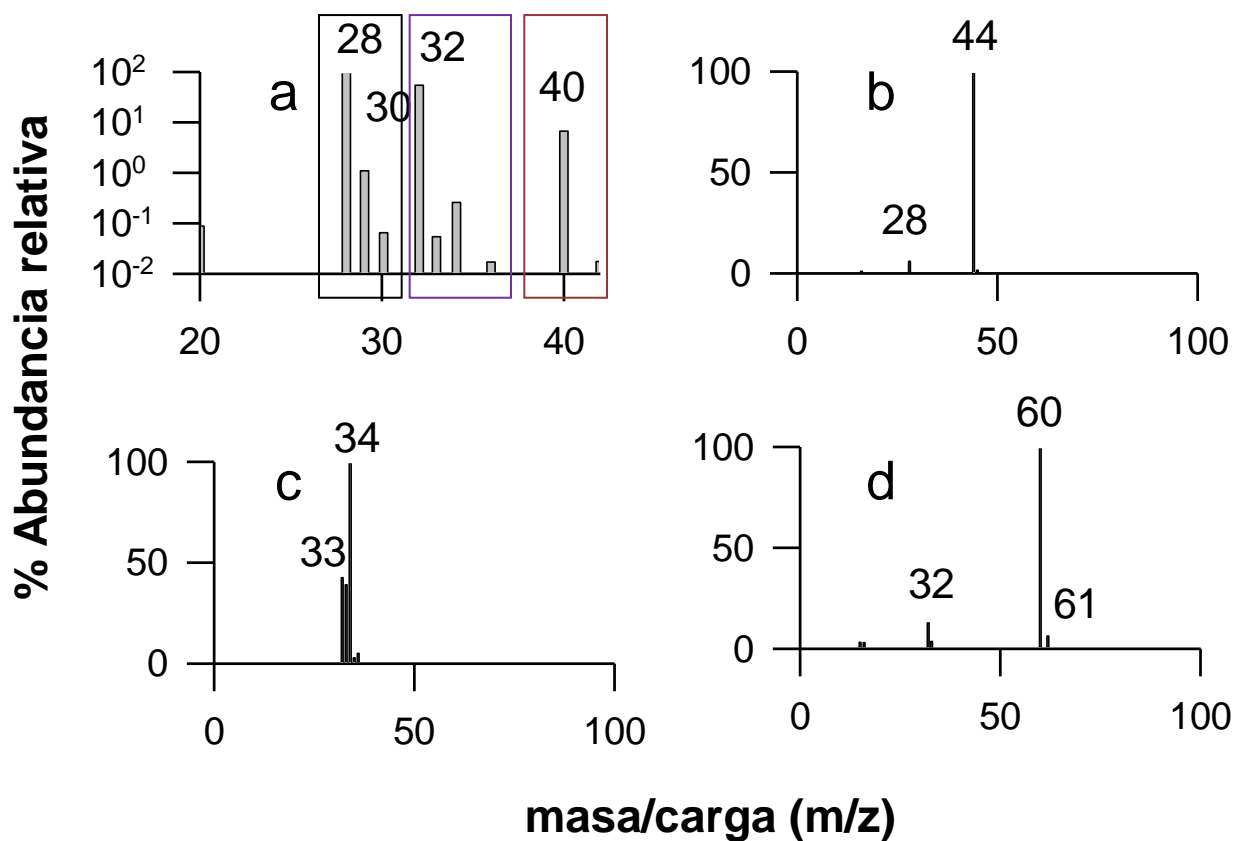


**Figura A2.49.** Cromatograma de los gases emitidos por la Unidad Gral. CP4 17:06 Mayo 2013.

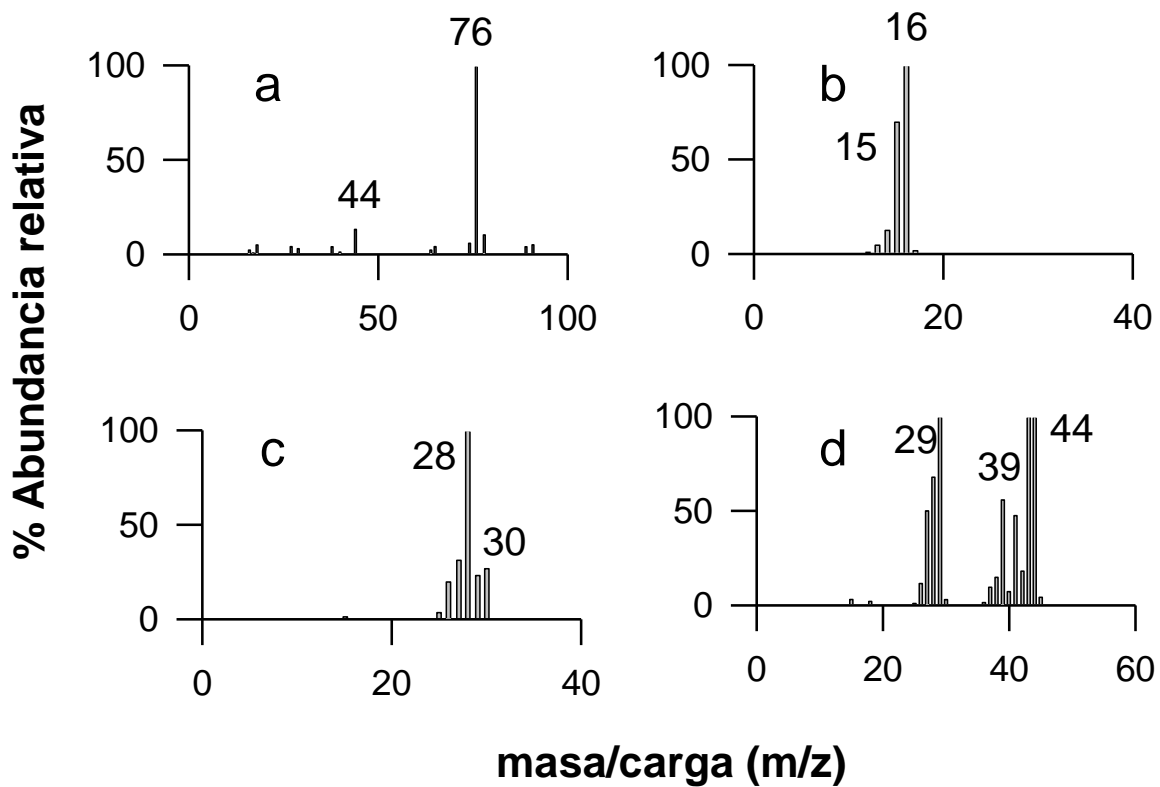
1 Nitrógeno, 2 Oxígeno, 4 Óxido Nítrico, 5 Dióxido de Carbono, 6 Sulfuro de Hidrógeno, 7 Sulfuro de Carbonilo, 8 Dióxido de Azufre, 9 Sulfuro de Carbono, 10 Metano, 11 Etano, 12 Propano, 13 Isobutano, 14 Butano, 15 Isopentano, 16 Pentano, 16A Hexano, 16B Metilciclopentano, 17 Benceno, 17A Ciclohexano, 18 Tolueno, 19 o-Xileno, 20 m-xileno, 21 p-xileno y 22 Etilbenceno.



