



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

GUION EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA CONCENTRACIÓN DE AGENTES TÓXICOS EN
FASE GAS EN AMBIENTE LABORAL A TRAVÉS DE
UN SISTEMA DE MUESTREO SEMIAUTOMÁTICO

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

ISABEL EMILIANO RAMOS

DIRECTOR DE TESIS

DRA. GEMA LUZ ANDRACA AYALA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

AÑO 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación o Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado Guion experimental para la determinación de la concentración de agentes tóxicos en fase gas en ambiente laboral a través de un sistema de muestreo semiautomático que presenté para obtener el título/grado de Ingeniero químico, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por la Facultad de Química, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

Atentamente

Israel Emiliano Ramos	419014784
-----------------------	-----------

(Nombre completo, firma y número de cuenta)

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: GARCÍA REYNOSO JOSÉ AGUSTÍN

VOCAL: Profesor: GUTIÉRREZ LARA MARÍA RAFAELA

SECRETARIO: Profesor: ANDRACA AYALA GEMA LUZ

1er SUPLENTE: Profesor: MENDOZA CAMPOS ALEJANDRA

2do SUPLENTE: Profesor: BERISTAIN MONTIEL ERIK

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO, CIUDAD
UNIVERSITARIA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

DRA. GEMA LUZ ANDRACA AYALA

SUPERVISOR TÉCNICO:

DR. LUIS GERARDO RUIZ SUÁREZ

SUSTENTANTE:

ISRAEL EMILIANO RAMOS

AGRADECIMIENTOS

A la **Facultad de Química, UNAM** por permitirme conocer a personas extraordinarias, las cuales son de vital importancia en mi crecimiento personal, profesional y académico.

Al **Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC)** por permitirme desarrollar el proyecto de tesis en sus instalaciones.

Al proyecto **PAPIME 102223** por el apoyo económico que se brindó para realizar el proyecto “Guion de laboratorio para la determinación de la concentración de agentes tóxicos en fase gas en ambiente laboral a través de un sistema de monitoreo semiautomático”

A la **Dra. Gema Luz Andraca Ayala** por brindarme su apoyo continuo, su amabilidad, comprensión y enseñanza desde el momento en el que la conocí.

Al **Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez** y a la **M. en C. Lida A. Solórzano García** por el asesoramiento y supervisión del trabajo.

Al **Dr. Iván Yassmany Hernández** y a la **M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara** por su asesoría durante todo el proceso.

Al **Ing. Alfredo Rodríguez M.** y al **Tec. Sergio Garduño Pérez** por su apoyo en la elaboración de la carcasa del equipo construido.

Ing. Omar López Antón y al **Ing. Miguel Ángel Robles Roldan** por el asesoramiento y apoyo en el desarrollo, construcción y programación del sistema semiautomático de muestreo.

Al **Dr. Luis Ladino Moreno** y a la **RUOA** por la oportunidad de utilizar sus instalaciones para la construcción del equipo.

A la **M. en C. Lara Bárbara Cuesta Castillo** por facilitarnos realizar las pruebas piloto en el ICAYCC.

A la **M. en C. Yoalli Bianii Hernández Marmolejo** y a **C. David Cueto Reyes** por su apoyo en el desarrollo de un video tutorial para la práctica experimental.

A **Brenda Angelica Chico Ruiz** por su apoyo en la técnica analítica experimental.

A los integrantes del jurado: **Dr. García Reynoso José Agustín, M en I. Gutiérrez Lara María Rafaela** y **Dra. Andraca Ayala Gema Luz**; por su revisión y retroalimentación de este trabajo.

Índice	Página
Objetivo general	7
Objetivos particulares	7
Resumen	8
Capítulo 1. Antecedentes	9
1.1.- Higiene Industrial	9
1.2.- Compuestos tóxicos gaseosos	10
1.2.1- Compuestos orgánicos volátiles	11
1.2.2.- Carbonilos	11
1.2.3.- Fuentes de carbonilos en ambiente laboral	12
1.2.4- Riesgos a la salud y toxicología de los carbonilos	12
1.3.- Normatividad laboral en México: NOM-010-STPS-2014	13
1.3.1.- Definiciones de la normativa	14
1.3.2.- VLE para Carbonilos de bajo peso molecular	15
1.3.3.- Muestreo y determinación analítica de los agentes químicos contaminantes	18
1.4.- Muestreo de carbonilos con cartuchos de DNPH.	19
1.4.1.-Técnica analítica para determinación de carbonilos.	20
Capítulo 2. Método	22
2.1.- Diseño y construcción del sistema semiautomático de muestreo de carbonilos.	22
2.1.1.-Diseño	24
2.1.2-Componentes	26
2.1.3.-Especificaciones de los sensores.	30
2.1.4.-Construcción y montaje.	32
2.1.5.-Prueba de hermeticidad y comprobación de flujo.	35

2.2-Desarrollo del guion experimental	35
2.2.1.-Prueba piloto	36
2.2.2.-Análisis de la muestra.	37
2.2.3.-Memoria de cálculo.	39
Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados	42
3.1.- Prueba Piloto del SMCA	42
3.2.- Cuantificación de concentraciones en aire	43
3.2.- Análisis de resultados	48
Capítulo 4. Conclusiones	49
Referencias	50
Anexos	54
Anexo 1.- Guion experimental	54
Anexo 2.- Curvas de calibración	70
Curvas de calibración de formaldehído y acetaldehído.	70
Curvas de calibración de acroleína y acetona.	71
Curvas de calibración de propionaldehído y crotonaldehído.	72
Anexo 3.- Reportes de los cromatogramas de la prueba piloto.	73
Cromatograma del periodo 8:00 a 9:45.	73
Cromatograma del periodo 10:00 a 11:45.	74
Cromatograma del periodo 12:00 a 13:45.	75
Cromatograma del periodo 14:00 a 15:45.	76
Cromatograma del periodo 16:00 a 17:45.	77
Cromatograma del periodo 18:00 a 19:45.	78
Anexo 4.- Certificado de calibración del sensor de flujo SFM4100 (Sensirion AG, 2023).	79
Anexo 5.-Certificado de análisis del estándar (Sigma-Aldrich, 2020).	80

Índice Figuras

Página

Figura 1. Cartucho de silica impregnado de 2,4-Dinitrofenilhidrazina (Waters, 2009).	19
Figura 2. Reacción de derivatización de carbonilos (Waters, 2009).	19
Figura 3. Diagrama del sistema de muestreo empleado en el ICAyCC-UNAM (Hernández Castro, 2018).	23
Figura 4. Esquema del sistema SMCA.	25
Figura 5. Sensor de presión, temperatura y humedad BME680 (Bosch Sensortec, 2022)	30
Figura 6. Sensor de flujo másico, Sensirion SFM4100 (Sensirion AG, 2013).	30
Figura 7. Tapa superior y base de la carcasa.	32
Figura 8. Base interna, tapa delantera y trasera de la carcasa.	32
Figura 9. SMCA, vista delantera.	33
Figura 10. SMCA, vista trasera.	33
Figura 11. Interior del SMCA.	34
Figura 12. Calibrador de flujo Sensydine-Gilian Gilibrator II.	35
Figura 13. Muestreo de carbonilos con el equipo SMCA en la azotea del ICAyCC.	36
Figura 14. Colocación del matraz aforado, cartucho y jeringa para extracción.	37
Figura 15. Cromatógrafo HPLC Shimadzu	38

Índice Tablas

Página

Tabla 1. Valor límite de exposición de carbonilos indicados en la NOM-010-STPS-2014 (STPS, 2014)	15
Tabla 2. Límites de exposición de carbonilos, indicados por la NOM-010-STPS-2014 y por distintos organismos de seguridad y salud ocupacional (NIOSH, 2007; STPS, 2014; HSE, 2020; INSST, 2022; OSHA, 2023).	16
Tabla 3. Carbonilos que pueden ser determinas con la técnica analítica.	21
Tabla 4. Elementos que componen el sistema SMCA	26
Tabla 5. Función de los elementos del módulo de carga.	27
Tabla 6. Función de los elementos del módulo de control.	28
Tabla 7. Función de los elementos del módulo neumático.	29
Tabla 8. Especificaciones del SMCA	34
Tabla 9. Periodos y horario de muestreo.	36
Tabla 10. Condiciones de la técnica analítica.	37
Tabla 11. Valores requeridos para calcular la masa capturada de contaminante.	39
Tabla 12. Condiciones experimentales de muestreo.	42
Tabla 13. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del formaldehído.	44
Tabla 14. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del acetaldehído.	44
Tabla 15. Valores necesarios para el cálculo de la CMA de la acroleína.	45
Tabla 16. Valores necesarios para el cálculo de la CMA de la acetona.	45
Tabla 17. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del propionaldehído.	46
Tabla 18. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del crotonaldehído.	46
Tabla 19. CMA determinadas durante la prueba piloto.	47
Tabla 20. CMA-PPT de los carbonilos estudiados.	47

Objetivo general

Elaboración, implementación y evaluación de un guion experimental para muestreo de contaminantes mediante un sistema semiautomático de muestreo para la asignatura optativa disciplinaria de Protección Ambiental I (0273), el cual permita poner en práctica los conocimientos adquiridos en las materias teóricas (Protección ambiental I y Protección ambiental III), así como la implementación y evaluación de la NOM-010-STPS-2014 para contaminantes en ambiente laboral.

Objetivos particulares

- Desarrollo de un guion experimental para la asignatura optativa disciplinaria de Protección ambiental I (0273) de la licenciatura de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM.
- Diseño, construcción e implementación de un sistema semiautomático de muestreo de contaminantes tóxicos gaseosos en ambiente laboral que permita la captura de compuestos carbonilos, para su posterior análisis por cromatografía de líquidos HPLC acoplado a un detector Uv-Vis.
- Realización de una prueba piloto para la comprobación del correcto funcionamiento del equipo construido.
- Cálculo de las concentraciones de los compuestos muestreados.

Resumen

En este trabajo se desarrolla un guion experimental de laboratorio para la asignatura optativa de Protección Ambiental I del programa de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM.

Para ello se diseñó un sistema semiautomático de muestreo (Sistema de Muestreo de Carbonilos, SMCA) de contaminantes tóxicos gaseosos como compuestos orgánicos volátiles (carbonilos). El sistema consiste en un microprocesador (Raspberry pi 4 8 GB con una memoria microSD de 32 GB) que funge como módulo de control, el cual maneja la apertura y clausura de válvulas solenoides que flanquean 6 cartucho de captura, controla el flujo de aire generado por mini bombas de vacío de 8 LPM y recopila los datos de los sensores de flujo, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica.

Se comprobó la correcta construcción del SMCA a través de una prueba de hermeticidad y flujo y se verificó el funcionamiento del sistema de muestreo (SMCA) realizando una prueba piloto en la azotea del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. De la cual se determinó la concentración de carbonilos presentes mediante la técnica analítica de cromatografía de líquidos de alta resolución, HPLC, acoplado a un detector de Uv-Vis. Una vez comprobado el funcionamiento del sistema se elaboró el guion experimental de Protección Ambiental I "Muestreo y cuantificación de contaminantes tóxicos en fase gas en un ambiente laboral"

Capítulo 1. Antecedentes

1.1.- Higiene Industrial

La higiene industrial se dedica a la anticipación, reconocimiento, evaluación y control de los factores ambientales existentes en el ambiente laboral, los cuales causan enfermedad, deterioro de la salud, incomodidad significativa o ineficiencia tanto entre los trabajadores como los ciudadanos de la comunidad. Esto con el fin de proteger la seguridad de los trabajadores de manera tal que se puedan prevenir los accidentes y enfermedades relacionadas a la actividad laboral (Popendorf, 2019). Los peligros en el ambiente laboral se pueden clasificar en las siguientes categorías: biológicos, ergonómicos, físicos, psicosociales, y químicos.

- **Peligros Biológicos:** Son bacterias, virus, hongos y otros organismos vivos que pueden causar infecciones agudas y crónicas al ingresar al cuerpo ya sea directamente o a través de heridas en la piel. Cualquier ocupación que resulte en contacto con fluidos corporales representa un riesgo para los trabajadores de peligros biológicos, por lo que las relacionadas con plantas o animales, sus productos y/o con alimentos y procesamiento de alimentos pueden exponer a los trabajadores a estos peligros. El personal médico y de laboratorio también puede estar expuesto a ellos (OSHA, 2021).
- **Peligros Ergonómicos:** Dentro de estos, se incluyen actividades como levantar objetos pesados, agacharse, estirarse por encima de la cabeza, empujar y tirar de cargas pesadas, trabajar en posturas corporales incómodas y realizar las mismas tareas o tareas similares de forma repetitiva. Estas actividades generan un riesgo en el sistema musculoesquelético de los trabajadores, afectando los músculos, nervios, vasos sanguíneos, ligamentos y tendones (OSHA, 2015).

- **Peligros Físicos:** Estos incluyen exposición excesiva a radiación electromagnética ionizante y no ionizante, ruido, vibración, iluminación y temperatura (OSHA, 2021).
- **Peligros Psicosociales:** Son aspectos en el diseño o la gestión del trabajo que aumentan el riesgo de un efecto negativo en la salud de los trabajadores, incluidos problemas psicológicos, físicos o sociales, como el estrés, la depresión y el agotamiento relacionados con el trabajo (IOSH, 2022).
- **Peligros Químicos:** Son compuestos químicos nocivos aquellas sustancias que por inhalación (respiración), absorción (a través del contacto directo con la piel) o ingestión (comer o beber) generan efectos tóxicos. Estos se pueden encontrar en forma de sólidos, líquidos, gases, niebla, polvos, humos o vapores. El grado de riesgo del trabajador por la exposición a cualquiera de estas sustancias depende de la naturaleza y potencia de los efectos tóxicos y la magnitud y duración de la exposición (OSHA, 2021).

Dentro de los peligros químicos, los compuestos químicos gaseosos son monitoreados y regulados debido a que se absorben fácilmente en el sistema respiratorio por inhalación, generando afectaciones a la salud (ATSDR, 2019)

1.2.- Compuestos tóxicos gaseosos

Los compuestos tóxicos gaseosos son sustancias químicas que pueden tener efectos perjudiciales para la salud humana, los animales y el ambiente. Estos gases tóxicos provienen mayormente de fuentes industriales, procesos de combustión y actividades humanas (OMS, 2023; USEPA, 2023). Entre estos compuestos se encuentran el monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, el ozono troposférico y en particular, los compuestos orgánicos volátiles (COV's).

1.2.1- Compuestos orgánicos volátiles

Son un grupo de sustancias químicas que se emiten como gases gracias a su alta presión de vapor (Anand et al., 2014). Estos compuestos son de gran importancia, tanto en ambientes interiores como exteriores, debido a que en la atmósfera son precursores de reacciones fotoquímicas que generan contaminantes en el aire, mientras que en el aire interior incluso pequeñas concentraciones de estos contaminantes generan efectos adversos en la salud a corto y a largo plazo (USEPA, 2023).

La mayoría de las actividades humanas diarias liberan COV's al aire, ya sea como subproductos de reacciones como la combustión incompleta en vehículos, calderas y calentadores, así como en la cocina; o emitidos directamente de productos empleados en las actividades, como pinturas, perfumes, limpiadores, aerosoles, adhesivos o plumones permanentes, entre muchos otros (Anand et al., 2014; Pependorf, 2019).

Los COV's se clasifican por su estructura molecular o grupo funcional y estos incluyen hidrocarburos alifáticos, aromáticos, alcoholes, éteres, ésteres, carbonilos, etc (Anand & Mehendale, 2005).

1.2.2.- Carbonilos

Dentro de los COV's, los carbonilos son un grupo de gran importancia debido a la creciente preocupación por sus efectos adversos en la salud pública. Estos son conjunto de compuestos que se caracterizan por tener un grupo funcional constituido por un carbono unido por un doble enlace a un oxígeno ($C=O$) (Mcmurry, 2010). A consecuencia de la gran electronegatividad del oxígeno en comparación con el carbono, el enlace $C=O$ está fuertemente polarizado debido al desplazamiento de la densidad electrónica del enlace π hacia el oxígeno, lo que le da una gran reactividad (Potapov & Tatarinchik, 1983).

1.2.3.- Fuentes de carbonilos en ambiente laboral

Los carbonilos son emitidos por la combustión incompleta de los combustibles fósiles, ocurrida en los automóviles y medios de transporte, calderas, calentadores y estufas. Otras actividades como la quema de incienso y el humo de tabaco también emiten carbonilos al aire. En el caso de la industria los reactivos y productos que se emplean en los procesos de fabricación (producción de papel, plásticos, pinturas, adhesivos, automóviles, etc.) como la acetona, el formaldehído o el acetaldehído, también son una fuente importante de carbonilos (Wang et al., 2007; Kim et al., 2008; Zhang et al., 2023). Pese a que las fuentes biogénicas de carbonilos son relevantes, en áreas urbanas las fuentes antropogénicas son más significativas (He et al., 2020).

En interiores, los productos del hogar como marcadores permanentes, productos de limpieza, esmaltes, pinturas, repelentes de mosquitos, etc., así como materiales comúnmente utilizados para la construcción como madera, tuberías, paredes y aislamiento térmico son múltiples fuentes de carbonilos (Bernabe et al., 2015). Otra fuente de carbonilos en el ambiente laboral son los muebles y la decoración en las viviendas y espacios de trabajo (Weng et al., 2010).

La infiltración del aire exterior también puede ser una fuente predominante de carbonilos en interiores, dependiendo las condiciones ambientales y las actividades humanas (Lü et al., 2016).

1.2.4- Riesgos a la salud y toxicología de los carbonilos

El formaldehído, uno de los carbonilos que más abundantes en aire interior y exterior (Wang et al., 2007; Lü et al., 2016; Lui et al., 2017) es catalogado como cancerígenos por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer, IARC por sus siglas en inglés (IARC, 2006). La acroleína

es considerada por el IARC como un probable cancerígeno, mientras que el crotonaldehído un posible cancerígeno para los humanos (IARC, 2021).

El acetaldehído y el malonaldehído producen tumores en la nariz y páncreas, por lo que el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de Estados Unidos los considera cancerígenos potenciales (NIOSH, 2007). Otros aldehídos de bajo peso molecular, como el butiraldehído, propionaldehído y el n-valeraldehído tienen riesgos de cáncer similares debido que algunos estudios indican que estos compuestos tienen la reactividad química y mutagénica similar al acetaldehído y el malonaldehído, por lo que el NIOSH recomienda reducir la exposición para reducir el riesgo (NIOSH, 2007).

Debido a los riesgos mencionados anteriormente la exposición en el ambiente laboral a estos compuestos es regulada por distintos organismos de seguridad y salud ocupacional.

1.3.- Normatividad laboral en México: NOM-010-STPS-2014

En México, la Norma Oficial Mexicana que regula los peligros químicos en el ambiente laboral es la norma oficial mexicana NOM-010-STPS-2014, *Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral-Reconocimiento, evaluación y control*. Esta norma establece los criterios para el reconocimiento, evaluación y control de los agentes químicos contaminantes presentes en el ambiente laboral para prevenir alteraciones en la salud de los trabajadores expuestos a dichos contaminantes. En esta norma se definen las obligaciones del patrón y del personal ocupacionalmente expuesto, así como las características de los equipos de muestreo de agentes químicos contaminantes (STPS, 2014).

Esta norma define el ambiente laboral como el conjunto de elementos físicos, químicos y biológicos presentes en el centro de trabajo, los cuales son todos aquellos lugares, tales como edificios, locales, instalaciones y áreas, donde se realicen actividades de producción,

comercialización, transporte y almacenamiento o prestación de servicios, en los que laboren personas que estén sujetas a una relación de trabajo (STPS, 2014).

1.3.1.- Definiciones de la normativa

Otros conceptos que se utilizaran en el presente trabajo y son definidos por la normativa, se presentan a continuación.

- **CAS (Chemical Abstract Service):** iniciales en inglés del servicio de información de sustancias químicas de los Estados Unidos de América.
- **Concentración medida en el ambiente laboral (CMA):** El valor de la concentración del contaminante en el ambiente laboral, capturado durante una jornada de trabajo.
- **Concentración promedio ponderada en el tiempo (CMA-PPT):** La sumatoria del producto de cada una de las concentraciones por su tiempo de exposición, dividida entre la suma de los tiempos de medición durante una jornada de trabajo.
- **Condiciones normales de temperatura y presión (TPN):** Las que corresponden a un ambiente a temperatura de 298 K (25 °C) y presión de 101.3 kPa (760 mmHg).
- **Valor límite de exposición (VLE):** la concentración de referencia de un agente químico contaminante del medio ambiente laboral en el aire, que puede ser ponderado en tiempo, corto tiempo o pico. Se expresa en miligramos por metro cúbico (mg/m^3) o fibras por centímetro cúbico (f/cm^3) en las condiciones del muestreo, y en partes por millón (ppm), bajo condiciones normales de temperatura y presión (TPN).
- **Valor límite de exposición promedio ponderado en tiempo (VLE-PPT):** la concentración máxima promedio ponderada en tiempo de un agente químico contaminante del ambiente laboral, a la que la mayoría de los trabajadores expuestos, durante una jornada de ocho horas diarias y una semana laboral de cuarenta horas, no reportan daños a su salud.

- **Valor límite de exposición de corto tiempo (VLE-CT):** la concentración máxima de un agente químico contaminante del ambiente labora, a la cual los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un periodo máximo de 15 minutos, con intervalo de al menos una hora de no exposición entre cada periodo de exposición y un máximo de cuatro exposiciones en una jornada de trabajo de ocho horas diarias y que no sobrepase el VLE-PPT.
- **Valor límite de exposición pico (VLE-P):** La concentración de un agente químico contaminante del ambiente laboral que no se debe rebasar en ningún momento durante la jornada de trabajo.

1.3.2.- VLE para Carbonilos de bajo peso molecular

En la Tabla 1 se presentan los valores límite de exposición, indicados por la NOM-010-STSP-2014, para los seis carbonilos que se determinan en este trabajo.

Tabla 1. Valor límite de exposición de carbonilos indicados en la NOM-010-STPS-2014 (STPS, 2014)

No.	Sustancia química	CAS	VLE -PPT [ppm _v]	VLE-CT o VLE-P [ppm _v]
407	Formaldehído	50-00-0	-	0.3
3	Acetaldehído	75-07-0	-	25
55	Acroleína	107-02-8	-	0.1
26	Acetona	67-64-1	500	750
651	Propionaldehído	123-38-6	20	-
238	Crotonaldehído	4170-30-3	-	0.3

En comparación a los VLE de la norma NOM-010-STPS-2014 se presentan sus equivalentes emitidos por diversas organizaciones de seguridad y salud ocupacional (Tabla 2).

Tabla 2. Límites de exposición de carbonilos, indicados por la NOM-010-STPS-2014 y por distintos organismos de seguridad y salud ocupacional (NIOSH, 2007; STPS, 2014; HSE, 2020; INSST, 2022; OSHA, 2023).

	VLE [ppm _v]	Formaldehído	Acetaldehído	Acroleína	Acetona	Propionaldehído	Crotonaldehído
	NOM ^a	-	-	-	500	20	-
P	NIOSH ^b	0.016	200	0.1	-	-	2
P	OSHA ^c	0.75	-	0.1	250	-	2
T	INSST ^d	0.3	-	0.02	500	20	-
	HSE ^e	2	20	0.02	500	-	-
	NOM ^a	0.3	25	0.1	750	-	0.3
CT	NIOSH ^b	-	-	0.3	-	-	-
o	OSHA ^c	2	-	-	-	-	-
P	INSST ^d	0.6	25	0.05	-	-	-
	HSE ^e	2	50	0.05	1500	-	-

^a: norma oficial mexicana NOM-010-STPS-2014

^b: El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, de los Estados Unidos de Norteamérica.

^c: La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, de los Estados Unidos de Norteamérica.

^d: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

^e: El Ejecutivo de Seguridad y Salud, del Reino Unido.

Las instituciones emplean terminología diferente a la de la normativa mexicana, por lo que sus equivalentes se indican a continuación.

Los equivalentes del VLE de la NOM-010-STPS-2014 son el límite de exposición recomendado (REL) del NIOSH, límite permisible de exposición (PEL) de la OSHA, el valor límite ambiental (VLA) del INSST y el límite de exposición en el trabajo (WEL) de la HSE. De igual manera el termino concentración media ponderada en el tiempo (TWA por sus siglas en inglés) y el de exposición diaria (ED, INSST), son equivalente a VLE-PPT, sin embargo, la OSHA considera el TWA en una jornada de hasta 10 horas, respecto a las 8 horas de los otros. El límite de exposición a corto plazo (STEL, por sus siglas en inglés) y el Límite de exposición de corta duración (EC) son el equivalente al VLE-CT. El término límite techo (Ceiling, "C") es el equivalente al VLE-P.

1.3.3.- Muestreo y determinación analítica de los agentes químicos contaminantes

La NOM-010-STPS 2014 indica que el equipo, independientemente del método de muestreo, debe incluir una bomba de muestreo, calibrador de flujo de la bomba de muestreo, medios de captura establecidos por el procedimiento o método para la determinación analítica de la sustancia química e instrumentos de medición de temperatura y presión.

Además, indica que los procedimientos o métodos de muestreo y determinación analítica empleados deben ser emitidos por:

- a) El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, INSHT, del Ministerio del Trabajo de España. Actualmente INSST,
- b) La Organización Internacional de Estandarización, ISO, por sus siglas en inglés,
- c) El HSE,
- d) EL NIOSH o
- e) El OSHA.

El método de muestreo de carbonilos emitido tanto por el NIOSH (2003), el HSE (2010) y por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 1999) implica el uso de cartuchos impregnados de 2,4-dinitrofenilhidrazina (DNPH) para su posterior determinación por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) acoplado a un detector Uv-Vis.

1.4.- Muestreo de carbonilos con cartuchos de DNPH.

Este método para la determinación de carbonilos de bajo peso molecular utiliza cartuchos de silica impregnados de DNPH como medio de muestreo (Figura 1).



Figura 1. Cartucho de silica impregnado de 2,4-Dinitrofenilhidrazina (Waters, 2009).

La captura de los carbonilos ocurre debido a la reacción de los carbonilos con la DNPH, obteniendo hidrazonas derivadas, como se muestra en la Figura 2:

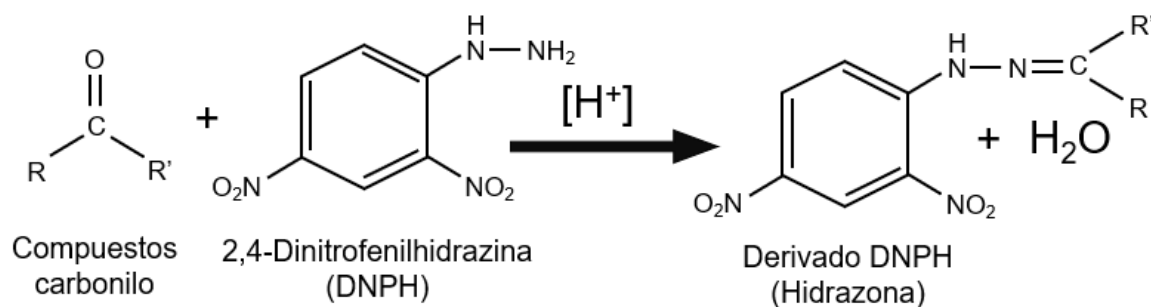


Figura 2. Reacción de derivatización de carbonilos (Waters, 2009).

El tiempo de exposición y el flujo de aire que pasa por el cartucho es determinado dado el rango de eficiencia de captura indicado por el fabricante (Waters, 2009). Una vez completado el muestreo, se realiza la extracción con acetonitrilo, separación por HPLC y detección por espectroscopia

1.4.1.-Técnica analítica para determinación de carbonilos.

La cromatografía HPLC es un método de separación de los compuestos de una mezcla, en donde los constituyentes de la mezcla son distribuidos en dos fases, una estacionaria y otra móvil(Snyder & Kirkland, 1979). Los componentes del sistema HPLC de este método analítico consisten de:

- Fase móvil compuesta de 60% Acetonitrilo/40% agua, y al no modificarse la composición del solvente durante la separación, se considera una separación Isocrática.
- Sistema de bombeo para la fase móvil.
- Sistema de inyección de muestra (inyector), el cual puede operarse manual o automáticamente.
- Columna (la cual contiene la fase estacionaria).
- Uno o más detectores y
- Un sistema de integración de datos.

La muestra se inyecta a través de inyector, el cual está conectado a la columna, en donde la separación ocurre. Los compuestos separados pasan después al detector donde genera una señal, la cual es guardada por el sistema de integración. Esta técnica es una cromatografía en fase reversa, debido a que la fase móvil empleada es polar y la fase estacionaria es no polar.

En esta técnica se tiene un detector de Uv-Vis, el cual analiza espectroscópicamente en la región alrededor de 360 nm, en la cual se obtiene una alta sensibilidad en el análisis (Waters, 2009). A partir de la señal que se obtiene de este detector y de una curva de calibración, el sistema de integración calcula la concentración los compuestos carbonilos muestreados.

A partir de este método se puede determinar la concentración de carbonilos de C₁ a C₉ carbonos (Waters, 2009), los cuales se indican en la Tabla 3, en orden ascendente de su tiempo de retención.

Tabla 3. Carbonilos que pueden ser determinas con la técnica analítica.