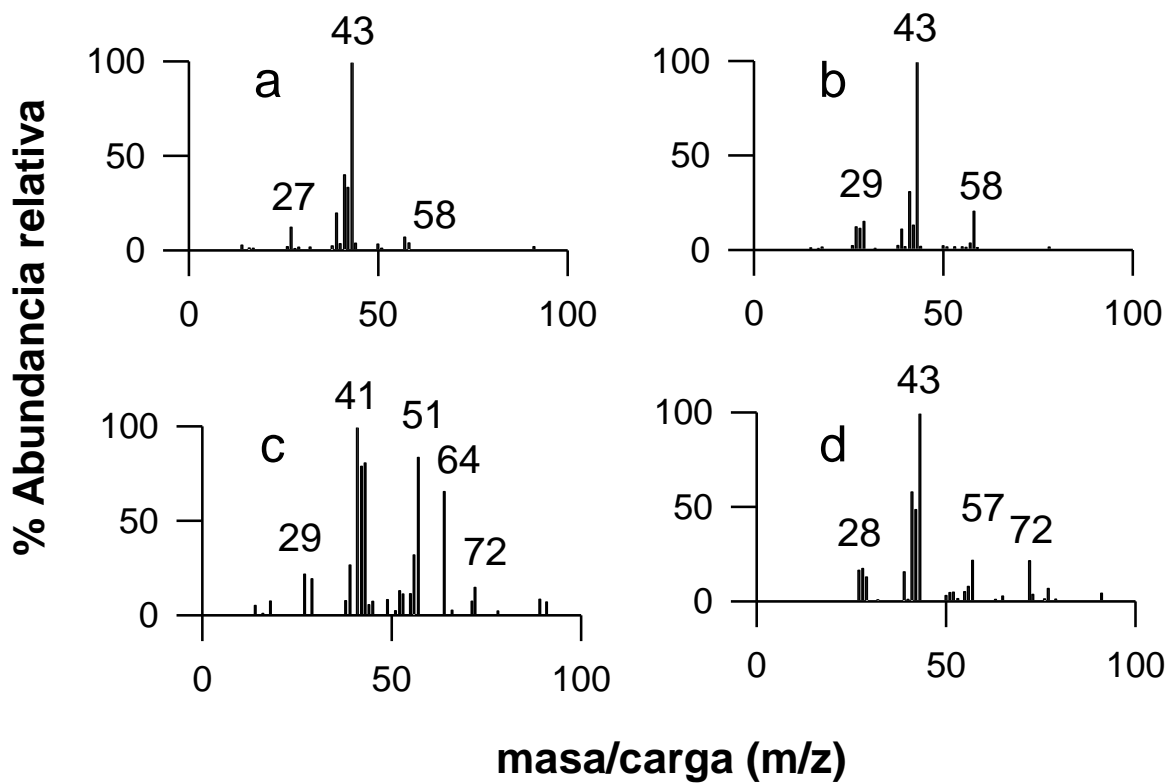
### ANEXO 3: ESPECTROS DE MASAS



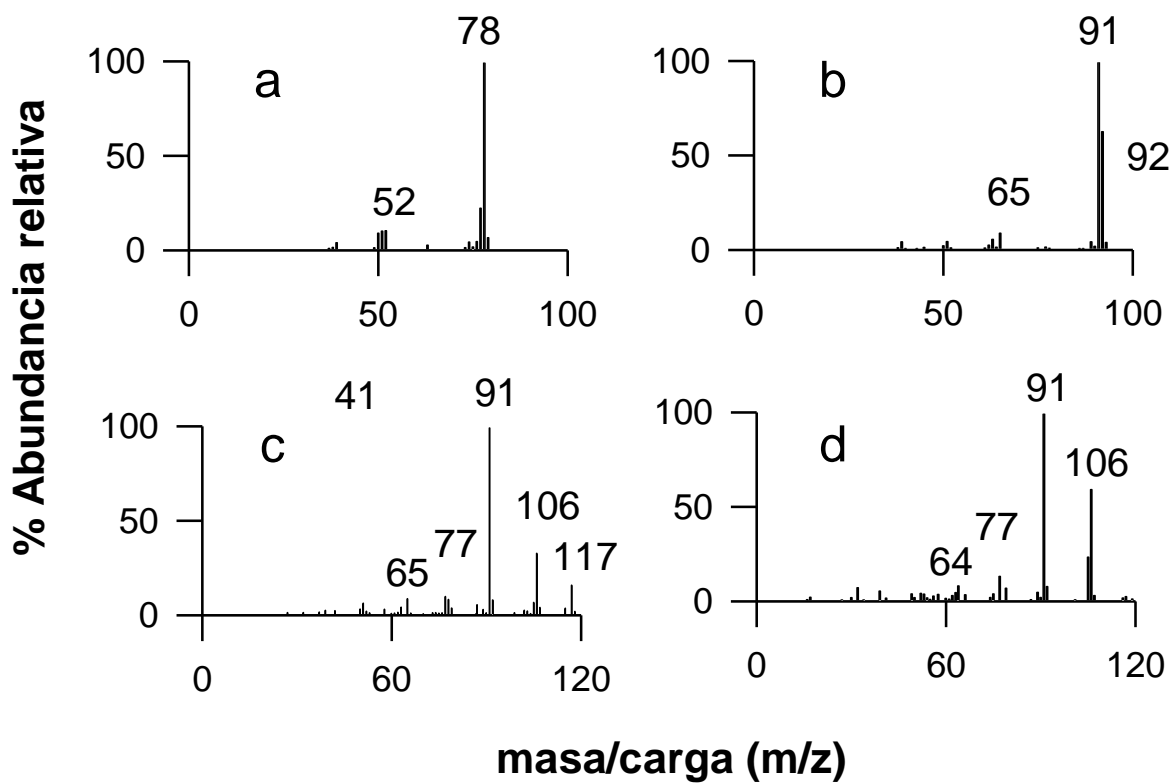
**Figura A3.1.** Patrón de fragmentación de compuestos detectados en las muestras de emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto. **(a)** Nitrógeno (PM 28), Oxígeno (PM 32) y Óxido Nítrico (PM 30). **(b)** Dióxido de Carbono (PM 44). **(c)** Sulfuro de Hidrógeno (PM 34). **(d)** Sulfuro de Carbonilo (PM 60).