Compuesto	Peso molecular [g/mol]	Compuesto derivatizado	Peso molecular [g/mol]
Formaldehído	30.03	Formaldehído-DNPH	210.03
Acetaldehído	44.05	Acetaldehído-DNPH	224.05
Acetona	58.08	Acetona-DNPH	238.08
Acroleína	56.06	Acroleína-DNPH	236.06
Propionaldehído	58.08	Propionaldehído-DNPH	238.08
Crotonaldehído	70.09	Crotonaldehído-DNPH	250.09
Butiraldehído	72.11	Butiraldehído-DNPH	252.11
Benzaldehído	106.12	Benzaldehído-DNPH	286.12
Isovaleraldehído	86.13	Isovaleraldehído-DNPH	266.13
Valeraldehído	86.13	Valeraldehído-DNPH	266.13
o-Toluanaldehído	120.15	o-Toluanaldehído-DNPH	300.15
Hexaldehído	176.21	Hexaldehído-DNPH	356.21
2,5-Dimetilbenzaldeído	166.18	2,5-Dimetilbenzaldeído-DNPH	346.18

De los carbonilos indicados en la Tabla 3, los primeros cuatro son los de mayor concentración en el ambiente laboral, ya sea debido a que son emisiones de los productos empleados en las actividades laborales o bien por la quema de combustibles fósiles y biomasa (Carlier et al., 1986; Qian et al., 2019; Zhang et al., 2023)

Capítulo 2. Método

La realización del método se compone del diseño del sistema SMCA con base a la búsqueda bibliográfica y a las especificaciones requeridas para el mismo. Una vez diseñado se realiza la construcción del sistema y la prueba piloto para la comprobación del funcionamiento del equipo. Con el sistema construido, se desarrolla el guion experimental para la materia de Protección Ambiental I, "Muestreo y cuantificación de contaminantes tóxicos en fase gas en un ambiente laboral".

2.1.- Diseño y construcción del sistema semiautomático de muestreo de carbonilos.

El sistema se diseñó con base al sistema de muestreo empleado en el Laboratorio Compartido de Cromatografía del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC-UNAM), fundamentado en el método de medición 2018 del NIOSH (NIOSH, 2003) y el método de determinación de sustancias peligrosas 102 del HSE (HSE, 2010)

Este sistema de muestreo (Figura 3) consiste en un cartucho DNPH SEP – PAK marca Waters, una bomba de vacío Ashcroft, un rotámetro Dwyer RMA-26-SSV, manguera de teflón y un prefiltro impregnado KI (Hernández Castro, 2018).

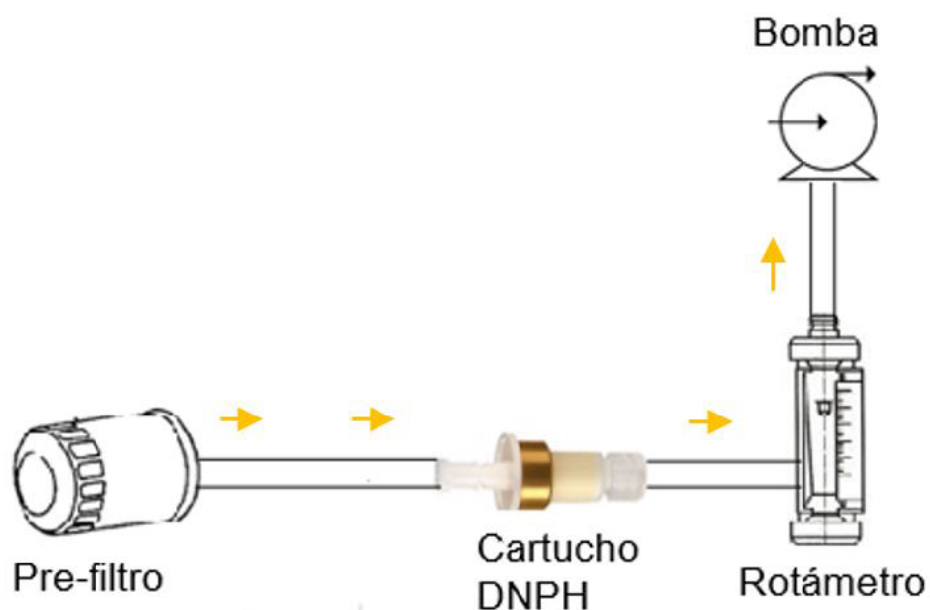


Figura 3. Diagrama del sistema de muestreo empleado en el ICAyCC-UNAM (Hernández Castro, 2018).

En este sistema la bomba de vacío genera un flujo de succión de aire medido por el rotámetro, seguido de este se conecta un cartucho de DNPH y un filtro impregnado de yoduro de potasio (KI) a la entrada del sistema para evitar la interferencia del ozono en el muestreo (Hernández Castro, 2018).

Este sistema requiere el cambio del cartucho de captura cada intervalo de tiempo, por lo que un muestreo continuo de 8 horas requiere personal capacitado trabajando en el muestreo por el periodo completo.

Por lo anterior, el objetivo del sistema SMCA es facilitar el muestreo continuo de carbonilos durante una jornada laboral de 8 horas, sin el requerimiento de colocar los cartuchos en cada intervalo.

2.1.1.-Diseño

El sistema SMCA se compone de los siguientes módulos:

1. **Modulo neumático:** Esta comprendido por dos bombas de vacío de una capacidad individual de 8 LPM, conectadas paralelamente, para funcionar por turnos, reduciendo su tiempo de trabajo y con ello aumentando su vida útil; éstas se encuentran conectadas a un conducto común que dirige a seis líneas de conducción. En cada línea de conducción se sitúa en serie una válvula solenoide de entrada, un cartucho de captura y una válvula solenoide de salida. Estos conductos se unen en una línea que pasa por el sensor de flujo másico, un rotámetro que controla el flujo, un filtro de KI y finalmente a la toma de aire. El par de válvulas que flanquean cada cartucho se abrirán simultáneamente durante el periodo de muestreo, mientras el resto de las parejas de válvulas permanece cerrado, para dar paso al aire por un único cartucho abierto en todo el conjunto. La apertura secuencial de los pares de válvulas permitirá efectuar mediciones continuas durante el muestreo.
2. **Módulo de control:** Consiste en un microprocesador Raspberry Pi 4 de 2 GB, con una memoria microSD de 32 GB, donde se ejecutarán los programas que permitan la activación secuencial de los pares de válvulas el control a través de una tarjeta de relevadores. La tarjeta de relevadores se conecta al microprocesador por medio de la interfaz de pines GPIO de esta última. Además, controlará el encendido y apagado de las minibombas de vacío. Para el manejo del usuario se coloca una pantalla táctil de 7" para el interfaz de control del sistema. Además, el módulo consta con un sensor de flujo, de presión, temperatura y humedad; para la medición de las condiciones del muestreo.
3. **Módulo de carga:** La energía necesaria para operar tanto el módulo neumático en operación como el de control electrónico la proporcionará una conexión la corriente controlada por una fuente de poder de 450 W. Para la conexión del microprocesador se tiene un regulador de voltaje de corriente directa.

El esquema del sistema se presenta en la Figura 4. La nomenclatura y elementos de dicha figura se desglosa en la Tabla 4.

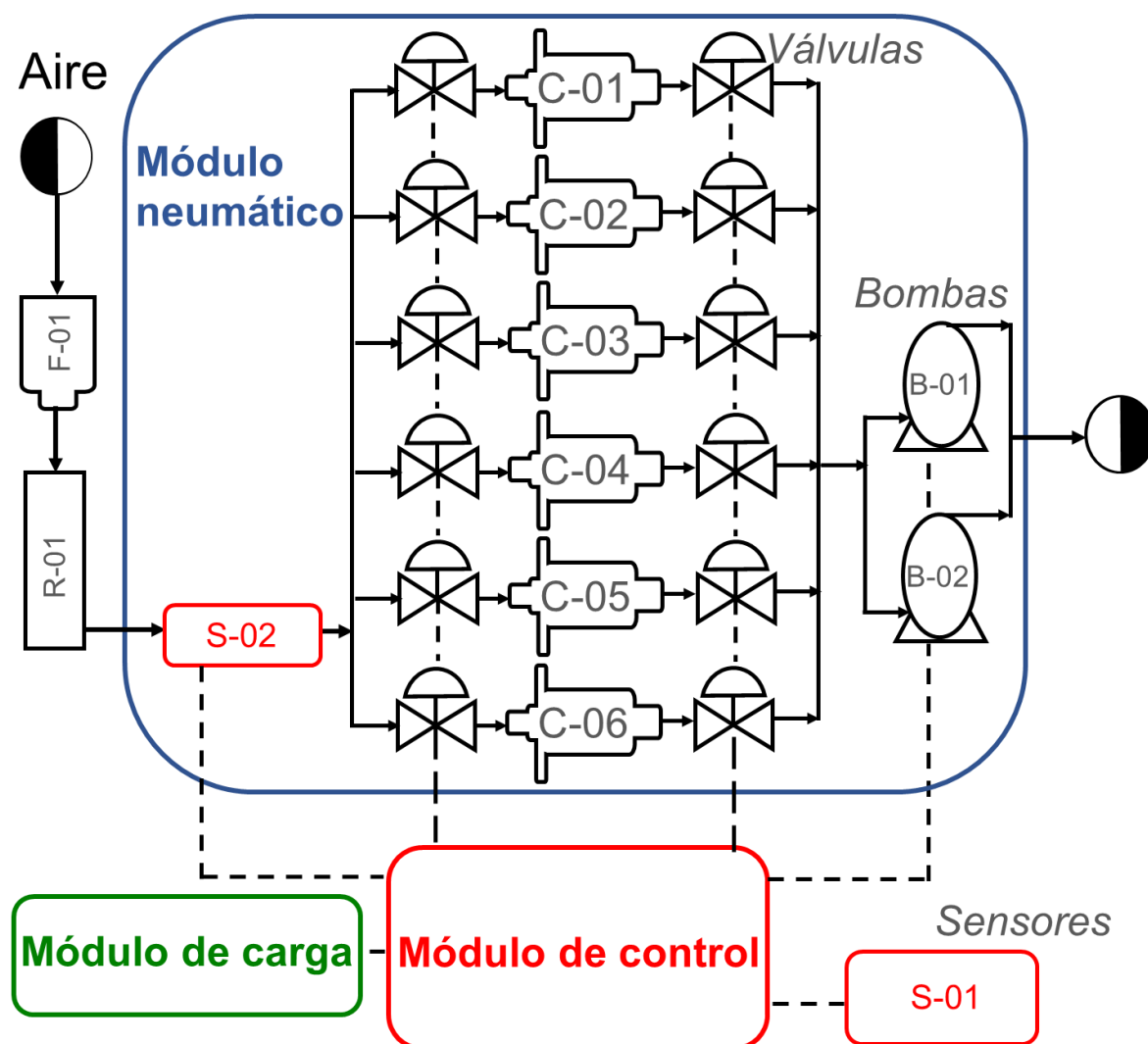


Figura 4. Esquema del sistema SMCA.

2.1.2-Componentes

Los elementos que conforman el SMCA están indicados en la Tabla 4.

Tabla 4. Elementos que componen el sistema SMCA

Módulo de carga	Módulo de control	Módulo neumático.
Fuente de poder marca <i>Mean Well</i> de 450W.	Microprocesador: Raspberry pi 4 de 2 GB con carcasa, ventilador y memoria microSD.	F-01: portafiltro de PTFE para membranas de 47 mm diámetro, marca <i>Ali Labware</i> .
Regulador de voltaje de corriente directa, modelo <i>LM2596</i> .	Pantalla táctil de 7" con conexión HDMI al microprocesador.	B-01/B-02: minibombas de vacío de 8 LPM para gases, 12 V, conexión de 6 mm diámetro externo (DO) modelo <i>AJK.B12A3606</i> .
Regulador de voltaje de corriente directa, modelo <i>XL4016</i> .	Módulo de 8 relevadores de 5 V, modelo <i>SDR-05VDC-SL-C</i> .	C-01 a C-06: cartucho de silica impregnado de 2,4-DNPH marca <i>Waters</i> .
Botón de encendido/apagado.	Dos Inversores de corriente, modelo <i>CD4049BE</i> .	Par de válvulas solenoides normalmente cerradas de 12 V, 6 mm DO, marca <i>OLK</i> .
Conexión macho interlock y cable para conectar a corriente.	S-01: sensor de presión, temperatura y humedad, modelo <i>BME680</i> .	R-01: Rotámetro de 0.5 a 5 LPM de aire, marca <i>Dwyer</i> , modelo <i>RMA-26-SSV</i>
Cable calibre 12 AWG para las conexiones a los equipos.	S-02: sensor de flujo másico de 0 a 20 slm ^a , <i>Sensirion</i> modelo <i>SFM4100</i> .	Conexiones tipo T, L y pasamuros de conexión rápida, de acero inoxidable, 6 mm DO.
		Tubería de 6 mm DO de Poliuretano poliéster, marca <i>Parker</i> .
		Tubería de 8 mm DO de Poliuretano poliéster, marca <i>Parker</i> .

^a: slm: litros estándar por minuto, condiciones de referencia de 20°C y 1013 mbar.

En las Tablas 5, 6 y 7 se describe la función específica de cada elemento del módulo de carga, módulo de control y módulo neumático, respectivamente.

Tabla 5. Función de los elementos del módulo de carga.

Componente	Función
Fuente de poder marca <i>Mean Well</i> de 450W.	Brinda el suministro energético a los elementos que requieran una corriente de 12 V.
Regulador de voltaje de corriente directa, modelo <i>LM2596</i> .	Brinda los 5 V que requiere el sensor de flujo y el módulo de relevadores para su funcionamiento.
Regulador de voltaje de corriente directa, modelo <i>XL4016</i> .	Brinda los 5 V que requiere el microprocesador raspberry pi 4 y la pantalla táctil para su funcionamiento.
Botón de encendido/apagado.	Enciende y apaga el sistema SMCA.
Conexión macho interlock y cable de corriente	Permite la conexión a la corriente eléctrica.
Cable calibre 12 AWG	Con este se realizan las conexiones eléctricas.

Tabla 6. Función de los elementos del módulo de control.

Componente	Función
Microprocesador: Raspberry pi 4 de 2 GB con carcasa, ventilador y memoria microSD.	Ejecuta los programas de control de apertura de válvulas, encendido y apagado de la bomba. En la memoria microSD se almacena el programa y se registran para cada cartucho muestreado los datos de tiempo, temperatura, humedad, presión y flujo.
Pantalla táctil de 7".	Permite la configuración y la visualización de la información que almacena el procesador.
Módulo de 8 relevadores de 5 V, modelo <i>SDR-05VDC-SL-C</i> .	Permite controlar a la Raspberry pi dispositivos de alto voltaje y corriente (válvulas solenoides y la bomba de vacío).
Dos Inversores lógicos, modelo <i>CD4049BE</i> .	Invierte la corriente que manda el microprocesador a los relevadores, debido a que los relevadores son normalmente abiertos.
S-01: sensor de presión, modelo <i>BME680</i> .	Mide la presión atmosférica, humedad y temperatura y envía los datos al microprocesador.
S-02: sensor de flujo másico de 0 a 20 slm, SENSIRION modelo <i>SFM4100</i>	Mide el flujo másico de aire que recorre el sistema y envía los datos al microprocesador. El cual calcula el flujo volumétrico resultante.

Tabla 7. Función de los elementos del módulo neumático.

Componente	Función
B-01/B-02: Minibomba de vacío para gases de 8 LPM de 12 V	Provee un flujo continuo de aire ambiente para saturar los cartuchos del sistema.
Válvulas solenoides normalmente cerradas ¼" de 12 V para gases.	Controlan la dirección del flujo en el sistema, lo que permiten que se sature un cartucho por periodo.
C-01~C-06: Cartuchos de sílica impregnados con 2,4-DNPH SEP – PAK marca <i>Waters</i> .	los carbonilos son atrapados en los cartuchos por la reacción con 2,4-DNPH, para que posteriormente serán cuantificados por HPLC.
F-01: Portafiltro de PTFE con filtro impregnado de KI	Funge como trampa para el O ₃ . Este es una opción sencilla y económica para evitar la interferencia por ozono de la cual hace mención el método.
R-01: Rotámetro de 0.5 a 5 LPM de aire, marca <i>Dwyer</i> , modelo <i>RMA-26-SSV</i>	Funge como controlador de flujo.
Conexiones tipo T, L y pasamuros de conexión rápida	Permite realizar los giros y conexiones que requiere la tubería.
Tubería de 6 y 8 mm de poliuretano poliéster.	Conecta el sistema neumático. La tubería de 8 mm se utiliza para realizar la conexión de los cartuchos al sistema, debido a que es más ancho uno de los lados.

2.1.3.-Especificaciones de los sensores.

El equipo cuenta con los sensores necesarios para medir el flujo de aire muestreado, la temperatura, humedad y presión ambiente.

Las especificaciones de los sensores se muestran en las Figuras 5 y 6.

▪ S-01: Sensor de presión, temperatura y humedad, BME680.



Figura 5. Sensor de presión, temperatura y humedad BME680 (Bosch Sensortec, 2022)

- Modelo: BME680.
- Rango de medición (presión): 300 ~ 1100 hPa.
- Resolución de presión: 0.18 hPa.
- Precisión de presión: ± 0.12 hPa.
- Rango de medición (temperatura): $-40 \sim +85$ °C.
- Precisión de la temperatura: ± 1 °C.
- Resolución de temperatura: 0.01 °C.
- Rango de medición (humedad): 0 ~ 100% RH.
- Precisión de la humedad: $\pm 3\%$ RH (25 °C).
- Resolución de humedad: 0.008% RH.

Este sensor mide las condiciones ambientales de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. Estas condiciones de muestreo son requeridas para el cálculo de la concentración.

▪ S-01: Sensor de flujo másico, modelo SFM4100-AIR.



Figura 6. Sensor de flujo másico, Sensirion SFM4100 (Sensirion AG, 2013).

- Marca: Sensirion.
- Modelo: SFM4100-AIR
- Rango de medición (flujo): 0 a 20 slm.
- Exactitud de la medición: $\pm 3\%$
- Temperatura de operación: $-40 \sim +80$ °C.
- Compatibilidad con: Aire y gases no corrosivos.
- Certificado de calibración: Anexo 4.- Certificado de calibración del sensor de flujo SFM4100 (Sensirion AG, 2023).

Con el valor del flujo másico medido por este sensor se calcula el flujo volumétrico (ec. (1))

(Sensirion AG, 2021).

$$\dot{V} = \frac{Q}{1 + C_{H_2O} \times d_v(T, RH)} \frac{101325}{p_{abs} - p_{H_2O}(T, RH)} \frac{T}{293.15} \quad (1)$$

Donde:

$\dot{V}$ flujo volumétrico en litros por minuto.

Q flujo másico en slm.

p_{abs} presión barométrica en Pa.

p_{H_2O} presión parcial del agua en Pa.

T temperatura del aire en K.

RH humedad relativa del aire.

d_v humedad absoluta en g/m³.

C_{H_2O} =0.002; experimentalmente se determinó que es alrededor de ~0.2% por g (H₂O)/m³ de humedad absoluta añadida.

La presión parcial se determina a partir de la ecuación (2) (Sensirion AG, 2021)

$$p_{H_2O} = \frac{RH}{100\%} A \cdot \exp\left(\frac{m \cdot T}{T_n + T}\right) \quad (2)$$

Donde:

p_{H_2O} presión parcial del agua en Pa.

RH humedad relativa del aire.

A 611.2 Pa

m 17.62

T temperatura del aire en °C.

T_n 243.12 °C.

La humedad absoluta se obtiene a partir de la presión parcial del agua y la temperatura con la ecuación (3) (Sensirion AG, 2021).

$$d_v(T, RH) = 2.167 \left[\frac{p_{H_2O}}{273.15 + T} \right] \quad (3)$$

Donde:

d_v humedad absoluta en g/m³.

T temperatura del aire en °C.

RH humedad relativa del aire.

p_{H_2O} presión parcial del agua en hPa.

Estos cálculos los realiza el microprocesador, por lo que el sistema presenta el resultado del flujo volumétrico calculado, requerido para la determinación de las concentraciones de los carbonilos en el aire.

2.1.4.-Construcción y montaje.

El sistema fue ensamblado en el taller de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos del ICAyCC-UNAM. Para lo cual se diseñó y construyó una carcasa con las dimensiones indicadas en la Figura 7 y Figura 8. La carcasa está construida de lámina de Aluminio calibre 12 y está conformada de:

- A) Tapa superior
- B) Base
- C) Base interna de la carcasa.
- D) Tapa delantera
- E) Tapa trasera

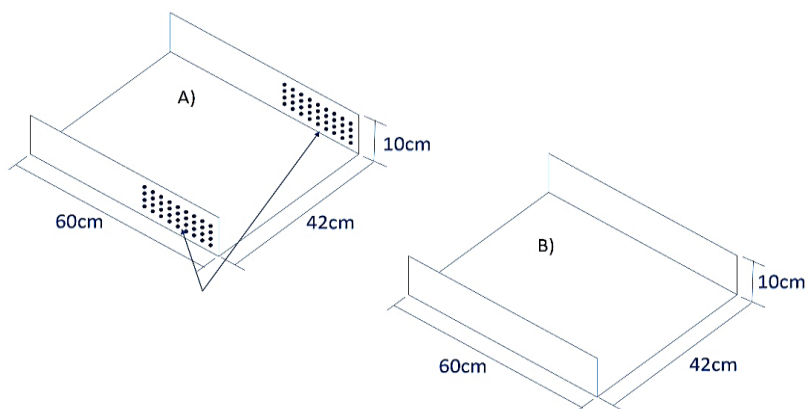


Figura 7. Tapa superior y base de la carcasa.

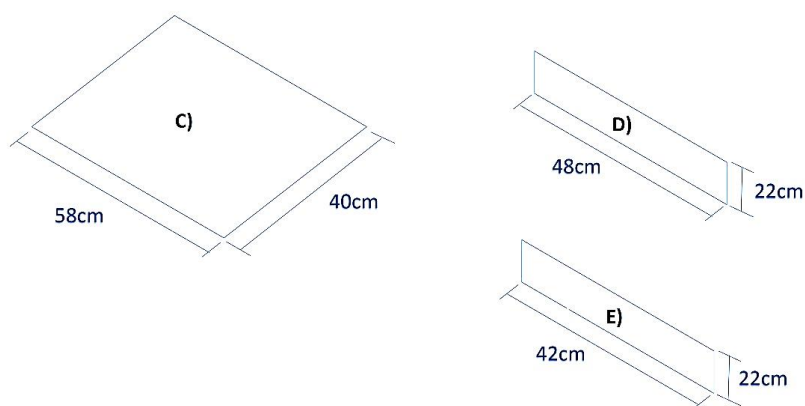


Figura 8. Base interna, tapa delantera y trasera de la carcasa.

En la Figura 9 se muestra la tapa delantera del sistema, en la cual se encuentra montada la pantalla que permite la configuración del sistema y muestra los datos de temperatura, presión, humedad y flujo; el capuchón blanco contiene el sensor de presión, humedad y temperatura. Del lado izquierdo de la Figura 9 están las conexiones a las cuales se montan los cartuchos. Estas conexiones permiten el montaje y desmontado de los cartuchos de muestreo de forma rápida sin tener que abrir el sistema.



Figura 9. SMCA, vista delantera.

Por la parte trasera (Figura 10) el sistema cuenta con un ventilador para disipar el calor generado por las válvulas solenoides y las minibombas de vacío. También cuenta con el puerto a la corriente eléctrica, botón de encendido/apagado, puerto ethernet y puertos USB para conectarse al microprocesador. En el lado izquierdo de la Figura 10, se tiene el controlador de flujo y la entrada del flujo de aire, conectada al portafiltro.



Figura 10. SMCA, vista trasera.

En la base interna (C. de la Figura 8) de la carcasa se montan los tres módulos (Figura 11). Está base se coloca en el interior de la carcasa. En esta figura se puede observar que la salida del aire se encuentra en la parte derecha de la carcasa, a un lateral de raspberry pi.

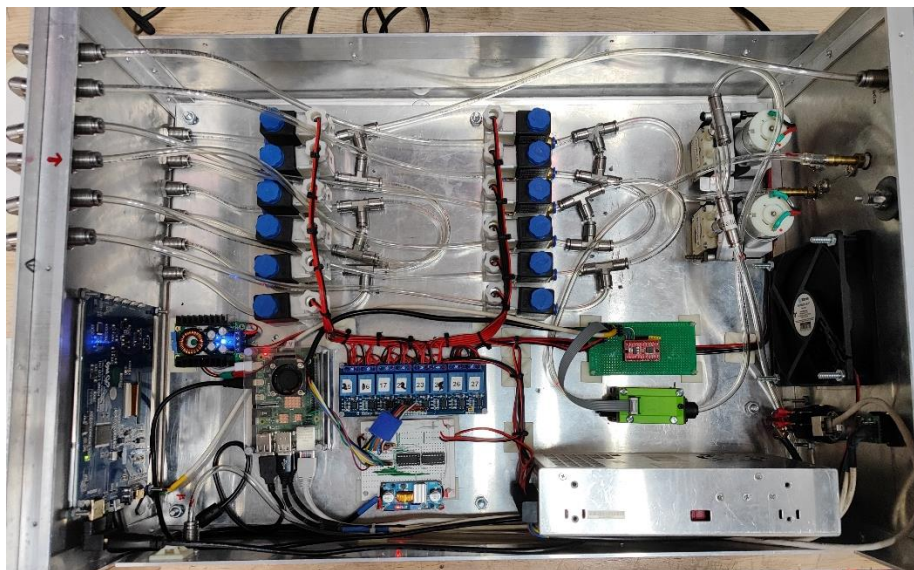


Figura 11. Interior del SMCA.

Las especificaciones del sistema se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones del SMCA

Especificaciones	
Dimensiones	60×42×20 cm
Peso aproximado	8 kg
Corriente requerida	120 V
Tiempo de muestreo	8 h
No. de cartuchos máximo	6

2.1.5.-Prueba de hermeticidad y comprobación de flujo.

Se realiza una prueba de hermeticidad al equipo construido, conectando las bombas del equipo de tal forma que la presión sea positiva, se coloca espuma, generada con jabón de uso común, en las conexiones y se encienden las bombas. Se observa la formación de burbujas en las conexiones, se determina el origen y se procede a colocar cinta teflón en las conexiones de rosca y a recortar la manguera en las conexiones de acoplamiento rápido. Posteriormente se repite la prueba para comprobar el correcto remontaje de la sección.

Corroborada la hermeticidad del equipo construido, se procede a comprobar el flujo volumétrico calculado, determinado a partir del flujo másico otorgado por el sensor de flujo másico SFM4100. Para ella se conecta un calibrador de flujo Sensydine-Gilian Gilibrator II, con rango de medición de 20 cm³/min a 6 LPM (Figura 12).

Con ello se comprobó que el flujo volumétrico determinado concuerda con el flujo real que es muestreado por los cartuchos.



Figura 12. Calibrador de flujo Sensydine-Gilian Gilibrator II.

2.2-Desarrollo del guion experimental

Para la comprobación del correcto funcionamiento del equipo SMCA se realiza una prueba piloto durante un periodo de 12 horas, con un flujo volumétrico promedio de 3.29 L/min.

2.2.1.-Prueba piloto

Se realizó una prueba piloto el día 8 de febrero del 2024 en la azotea del ICAyCC (Figura 13) con la finalidad de comprobar el funcionamiento de los elementos neumáticos, así como de la electrónica y la programación.



Figura 13. Muestreo de carbonilos con el equipo SMCA en la azotea del ICAyCC.

La prueba piloto consistió en un muestreo con un periodo total de monitoreo de las 8:00 a 19:45 h, que abarcan los intervalos de muestreo (105 min) indicados en la Tabla 9.

Tabla 9. Periodos y horario de muestreo.

Periodo total de muestreo	8:00 a 19:45 h
1er periodo	8:00 a 9:45 h
2do periodo	10:00 a 11:45 h
3er periodo	12:00 a 13:45 h
4to periodo	14:00 a 15:45 h
5to periodo	16:00 a 17:45 h
6to periodo	18:00 a 19:45 h

Una vez realizado el muestreo los cartuchos son refrigerados para su posterior análisis. Junto a los cartuchos usados se almacena un cartucho sin utilizar que fungirá como blanco.

2.2.2.-Análisis de la muestra.

Una vez realizado el muestreo, los carbonilos son retenidos en los cartuchos mediante la reacción con la DNPH formando hidrazonas derivadas. Estas hidrazonas son extraídas de los cartuchos para su posterior análisis por HPLC.

Previo a su análisis se realiza la extracción de las muestras de los cartuchos. Se inyectan 3 mL de acetonitrilo a un flujo de 3 mL/min, recolectando el eluato en un matraz aforado de 5 mL (Figura 14). Finalmente, se lleva a aforo con el mismo disolvente.

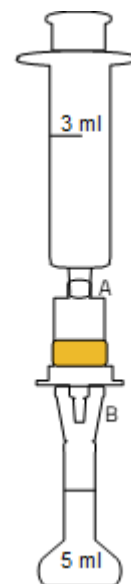


Figura 14. Colocación del matraz aforado, cartucho y jeringa para extracción.

Realizada la extracción se inyecta la muestra por duplicado, incluyendo el blanco, en un equipo Shimadzu (Figura 15) con las condiciones cromatográficas citadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Condiciones de la técnica analítica.