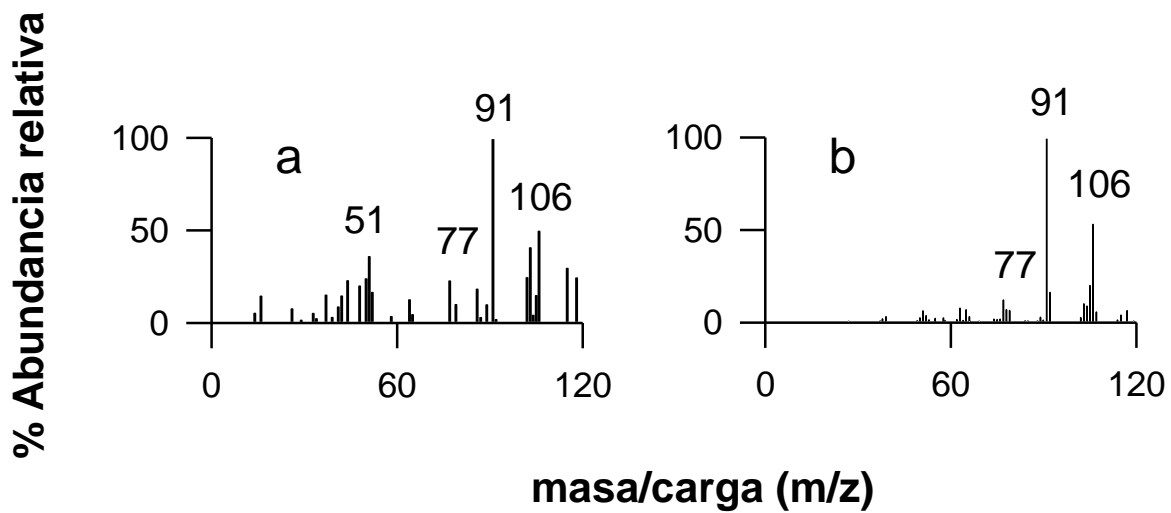
**Figura A3.2.** Patrón de fragmentación de compuestos detectados en las muestras de emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto. **(a)** Sulfuro de Carbono (PM 76). **(b)** Metano (PM 16). **(c)** Etano (PM 30). **(d)** Propano (PM 44).



**Figura A3.3.** Patrón de fragmentación de compuestos detectados en las muestras de emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto. **(a)** Isobutano (PM 58). **(b)** Butano (PM 58). **(c)** Isopentano (PM 72). **(d)** Pentano (PM 72).



**Figura A3.4.** Patrón de fragmentación de compuestos detectados en las muestras de emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto. **(a)** Benceno (PM 72). **(b)** Tolueno (PM 92). **(c)** o-Xileno (PM 106). **(d)** m-Xileno (PM 106).



**Figura A3.5.** Patrón de fragmentación de compuestos detectados en las muestras de emisiones del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto. **(a)** p-Xileno (PM 106). **(b)** Etilbenceno (PM 106).

## ANEXO 4: CURVAS DE CALIBRACIÓN

Ecuación	$y = a + b \cdot x$
Estado del Reporte	Nuevo Reporte de Análisis
Valor	Instrumental

### Parámetros

		Valor	Desviación Estándar	95% LIC
Promedio Y	Intersección	$2.88778 \times 10^7$	$1.94753 \times 10^6$	$2.38715 \times 10^8$
	Pendiente	$2.73123 \times 10^8$	$8.39746 \times 10^6$	$2.51537 \times 10^8$

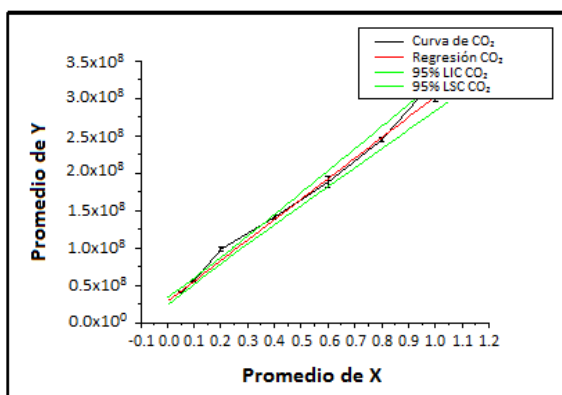
### Estadística

	Promedio Y
Número de puntos	7
Grados de Libertad	5
Suma de cuadrados de residuos	37.597
Coefficiente de Correlación	0.99435

### ANOVA

		DF	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor F	Prob>F
Promedio Y	Modelo	1	7954.3157	7954.3157	1057.8391	$5.16257 \times 10^{-7}$
	Error	5	37.597	7.5194		
	Total	6	7991.91271			

### Curva de Calibración



### Residuos

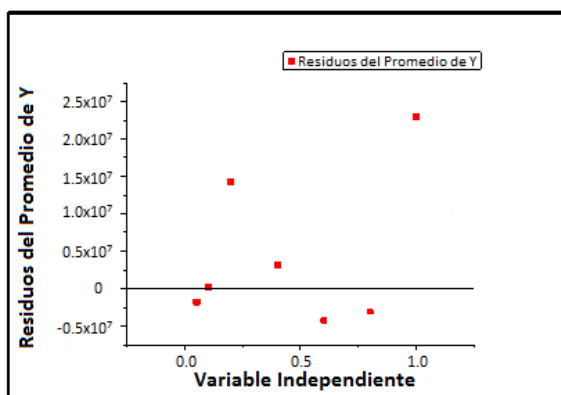


Figura A4.1. Análisis estadístico de la curva de calibración del Dióxido de Carbono.

Ecuación	$y = a + b \cdot x$
Estado del Reporte	Nuevo Reporte de Análisis
Valor	Instrumental

### Parámetros

		Valor	Desviación Estándar	95% LIC
Promedio Y	Intersección	5391.41054	2416.64148	56.00133
	Pendiente	$1.38424 \times 10^6$	82590.03745	$1.20429 \times 10^6$

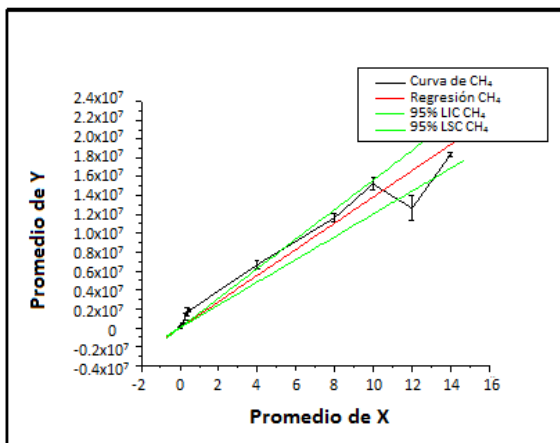
### Estadística

	Promedio Y
Número de puntos	14
Grados de Libertad	12
Suma de cuadrados de residuos	333.51348
Coefficiente de Correlación	0.95562

### ANOVA

		DF	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor F	Prob>F
Promedio Y	Modelo	1	7807.29431	7807.29431	280.91078	$1.08581 \times 10^{-9}$
	Error	12	333.51348	27.79279		
	Total	13	8140.80778			

### Curva de Calibración



### Residuos

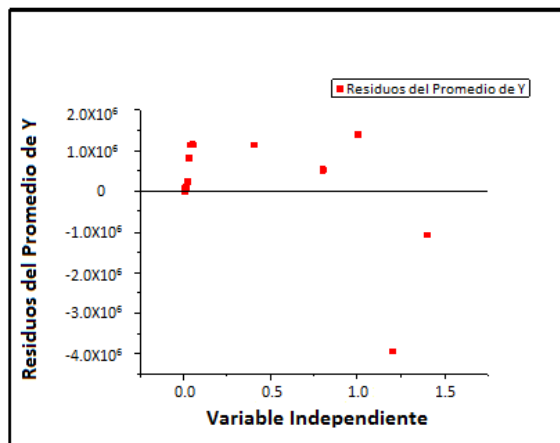


Figura A4.2. Análisis estadístico de la curva de calibración del Metano.