Parámetro	Característica
Columna	Fase reversa, ACE5 18, 5 μ m, 25 cm $\times$ 4.6 mm I. D
No. Serie	A151544
Fase móvil	Acetonitrilo/Agua (60/40 %)
Flujo	2 mL/ min
Longitud de onda	360 nm
Elución	Isocrática
Detector	UV-visible, SHIMADZU SPD-20 AV
Bomba	SHIMADZU LC 20AD
Inyección	20 μ L
Duración de corrida	19 min

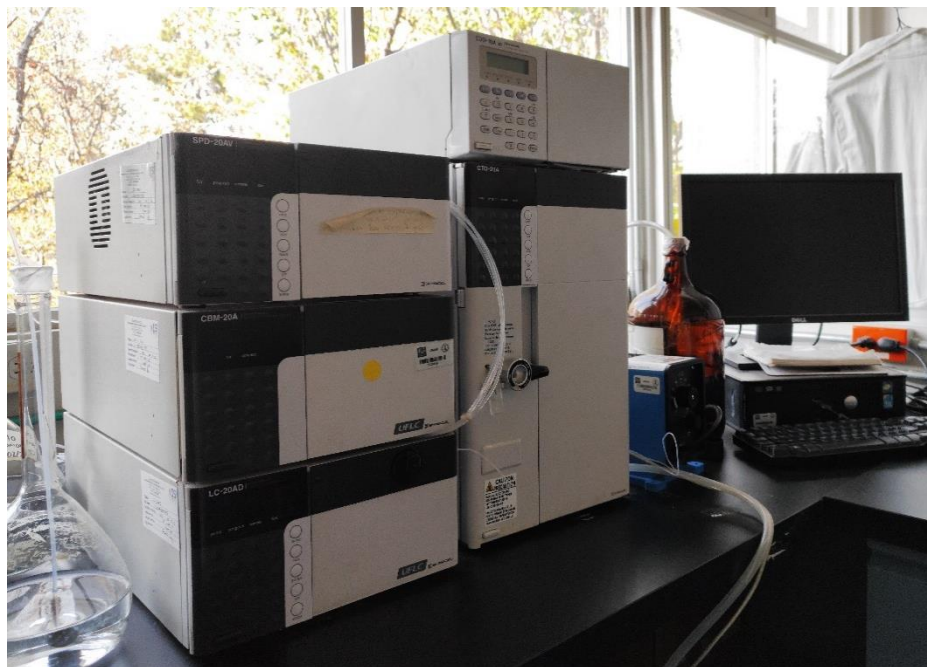


Figura 15. Cromatógrafo HPLC Shimadzu

Una vez realizada la corrida, se integra en el sistema del cromatógrafo y se determina la concentración de los carbonilos capturados utilizando la curva de calibración (Anexo 2.- Curvas de calibración) que se obtienen de un trabajo paralelo a este. Con ello se realizan los reportes de las muestras analizadas con la concentración de los carbonilos capturados.

2.2.3.-Memoria de cálculo.

Para poder determinar la concentración de los carbonilos en el aire es necesario calcular la masa capturada del contaminante en los cartuchos con la ecuación (4).

$$masa\ capturada_i = (C_m - C_b) \times V_{ext} \times 1000 \quad (4)$$

Donde: $masa\ capturada_i$, es la masa de carbonilo capturado, en ng.

C_m , es la concentración de carbonilo obtenido del HPLC, en ppm.

C_b , es la concentración de carbonilo en el blanco, en ppm.

V_{ext} , es el volumen de extracción que se utiliza en el cartucho, en mL.

En el anexo 2, se muestran los cromatogramas obtenidos del análisis de las muestras obtenidas de la prueba piloto.

En la Tabla 11 se presentan los valores requeridos para obtener la masa capturada de los contaminantes.

Tabla 11. Valores requeridos para calcular la masa capturada de contaminante.

C_{formaldehído}	C_{blanco}	V_{extracción}
[ppm]	[ppm]	[mL]
0.234	0.000*	5

*Las concentraciones en los blancos no son detectadas en el HPLC, por lo que se consideran como nulas.

Sustituyendo los valores en la ecuación (4), considerando que $ppm [=] \mu g/mL$.

$$masa\ capturada_{formaldehído} = (0.234 - 0.000) \left[\frac{\mu g}{mL} \right] \times 5 [mL] \times 10^3 \left[\frac{ng}{\mu g} \right]$$

$$masa\ capturada_{formaldehído} = 1170.0 [ng]$$

Para calcular el volumen muestreado (ecuación (5)).

$$V_m = F \times t \times 10^{-3} \quad (5)$$

Donde: V_m , es el volumen muestreado, en m^3 .

F , es el flujo muestreado medido por el sensor de flujo, en L/min (3.3 L/min).

t , es el tiempo de muestreo, en min (105 min).

$$V_m = 3.3 \left[\frac{L}{min} \right] \times 105 [min] \times 10^{-3} \left[\frac{m^3}{L} \right]$$

$$V_m = 0.346 [m^3]$$

En la ecuación (6) se calcula el volumen a condiciones de referencia a partir del volumen muestreado (Lodge, 1989).

$$V_r = V_m \times \frac{P}{T} \times 2.94 \quad (6)$$

Donde: V_r , es el volumen a condiciones de referencia, en m^3 .

V_m , es volumen muestreado, en m^3 .

P , es la presión en el sitio de muestreo, en kPa (77.69 kPa).

T , es la temperatura del aire en el sitio de muestreo, en K (289.03 K).

Y la constante es la relación de la temperatura de referencia, 298 K, a la presión de referencia, 101.3 kPa.

$$V_r = 0.346 [m^3] \times \frac{77.69 [kPa]}{289.03 [K]} \times 2.94 \left[\frac{K}{kPa} \right]$$

$$V_r = 0.273 [m^3]$$

La ecuación (7) se utiliza para determinar la concentración de los carbonilos en el aire (Lodge, 1989).

$$CMA_i = \frac{masa\ capturada_i}{V_r} \times \frac{0.0245}{M_{DNPH}} \quad (7)$$

Donde: CMA_i , es la concentración medida en el ambiente laboral del contaminante i , en ppb.

$masa\ capturada_i$, es la masa de carbonilo capturado, en ng.

V_r , es el volumen muestreado a condiciones de referencia, en m^3 .

M_{DNPH} , es la masa molar del carbonilo derivatizado, en g/mol.

$$M_{DNPH} = M_i + 180$$

M_i , es la masa molar del carbonilo, en g/mol (30.03 g/mol para formaldehído).

$$CMA_{formadehído} = \frac{1170.0 [ng]}{0.273[m^3]} \times \frac{0.0246[g/mol]}{(30.03 + 180)[g/mol]}$$

$$CMA_{formaldehído} = 0.5 [ppb_v]$$

Y como $1 ppm_v = 1000 ppb_v$

$$CMA_{formaldehído} = 5 \times 10^{-4} [ppm_v]$$

En el protocolo experimental desarrollado, tras el cálculo de las CMA de los carbonilos los alumnos calcularán las concentraciones promedio ponderadas en el tiempo de los seis contaminantes como se indica en la ecuación (8) (STPS, 2014).

$$CMA - PTT = \frac{\sum_{i=1}^n CMA_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{(CMA_1 t_1) + (CMA_2 t_2) + \dots + (CMA_n t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8)$$

Donde CMA_i , es la concentración i esima del contaminante en el ambiente laboral durante el tiempo determinado, siempre en mg/m³ o en ppm y t_i , es el tiempo i esimo, utilizado en cada toma de muestra, siempre en la misma unidad de tiempo.

El algoritmo de cálculo para determinar la CMA-PPT_{formaldehído} se muestra a continuación, considerando 6 periodos de 105 minutos y con las concentraciones indicadas en la Tabla 19:

$$CMA - PTT_{formaldehído} = \frac{(3.92 \times 10^{-4} * 105) + (3.76 \times 10^{-4} * 105) + (7.65 \times 10^{-4} * 105) + (4.20 \times 10^{-4} * 105) + (4.38 \times 10^{-4} * 105) + (2.82 \times 10^{-4} * 105)}{105 + 105 + 105 + 105 + 105 + 105}$$

$$CMA - PPT_{formaldehído} = 4.45 \times 10^{-4} ppm_v$$

Una vez determinadas las concentraciones de los contaminantes obtenidas del muestreo de la prueba piloto, se desarrolla el guion experimental titulado: "Muestreo y cuantificación de contaminantes tóxicos en fase gas en un ambiente laboral." que se encuentra en el Anexo 1.- Guion experimental.

Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados

3.1.- Prueba Piloto del SMCA

Finalizado el montaje del equipo SMCA se realizaron pruebas de hermeticidad para comprobar que no existieran fugas de aire en las conexiones del módulo neumático. Las fugas encontradas se eliminaban cambiando la tubería y comprobando el correcto ensamblado de las conexiones. Así mismo, se comprobó la medición del flujo másico obtenida del sensor con un calibrador de flujo de burbuja. Posteriormente se realizó el muestreo.

Durante la prueba piloto se miden y registran los datos promedio de las condiciones experimentales de presión, temperatura, porcentaje de humedad relativa y flujo volumétrico, para cada periodo de muestreo (Tabla 12). A partir de estas condiciones se determina el volumen de muestreo a condiciones de referencia (298 K, 101.3 kPa). El volumen calculado en la Tabla 12 es un valor requerido para el cálculo de las concentraciones en aire de los compuestos muestreados.

Tabla 12. Condiciones experimentales de muestreo.

No.	Tiempo [min]	Temperatura promedio [°C]	Presión [hPa]	Flujo volumétrico [L/min]	V _m [m³]	V _r [m³]
1	105.00	15.88	779.12	4.10	0.431	0.340
2	105.00	21.77	779.34	3.14	0.330	0.255
3	105.00	26.89	777.46	2.76	0.290	0.221
4	105.00	31.25	775.16	2.74	0.288	0.216
5	105.00	30.92	774.28	2.91	0.306	0.230
6	105.00	25.5	775.04	2.87	0.301	0.230

A lo largo de la prueba piloto, se muestrearon 6 cartuchos, con periodos de muestreo de 105 minutos. Durante esta prueba piloto no se presentaron problemas en el módulo neumático, el programa funcionó correctamente tanto en la apertura y cierre de las válvulas solenoides, así como en el encendido y apagado de las minibombas de vacío y la recopilación de datos otorgados por los sensores.

Una vez finalizado el muestreo, se determinan las concentraciones de los contaminantes en el aire.

3.2.- Cuantificación de concentraciones en aire

A partir del método analítico se obtienen las concentraciones de los contaminantes en el aire.

De los 13 compuestos carbonilos que la técnica puede determinar, se elige, para el fin educativo de la práctica, utilizar los primeros seis debido a que como su tiempo de retención es corto los picos en el cromatograma están bien definidos (Anexo 3.- Reportes de los cromatogramas de la prueba piloto.), además de que los primeros cuatro (formaldehído, acetaldehído, acroleína y acetona) son los carbonilos más abundantes en el ambiente laboral (Carlier et al., 1986; Qian et al., 2019; Zhang et al., 2023).

Las concentraciones de estos carbonilos se presentan de la Tabla 13 a la Tabla 18.

Tabla 13. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del formaldehído.

No.	C _m [ppm]	Masa capturada[ng]	C [ppb _v]	C _{prom} [ppm _v]
1	0.234	1170	0.401	3.92x10 ⁻⁴
	0.223	1115	0.382	
2	0.167	835	0.381	3.76 x10 ⁻⁴
	0.166	830	0.371	
3	0.292	1460	0.772	7.65 x10 ⁻⁴
	0.287	1435	0.758	
4	0.156	780	0.421	4.20 x10 ⁻⁴
	0.155	775	0.419	
5	0.172	860	0.437	4.38 x10 ⁻⁴
	0.173	865	0.439	
6	0.111	555	0.281	2.82 x10 ⁻⁴
	0.112	560	0.283	

Tabla 14. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del acetaldehído.

No.	C _m [ppm]	Masa capturada[ng]	C [ppb _v]	C _{prom} [ppm _v]
1	0.220	1100	0.353	3.54 x10 ⁻⁴
	0.221	1105	0.355	
2	0.165	825	0.353	3.48 x10 ⁻⁴
	0.164	820	0.344	
3	0.315	1575	0.780	7.73 x10 ⁻⁴
	0.309	1545	0.765	
4	0.142	710	0.359	3.59 x10 ⁻⁴
	0.142	710	0.359	
5	0.075	375	0.179	1.80 x10 ⁻⁴
	0.076	380	0.181	
6	0.089	445	0.211	2.11 x10 ⁻⁴
	0.089	445	0.211	

Tabla 15. Valores necesarios para el cálculo de la CMA de la acroleína.

No.	C _m [ppm]	Masa capturada[ng]	C [ppb _v]	C [ppb _v] prom
1	0.169	845	0.258	2.59 x10 ⁻⁴
	0.171	855	0.261	
2	0.150	750	0.305	3.01 x10 ⁻⁴
	0.149	745	0.296	
3	0.279	1395	0.656	6.50 x10 ⁻⁴
	0.274	1370	0.644	
4	0.152	760	0.365	3.64 x10 ⁻⁴
	0.151	755	0.363	
5	0.111	555	0.251	2.52 x10 ⁻⁴
	0.112	560	0.253	
6	0.113	565	0.254	2.54 x10 ⁻⁴
	0.113	565	0.254	

Tabla 16. Valores necesarios para el cálculo de la CMA de la acetona.

No.	C _m [ppm]	Masa capturada[ng]	C [ppb _v]	C _{prom} [ppm _v]
1	0.043	215	0.065	0.65 x10 ⁻⁴
	0.043	215	0.065	
2	0.037	185	0.075	0.74 x10 ⁻⁴
	0.037	185	0.073	
3	0.072	360	0.168	1.67 x10 ⁻⁴
	0.071	355	0.166	
4	0.032	160	0.076	0.76 x10 ⁻⁴
	0.032	160	0.076	
5	0.020	100	0.045	0.45 x10 ⁻⁴
	0.020	100	0.045	
6	0.021	105	0.047	0.47 x10 ⁻⁴
	0.021	105	0.047	

Tabla 17. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del propionaldehído.

No.	C _m [ppm]	Masa capturada[ng]	C [ppb _v]	C _{prom} [ppm _v]
1	0.015	75	0.023	0.23 x10 ⁻⁴
	0.015	75	0.023	
2	0.015	75	0.030	0.29 x10 ⁻⁴
	0.014	70	0.028	
3	0.024	120	0.056	0.56 x10 ⁻⁴
	0.024	120	0.056	
4	0.015	75	0.036	0.36 x10 ⁻⁴
	0.015	75	0.036	
5	0.011	55	0.025	0.25 x10 ⁻⁴
	0.011	55	0.025	
6	0.013	65	0.029	0.29 x10 ⁻⁴
	0.013	65	0.029	

Tabla 18. Valores necesarios para el cálculo de la CMA del crotonaldehído.