Ecuación	$y = a + b \cdot x$
Estado del Reporte	Nuevo Reporte de Análisis
Valor	Instrumental

### Parámetros

		Valor	Desviación Estándar	95% LIC
Promedio Y	Intersección	674627.991556	93184.70348	454281.43395
	Pendiente	$6.06406 \times 10^6$	237837.31116	$5.50166 \times 10^6$

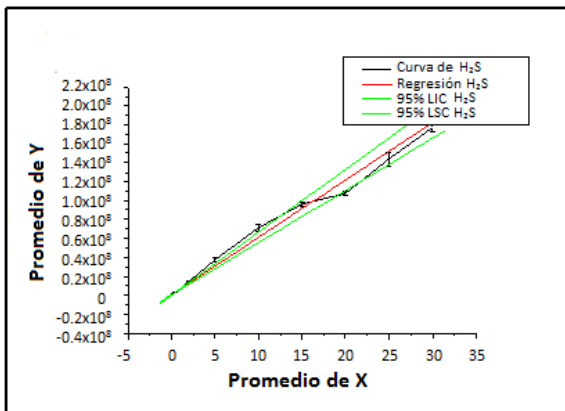
### Estadística

	Promedio Y
Número de puntos	9
Grados de Libertad	7
Suma de cuadrados de residuos	95.85857
Coefficiente de Correlación	0.98782

### ANOVA

		DF	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor F	Prob>F
Promedio Y	Modelo	1	8902.24697	8902.24697	650.07989	$3.64686 \times 10^{-8}$
	Error	7	95.85857	13.69408		
	Total	8	8998.10554			

### Curva de Calibración



### Residuos

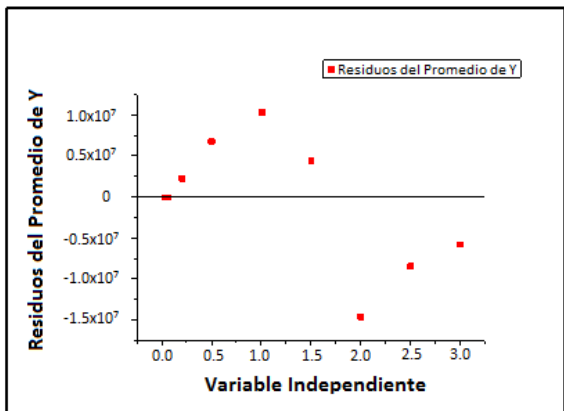


Figura A4.3. Análisis estadístico de la curva de calibración del Sulfuro de Hidrógeno.



Ecuación	$y = a + b \cdot x$
Estado del Reporte	Nuevo Reporte de Análisis
Valor	Instrumental

### Parámetros

		Valor	Desviación Estándar	95% LIC
Promedio Y	Intersección	23668.87639	7206.37115	6628.53591
	Pendiente	4488.82147	206.92495	3999.52229

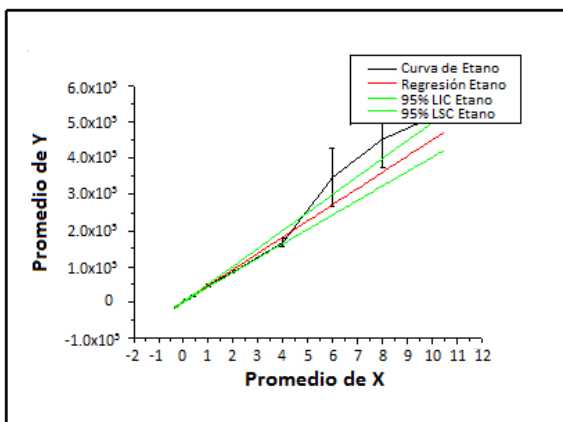
### Estadística

	Promedio Y
Número de puntos	9
Grados de Libertad	7
Suma de cuadrados de residuos	26.87053
Coefficiente de Correlación	0.98325

### ANOVA

		DF	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor F	Prob>F
Promedio Y	Modelo	1	1806.4133	1806.4133	470.58596	$1.1158 \times 10^{-7}$
	Error	7	26.87053	3.83865		
	Total	8	1833.28382			

### Curva de Calibración



### Residuos

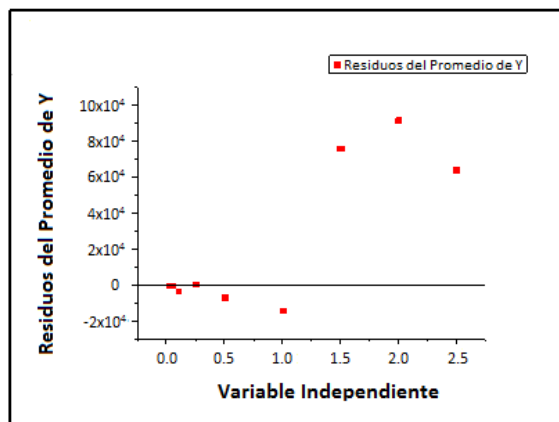


Figura A4.4. Análisis estadístico de la curva de calibración del Etano.