No.	C _m [ppm]	Masa capturada[ng]	C [ppb _v]	C _{prom} [ppb _v]
1	0.038	190	0.055	0.55 x10 ⁻⁴
	0.038	190	0.055	
2	0.036	180	0.069	0.69 x10 ⁻⁴
	0.037	185	0.069	
3	0.079	395	0.175	1.74 x10 ⁻⁴
	0.078	390	0.173	
4	0.037	185	0.084	0.84 x10 ⁻⁴
	0.037	185	0.084	
5	0.024	120	0.051	0.51 x10 ⁻⁴
	0.024	120	0.051	
6	0.026	130	0.055	0.55 x10 ⁻⁴
	0.026	130	0.055	

Se condensan las concentraciones para cada contaminante por periodo de muestreo en la Tabla 19.

Tabla 19. CMA determinadas durante la prueba piloto.

Periodo	CMA [ppm _v x 10 ⁻⁴]					
	Formaldehído	Acetaldehído	Acroleína	Acetona	Propionaldehído	Crotonaldehído
8:00-9:45	3.92	3.54	2.59	0.65	0.23	0.55
10:00-11:45	3.76	3.48	3.01	0.74	0.29	0.69
12:00-13:45	7.65	7.73	6.50	1.67	0.56	1.74
14:00-15:45	4.20	3.59	3.64	0.76	0.36	0.84
16:00-17:45	4.38	1.80	2.52	0.45	0.25	0.51
18:00-19:45	2.82	2.11	2.54	0.47	0.29	0.55

A partir de los valores de las CMA se calculan las CMA-PPT para cada carbonilo (Tabla 20) como se haría en la práctica experimental.

Tabla 20. CMA-PPT de los carbonilos estudiados.

CMA-PPT [ppm _v x 10 ⁻⁴]					
Formaldehído	Acetaldehído	Acroleína	Acetona	Propionaldehído	Crotonaldehído
4.45	3.71	3.47	0.79	0.33	0.81

3.2.- Análisis de resultados

A través de la prueba de hermeticidad y corroboración del flujo, se comprobó la correcta construcción del sistema, mientras que, a través de la prueba piloto, se comprobó el correcto funcionamiento del programa escrito en lenguaje Python: realizando la apertura de las válvulas correspondientes en los periodos indicados, manteniendo un flujo de aire y recopilando los datos de los sensores. Por lo anterior se logró analizar por HLPC los cartuchos muestreados y se calcularon las CMA del muestreo piloto.

Las concentraciones indicadas en la Tabla 19 muestran una variación durante el periodo de muestreo, lo que nos indica que el método implementado en el sistema de muestreo SMCA tiene la sensibilidad requerida para muestrear concentraciones que son variables a lo largo de un periodo de muestreo de 8 horas.

Los valores de CMA-PPT determinados (Tabla 20) no se pueden comparar a los VLE indicados por la norma NOM-010-STPS-2014 debido a que la prueba piloto se realizó en ambiente. Por lo que en trabajos futuros se deben realizar más pruebas piloto, en espacios determinados para realizar la práctica de laboratorio.

En el Anexo I se presenta el guion experimental desarrollado en este presente trabajo, el cual es propuesto para la asignatura optativa disciplinaria de Protección Ambiental I (0273)

Capítulo 4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos, se lograron cumplir los objetivos generales y particulares, ya que se logró desarrollar el guion experimental para la asignatura optativa disciplinaria de Protección Ambiental I (0273) de la licenciatura de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM.

El sistema de muestreo construido permite realizar prácticas ambientales que involucren la captura y posterior análisis de compuestos carbonilos, comprobándose su correcta construcción y funcionamiento a través de pruebas de hermeticidad, corroboración del flujo y prueba piloto. A partir del análisis por cromatografía HPLC y con las condiciones de temperatura, humedad y presión medidos por los sensores del equipo, se determinaron las concentraciones de los contaminantes. Estas concentraciones no se pueden comparar con la normativa ambiental vigente debido a que este muestreo es ambiente, por lo que se debe realizar muestreos en los espacios asignados para realizar la práctica experimental.

El método implementado en el sistema de muestreo SMCA tiene la sensibilidad requerida para muestrear concentraciones que son variables a lo largo de un periodo de muestreo de 8 horas.

Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [USEPA]. (1999). *Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air Second Edition Compendium Method TO-11A Determination of Formaldehyde in Ambient Air Using Adsorbent Cartridge Followed by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) [Active Sampling Methodology]*.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermadades [ATSDR]. (2019, abril 11). *Curso de Toxicología Para Comunidades*. ATSDR en Español.
- Anand, S. S., & Mehendale, H. M. (2005). Volatile Organic Compounds (VOC). En *Encyclopedia of Toxicology* (Second, pp. 450–455). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369400-0/01015-2>
- Anand, S. S., Philip, B. K., Mehendale, H. M., Katsikantami, I., & Tzatzarakis, M. N. (2014). Volatile Organic Compounds. En *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (pp. 967–970). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00358-4>
- Bernabe, D. P., Herrera, R. A. S., Doma Jr., B. T., Fu, M.-L., Dong, Y., & Wang, Y.-F. (2015). Adsorption of Low Concentration Formaldehyde in Air Using Ethylene-Diamine-Modified Diatomaceous Earth. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(4), 1652–1661. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0292>
- Bosch Sensortec. (2022). *BME680 Low power gas, pressure, temperatura & humidity sensor*. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf>
- Carlier, P., Hannachi, H., & Mouvier, G. (1986). The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere—A review. *Atmospheric Environment* (1967), 20(11), 2079–2099. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90304-5](https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90304-5)
- Health and Safety Executive [HSE]. (2010). *MDHS 102 - Aldehydes in air*.

- Health and Safety Executive [HSE]. (2020). *EH40/2005 Workplace exposure limits. Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (as amended)*. TSO.
- Hernández Castro, M. G. (2018). *Determinación de carbonilos en la atmósfera por cromatografía de gases de líquidos, durante el periodo de contingencias ambientales del 2016 en la Ciudad de México*. [Tesis de Licenciatura]. UNAM.
- He, Z., Zhang, X., Li, Y., Zhong, X., Li, H., Gao, R., & Li, J. (2020). Characterizing carbonyl compounds and their sources in Fuzhou ambient air, southeast of China. *PeerJ*, 8, e10227. <https://doi.org/10.7717/peerj.10227>
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST]. (2022). *Límites de exposición profesional para agentes químicos en España, 2022*.
- International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2006). *Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. (Vol. 88). International Agency for Research on Cancer.
- International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2021). *Acrolein, Crotonaldehyde and Arecoline IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans* (Vol. 128).
- Kim, K.-H., Hong, Y.-J., Pal, R., Jeon, E.-C., Koo, Y.-S., & Sunwoo, Y. (2008). Investigation of carbonyl compounds in air from various industrial emission sources. *Chemosphere*, 70(5), 807–820. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.025>
- Lodge, Jr. (1989). *Methods of Air Sampling and Analysis* (J. P. Lodge, Ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203747407>
- Lü, H., Tian, J.-J., Cai, Q.-Y., Wen, S., Liu, Y., & Li, N. (2016). Levels and Health Risk of Carbonyl Compounds in Air of the Library in Guangzhou, South China. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(5), 1234–1243. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.09.0533>
- Lui, K.-H., Dai, W.-T., Chan, C.-S., Tian, L., Ning, B.-F., Zhou, Y., Song, X., Wang, B., Li, J., Cao, J.-J., Lee, S.-C., & Ho, K.-F. (2017). Cancer risk from gaseous carbonyl compounds in indoor

- environment generated from household coal combustion in Xuanwei, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(21), 17500–17510. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9223-y>
- Mcmurry, J. (2010). *Organic Chemistry: Vol. 8 ed.* CENGAGE Learning.
- National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH]. (2003). Aliphatic aldehydes 2018. En *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*.
- National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH]. (2007). *NIOSH POCKET GUIDE TO CHEMICAL HAZARDS*. Departament of Health and Human Services.
<http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>
- Occupational Safety and Health Administration [OSHA]. (2023). *Occupational Chemical Database*. U.S. Departament of Labor . <https://www.osha.gov/chemicaldata>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2023, diciembre 15). *Contaminación del aire doméstico*. OMS. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health#:~:text=Se%20ha%20calculado%20que%2C%20en,de%20muertes%20prematuras%20cada%20a%C3%B1o>.
- Popendorf, W. (2019). *Industrial Hygiene Control of Airborne Chemical Hazards* (2a ed.). CRC Press.
- Potapov, V. M., & Tatarinchik, S. N. (1983). *Química orgánica* (2a ed.). Editorial MIR.
- Qian, X., Shen, H., & Chen, Z. (2019). Characterizing summer and winter carbonyl compounds in Beijing atmosphere. *Atmospheric Environment*, 214, 116845.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116845>
- Secretaria del Trabajo y Previsión Social [STPS]. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-010-STPS-2014, Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral-Reconocimiento, evaluación y control. *Diario Oficial de la Federación*.
- Sensirion AG. (2013). *SFM4 100 Series Low-cost Digital Mass Flow Meter for Gases*.
<https://www.sensirion.com/resource/datasheet/sfm4100>

Sensirion AG. (2021). *Reference and Flow Conversions*.

https://www.sensirion.com/resource/application_note/sfm/reference_flow_conversions

Sensirion AG. (2023). *Calibration Certification – Gas Flow Sensors*.

https://www.sensirion.com/resource/certificate/gas_flow

Sigma-Aldrich. (2020). *Certificate of Analysis TO11/IP-6A Aldehyde/Ketone-DNPH Mix*.

<https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/supelco/crm4m7285>

Snyder, L. R., & Kirkland, J. J. (Joseph J. (1979). *Introduction to modern liquid chromatography*.

Wiley.

United States Environmental Protection Agency [USEPA]. (2023, marzo 14). *Calidad del aire interior. Acerca de los contaminantes del aire en interiores y sus fuentes*. USEPA.

<https://espanol.epa.gov/cai/acerca-de-los-contaminantes-del-aire-en-interiores-y-sus-fuentes>

Wang, B., Lee, S. C., & Ho, K. F. (2007). Characteristics of carbonyls: Concentrations and source strengths for indoor and outdoor residential microenvironments in China. *Atmospheric Environment*, 41(13), 2851–2861. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.039>

Waters. (2009). *Waters sep-pak DNPH-silica cartridge*.

Weng, M., Zhu, L., Yang, K., & Chen, S. (2010). Levels, sources, and health risks of carbonyls in residential indoor air in Hangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163(1–4), 573–581. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0859-z>

Zhang, W., Bai, Z., Shi, L., Son, J. H., Li, L., Wang, L., & Chen, J. (2023). Investigating aldehyde and ketone compounds produced from indoor cooking emissions and assessing their health risk to human beings. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 389–398.

<https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.05.033>

Anexos

Anexo 1.- Guion experimental

GUION

Muestreo y cuantificación de contaminantes tóxicos en fase gas en un ambiente laboral.

Problema: Determinar la concentración de carbonilos presentes en un ambiente laboral establecido, utilizando un sistema semiautomático de muestreo y comparando los resultados con la normativa laboral aplicable.

Objetivo académico: El alumno será capaz de configurar un sistema semiautomático de muestreo para la captura y cuantificación de la concentración de carbonilos en un ambiente laboral, siendo estos compuestos objeto de monitoreo por sus implicaciones en la salud. Y con ello determinar si cumple con el límite de exposición permitido por la normativa laboral aplicable.

Introducción.

La higiene industrial se dedica a la anticipación, reconocimiento, evaluación y control de los factores ambientales existentes en el ambiente laboral, los cuales causan enfermedad, deterioro de la salud, incomodidad significativa o ineficiencia entre los trabajadores y ciudadanos en general. Esto con el fin de proteger la seguridad de los trabajadores, es decir, prevenir accidentes y enfermedades relacionadas a la actividad laboral (Popendorf, 2019).

Existen diversos contaminantes químicos en un ambiente laboral, entre ellos los carbonilos que forman parte de los compuestos orgánicos volátiles, y se clasifican en aldehídos y cetonas dependiendo de la posición del grupo funcional ($C=O$).

Estos compuestos provienen de emisiones generadas en industrias y de productos usados en diversas actividades (Sousa et al., 2015). Su importancia reside en el impacto negativo que causan

a la salud humana en ambientes interiores y el potencial fotoquímico por ser precursores de ozono troposférico en la atmósfera. Los carbonilos deben ser monitoreados en ambientes laborales debido a que una gran cantidad de ellos generan irritación y toxicidad en la salud humana; y en altas concentraciones con largos periodos de exposición, generan mareos, náuseas y otros síntomas (NIOSH, 2007).

El ambiente laboral es el espacio en el que los trabajadores realizan sus actividades y se debe asegurar que esté libre de contaminantes que puedan afectar su salud. En México, la normativa que regula los contaminantes en un ambiente laboral es la Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-2014. La cual establece los criterios para el reconocimiento, evaluación y control de los agentes químicos contaminantes presentes en el ambiente laboral, el cual es definido como el conjunto de elementos físicos, químicos y biológicos presentes en el centro de trabajo (STPS, 2014). Mantener un ambiente laboral sano y seguro es una responsabilidad del patrón y una obligación legal que beneficia a trabajadores y empresas, ya que se anticipa a los riesgos de salud, reduciendo los costos en términos de atención médica, así como generando un aumento de la productividad y satisfacción de los trabajadores.

Materiales y reactivos

Materiales	Reactivos	Equipos
• 7 cartuchos de sílica impregnados con 2,4-DNPH SEP-PAK marca Waters. Con su respectiva bolsa metalizada. • 1 filtro de celulosa de 47 mm de diámetro. • 1 pinza de disección. • 2 cajas Petri. • 1 vaso de precipitado de 10 mL. • 1 probeta de 10 mL.	• Yoduro de potasio. • Agua destilada.	• Sistema de muestreo de carbonilos (SMCA).

Glosario

- ACN: acetonitrilo.
- CMA: concentración media en ambiente laboral.
- CMA-PPT: concentración promedio ponderada en tiempo.
- COV's: compuestos orgánicos volátiles.
- DNPH: 2,4-Dinitrofenilhidrazina.
- HPLC: cromatografía de líquidos de alta eficiencia.
- LIQ: laboratorio de Ingeniería Química.
- SMCA: sistema semiautomático de muestreo de carbonilos.
- VLE: valor límite de exposición.
- VLE-CT: valor límite de exposición de corto tiempo.
- VLE-P: valor límite de exposición pico.

Desarrollo experimental

El muestreo de carbonilos en la presente actividad experimental se realizará utilizando el Sistema de Muestreo de Carbonilos (SMCA) empleando un cartucho impregnado con 2,4-Dinitrofenilhidrazina (DNPH) para cada periodo realizado. El sistema de muestreo cuenta con 6 cartuchos y por cada cartucho se pasará un flujo de aire durante una hora con 20 minutos, lo que nos da un muestreo de ocho horas.

En los cartuchos los carbonilos reaccionan con la DNPH obteniendo hidrazonas derivadas (Figura 1). Los carbonilos derivatizados son extraídos y analizados por cromatografía de líquidos (HPLC), para la posterior determinación de la concentración de los compuestos en el aire muestreado.

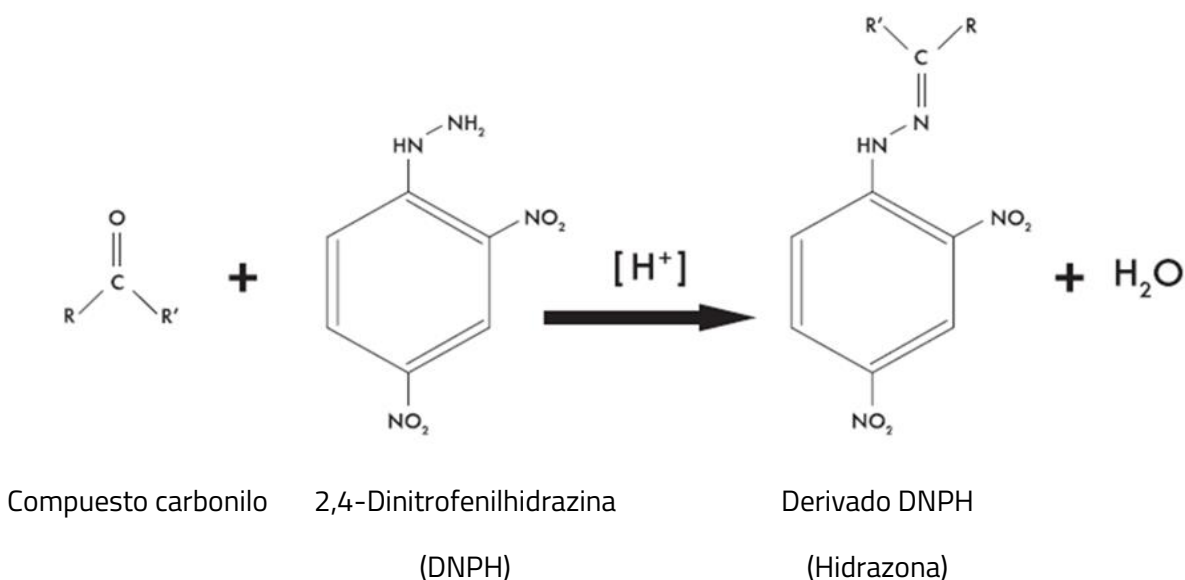


Figura 1. Reacción de derivatización de compuestos carbonílicos (Waters, 2009)

PARTE A: Muestreo

A) Preparación de filtro impregnado de yoduro de potasio (KI).

Preparar un filtro impregnado de KI mediante el mezclado de agua con KI e impregnación en una caja petri.

1. Disolver 0.5 g de KI con 5 mL de agua destilada en un vaso de precipitado de 10 mL, agitar hasta homogenizar.
2. Verter la disolución en una caja Petri y, con ayuda de unas pinzas, sumergir un filtro. Retirar el filtro y escurrirlo ligeramente.
3. Colocar el filtro impregnado en una caja Petri seca.

B) Colocación de cartuchos y filtro de KI en el equipo de muestreo (SMCA).

1. Retirar los cartuchos de protección colocados en la parte delantera del sistema jalando suavemente de la parte superior e inferior. Almacenar estos cartuchos para su colocación al finalizar el muestreo (Fig. 2).



Figura 2. Equipo SMCA, vista delantera.

2. Retirar la tapa inferior y superior de un cartucho nuevo (Figura 3) y colocarlo en el sistema SMCA presionando suavemente, de tal manera que la boquilla superior coincida con la parte superior de la tubería. Repetir por cada cartucho retirado.

Boquilla superior



Boquilla inferior

3. En la parte posterior del equipo, abrir el portafiltro desenroscando la parte inferior y con ayuda de unas pinzas, colocar el filtro impregnado de KI en el portafiltro como se muestra en la Figura 4.

Figura 3. Cartuchos de DNPH marca Waters (Waters, 2009).

4. Cerrar el portafiltro enroscando la parte inferior en su posición original.

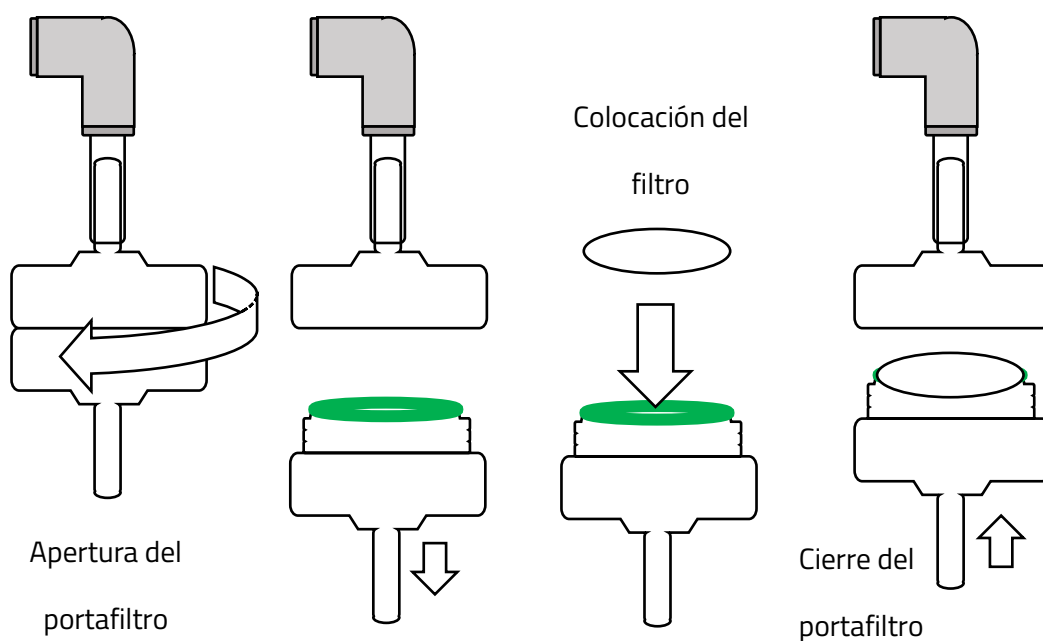


Figura 4. Esquema de colocación de filtro de KI

C) Instalación del equipo y muestreo.

1. Colocar el equipo (SMCA) en el ambiente laboral designado:
 - Área aledaña a la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ).
 - Área del laboratorio de protección ambiental del LIQ.
2. Conectar el equipo SMCA a la corriente eléctrica y encenderlo con el botón de la parte posterior.
3. Una vez encendida la pantalla táctil, presionar el botón de muestreo. Aparecerá una ventana para confirmar el inicio del muestreo. Presionar "si" para iniciar el muestreo. El lapso total de muestreo es de 8 horas.
4. Al presionar el botón de datos aparecerá una tabla con las condiciones del muestreo para cada cartucho, estos datos se deben registrar en la tabla 1.
5. Retirar los cartuchos del equipo SMCA, sellarlos con sus tapas y almacenarlos en bolsas metalizadas, previamente etiquetadas. Colocar los cartuchos de protección.
6. Refrigerar los cartuchos, junto con un cartucho nuevo que se utilizará como control, para su posterior análisis. Estos cartuchos pueden almacenarse un máximo de dos semanas (Waters, 2009).

Tabla 1. Tiempo y condiciones de muestreo de cartuchos DNPH.

No. cartucho	Hora inicial	Hora final	Flujo volumétrico [L/min]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]

D) Apagado del equipo SMCA.

Una vez finalizado el muestreo y registrado los datos de las condiciones del muestreo.

1. Retirar el filtro de KI y colocarlo en una bolsa de plástico, debidamente etiquetada, como residuo.
2. Presionar el botón de apagado en la pantalla táctil. Aparecerá una ventana en la cual debe presionar el botón de apagado. Después de cinco segundos de que se apagó la pantalla, presionar el botón de apagado de la parte posterior del equipo y desconectarlo de la corriente eléctrica.
3. Retirar el equipo a su lugar de almacenamiento.

Una vez realizado el muestreo, los cartuchos se llevan a analizar al laboratorio de Geoquímica Ambiental del conjunto F de la Facultad de Química por cromatografía de líquidos.

De las muestras analizadas se obtendrán las áreas de los picos de los cromatogramas correspondientes, con las que se calcula la concentración en la disolución utilizando la ecuación de la recta de las curvas de calibración (Anexo A)

CUESTIONARIO

1. ¿Por qué se realiza el muestreo en el área designada? ¿Existen fuentes de carbonilos en estas zonas?
2. ¿Cuál es el motivo por el que se coloca un filtro impregnado de KI en la entrada del sistema?
3. ¿Para qué se almacena uno de los cartuchos DNPH, sin equiparlo al sistema?
4. ¿El filtro impregnado de KI sufre algún cambio al finalizar el muestreo? Si es así, ¿A qué se debe?
5. ¿Cuáles compuestos carbonilos se identificaron en el sitio de muestreo?
6. Calcular la concentración medida de carbonilos en ambiente laboral (CMA) como se indica en el anexo C, a partir del área del cromatograma determinada en el análisis por cromatografía HPLC. Realizar una tabla para cada periodo de muestreo (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración de carbonilos para un periodo de muestreo.

Periodo de muestreo [min]				
Carbonilo	Área en cromatograma [UA]	Concentración en cromatograma [ppm]	Masa de carbonilo capturado [ng]	CMA [ppm]
Formaldehído				
Acetaldehído				
Acroleína				
Acetona				
Propionaldehído				
Crotonaldehído				

7. Con los valores de CMA calculados con base al Anexo C, determinar la Concentración Promedio Ponderada en Tiempo (CMA-PPT) y registrarla en la tabla 3

Tabla 3. Concentración promedio ponderada en tiempo (CMA-PPT) de gases contaminantes en el ambiente laboral

Sustancia química	CMA-PPT [ppm]
Formaldehído	
Acetaldehído	
Acroleína	
Acetona	
Propionaldehído	
Crotonaldehído	

8. Realizar una gráfica horaria para cada carbonilo con los valores de CMA. Colocando la línea de CMA-PPT y la línea de valor límite de exposición (VLE), indicada en la NOM-010-STPS-2014 (Tabla 4.).

Tabla 4. Valor límite de exposición de carbonilos indicados en la NOM-010-STPS-2014 (STPS, 2014).

Sustancia química	VLE [ppm]	
	PPT	CT o P
Formaldehído	-	0.3
Acetaldehído	-	25
Acroleína	-	0.1
Acetona	500	750
Propionaldehído	20	-
Crotonaldehído	-	0.3

9. ¿Alguno de los compuestos rebasa el valor límite de exposición indicado en la norma NOM-010-STPS-2014? Si es así, ¿Cuál o cuáles?

Tratamiento de residuos.

Los cartuchos extraídos y el filtro impregnado se depositan en una bolsa transparente para disponer como basura común.

Referencias bibliográficas

Lodge, Jr. (1989). *Methods of Air Sampling and Analysis* (J. P. Lodge, Ed.). Routledge.

<https://doi.org/10.1201/9780203747407>

National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH]. (2007). *NIOSH POCKET GUIDE TO CHEMICAL HAZARDS*. Department of Health and Human Services.

<http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>

Popendorf, W. (2019). *Industrial Hygiene Control of Airborne Chemical Hazards* (2nd ed.). CRC Press.

Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS]. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-010-STPS-2014, Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral-Reconocimiento, evaluación y control. *Diario Oficial de La Federación*.

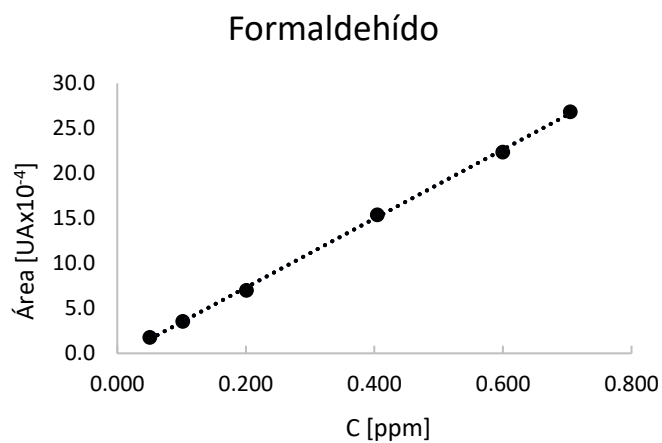
Sousa, F. W., Cavalcante, R. M., Rocha, C. A., Nascimento, R. F., & Ferreira, A. G. (2015). Carbonyl compounds from urban activities and their associated cancer risks: The influence of seasonality on air quality (Fortaleza-Ce, Brazil). *Urban Climate*, 13, 110–121.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.03.004>

Waters. (2009). *Waters sep-pak DNPH-silica cartri*

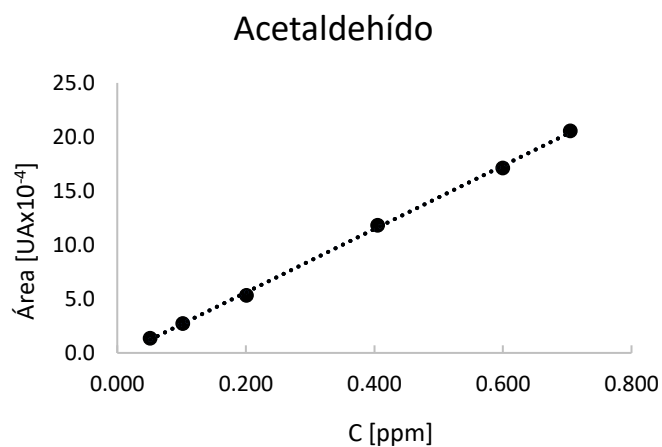
Anexo A: Curvas de calibración

C [ppm]	Área [UA]
0.051	17847.0
0.102	35623.9
0.201	69858.9
0.405	153922.9
0.600	223749.8
0.705	268448.5



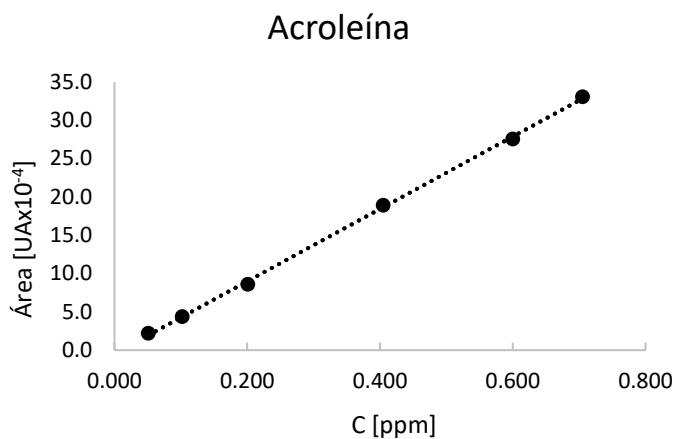
Gráfica 1. Curva de calibración concentraciones 0.05 a 0.7 ppm para formaldehído derivado.

C [ppm]	Área [UA]
0.051	13695.0
0.102	27289.3
0.201	53436.1
0.405	118117.9
0.600	171206.0
0.705	205528.3



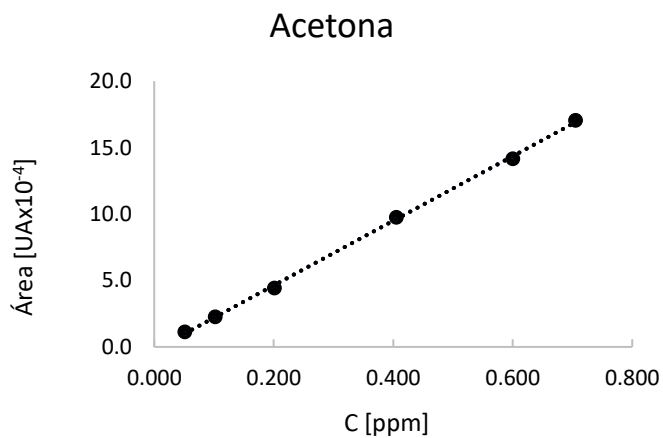
Gráfica 2. Curva de calibración concentraciones 0.05 a 0.7 ppm para acetaldehído derivado.

C [ppm]	Área [UA]
0.051	21981.1
0.102	43956.2
0.201	85818.9
0.405	189076.0
0.600	275423.6
0.705	330917.4



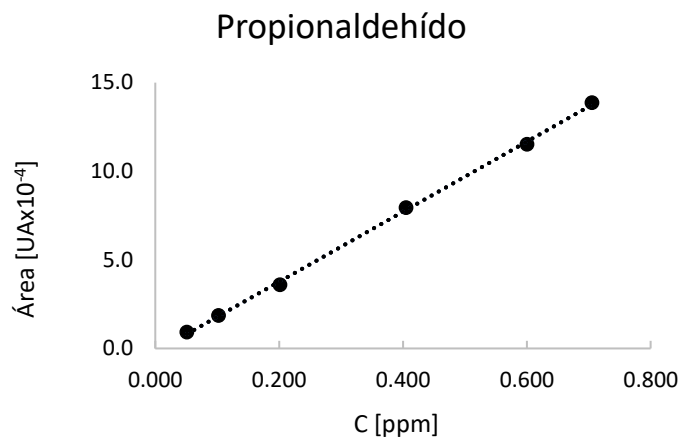
Gráfica 3. Curva de calibración concentraciones 0.05 a 0.7 ppm para acroleína derivado.

C [ppm]	Área [UA]
0.051	11248.7
0.102	22621.6
0.201	44229.0
0.405	97564.8
0.600	141598.4
0.705	170350.8



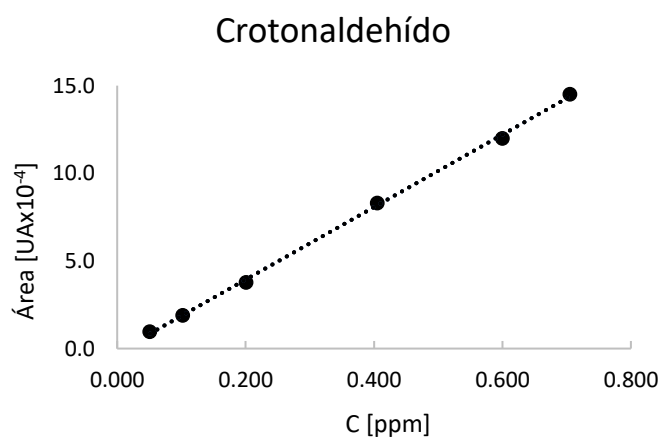
Gráfica 4. Curva de calibración concentraciones 0.05 a 1 ppm para acetona derivado.

C [ppm]	Área [UA]
0.051	9120.8
0.102	18487.0
0.201	35858.2
0.405	79313.2
0.600	115078.4
0.705	138562.7



Gráfica 5. Curva de calibración concentraciones 0.05 a 0.7 ppm para propionaldehído derivado.

C [ppm]	Área [UA]
0.051	9636.6
0.102	19006.5
0.201	37733.6
0.405	83046.4
0.600	120037.7
0.705	145151.7



Gráfica 6. Curva de calibración concentraciones 0.05 a 0.7 ppm para crotonaldehído derivado.

Anexo B: Memoria de cálculo

1. Se calcula el volumen muestreado.

$$V_m = F \times t \times 10^{-3}$$

Donde:

V_m , es el volumen muestreado, en m^3 .

F , es el flujo muestreado, en L/min.

t , es el tiempo de muestreo, en min.

2. Se calcula el volumen a condiciones de referencia, 298 K y 101.3 kPa (Lodge, 1989).

$$V_r = V_m \times \frac{P}{T} \times 2.94$$

Donde:

V_r , es el volumen a condiciones de referencia, en m^3 .

V_m , es volumen muestreado, en m^3 .

P , es la presión en el sitio de muestreo, en kPa.

T , es la temperatura del aire en el sitio de muestreo, en K.

3. Se determina la concentración de los carbonilos capturados con el área del cromatograma y la curva de calibración correspondiente (Anexo C).

4. Se calcula la masa de carbonilo capturado, a partir de la ecuación siguiente.

$$masa\ capturada_i = (C_m - C_b) \times V_{ext} \times 10^3$$

Donde:

$masa\ capturada_i$, es la masa de carbonilo capturado, en ng.

C_m , es la concentración de carbonilo capturado, en ppm.

C_b , es la concentración de carbonilo en el blanco, en ppm.

V_{ext} , es el volumen de extracción, en mL.

5. Se calcula la concentración medida en el ambiente laboral del carbonilo con la ecuación modificada de Lodge (1989).

$$CMA_i = \frac{\text{masa capturada}_i}{V_r} \times \frac{0.0245}{M_{DNPH}} \times 10^{-3}$$

Donde:

CMA_i , es la concentración medida en el ambiente laboral del contaminante i , en ppm_v.

masa capturada_i , es la masa de carbonilo capturado, en ng.

V_r , es el volumen muestreado a condiciones de referencia, en m³.

M_i , es la masa molar del carbonilo, en g/mol.

M_{DNPH} , es la masa molar del carbonilo derivatizado, en g/mol.

$$M_{DNPH} = M_i + 180$$

6. Se calcula la concentración promedio ponderada en tiempo (CMA-PPT) con la ecuación siguiente:

$$CMA - PPT = \frac{\sum_{i=1}^n CMA_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{(CMA_1 t_1) + (CMA_2 t_2) + \dots + (CMA_n t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Donde:

CMA_i , es la concentración i esima del contaminante en el ambiente laboral durante el tiempo determinado, siempre en mg/m³ o en ppm.

t_i , es el tiempo i esimo, utilizado en cada toma de muestra, siempre en la misma unidad de tiempo.

Anexo 2.- Curvas de calibración

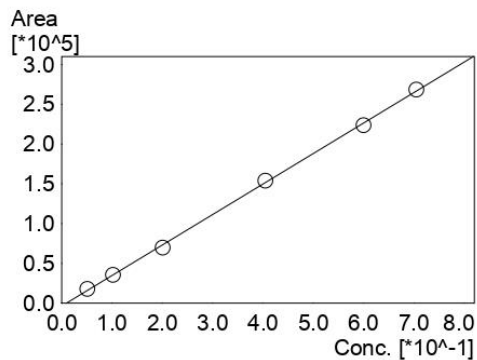
A continuación, se presentan las curvas de calibración de los seis compuestos carbonilos que se determinaran en la práctica experimental.

Curvas de calibración de formaldehído y acetaldehído.

==== Shimadzu LCsolution Calibration Curve ====

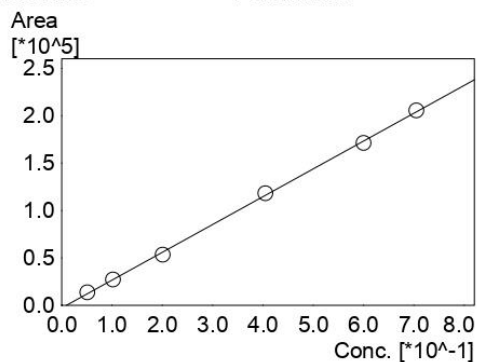
<Calibration Curve>

ID# : 1
Name : Formaldehido
Quantitative Method : External Standard
Function : $f(x)=383435 \cdot x-3659.91$
Rr1=0.9997022 Rr2=0.9994045
MeanRF:363417 RFSD:16138.4 RFRSD:4.44075
FitType : Linear
ZeroThrough : Not Through
WeightedRegression : None
Detector Name : Detector A



#	Conc (Ratio)	Area	Area
1	0.051	17847.0	17847
2	0.102	35623.9	35624
3	0.201	69858.9	69859
4	0.405	153922.9	153923
5	0.600	223749.8	223750
6	0.705	268448.5	268449

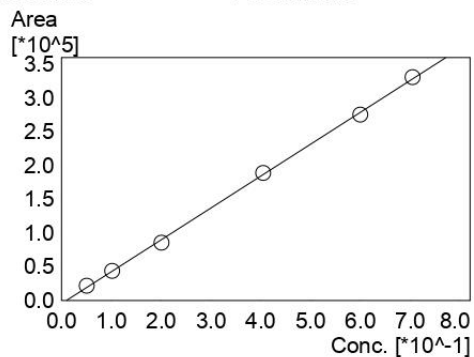
ID# : 2
Name : Acetaldehido
Quantitative Method : External Standard
Function : $f(x)=293523 \cdot x-2759.9$
Rr1=0.9996734 Rr2=0.9993468
MeanRF:278408 RFSD:12400.9 RFRSD:4.45423
FitType : Linear
ZeroThrough : Not Through
WeightedRegression : None
Detector Name : Detector A



#	Conc (Ratio)	Area	Area
1	0.051	13695.0	13695
2	0.102	27289.3	27289
3	0.201	53436.1	53436
4	0.405	118117.9	118118
5	0.600	171206.0	171206
6	0.705	205528.3	205528

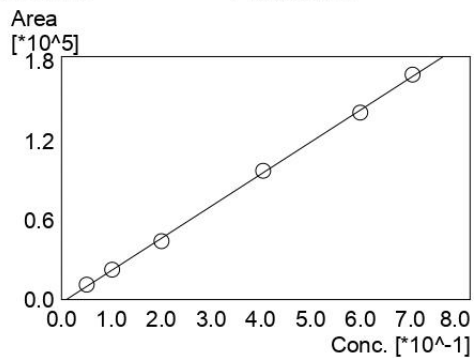
Curvas de calibración de acroleína y acetona.

ID# : 3
 Name : Acroleína
 Quantitative Method : External Standard
 Function : $f(x)=472377 \cdot x-4635.67$
 $Rr1=0.9996914$ $Rr2=0.9993829$
 MeanRF:447364 RFSD:19772.9 RFRSD:4.41986
 FitType : Linear
 ZeroThrough : Not Through
 WeightedRegression : None
 Detector Name : Detector A



#	Conc (Ratio)	Area	Area
1	0.051	21981.1	21981
2	0.102	43956.2	43956
3	0.201	85818.9	85819
4	0.405	189076.0	189076
5	0.600	275423.6	275424
6	0.705	330917.4	330917

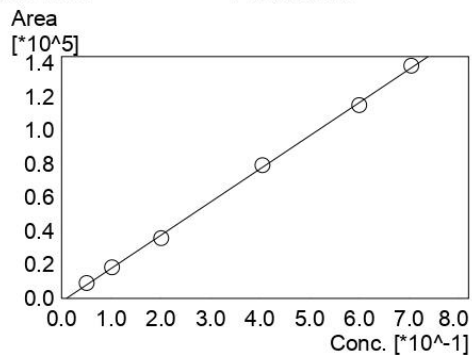
ID# : 4
 Name : Acetona
 Quantitative Method : External Standard
 Function : $f(x)=243119 \cdot x-2364$
 $Rr1=0.9996705$ $Rr2=0.9993411$
 MeanRF:230153 RFSD:10446.9 RFRSD:4.53912
 FitType : Linear
 ZeroThrough : Not Through
 WeightedRegression : None
 Detector Name : Detector A



#	Conc (Ratio)	Area	Area
1	0.051	11248.7	11249
2	0.102	22621.6	22622
3	0.201	44229.0	44229
4	0.405	97564.8	97565
5	0.600	141598.4	141598
6	0.705	170350.8	170351

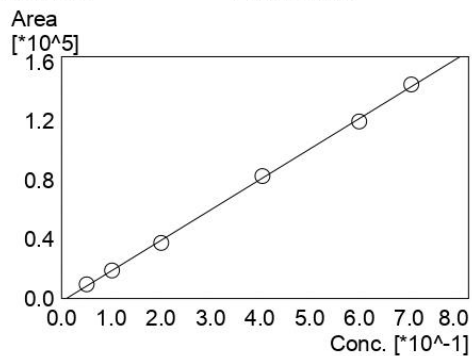
Curvas de calibración de propionaldehído y crotonaldehído.

ID# : 5
 Name : Propionaldehido
 Quantitative Method : External Standard
 Function : $f(x)=197688*x-1934.53$
 $Rr1=0.9996484$ $Rr2=0.9992970$
 MeanRF:187110 RFSD:8552.73 RFRSD:4.57096
 FitType : Linear
 ZeroThrough : Not Through
 WeightedRegression : None
 Detector Name : Detector A



#	Conc (Ratio)	Area	Area
1	0.051	9120.8	9121
2	0.102	18487.0	18487
3	0.201	35858.2	35858
4	0.405	79313.2	79313
5	0.600	115078.4	115078
6	0.705	138562.7	138563

ID# : 6
 Name : Crotonaldehido
 Quantitative Method : External Standard
 Function : $f(x)=206828*x-2046.6$
 $Rr1=0.9996079$ $Rr2=0.9992160$
 MeanRF:195671 RFSD:9022.35 RFRSD:4.61098
 FitType : Linear
 ZeroThrough : Not Through
 WeightedRegression : None
 Detector Name : Detector A



#	Conc (Ratio)	Area	Area
1	0.051	9636.6	9637
2	0.102	19006.5	19006
3	0.201	37733.6	37734
4	0.405	83046.4	83046
5	0.600	120037.7	120038
6	0.705	145151.7	145152

Anexo 3.- Reportes de los cromatogramas de la prueba piloto.

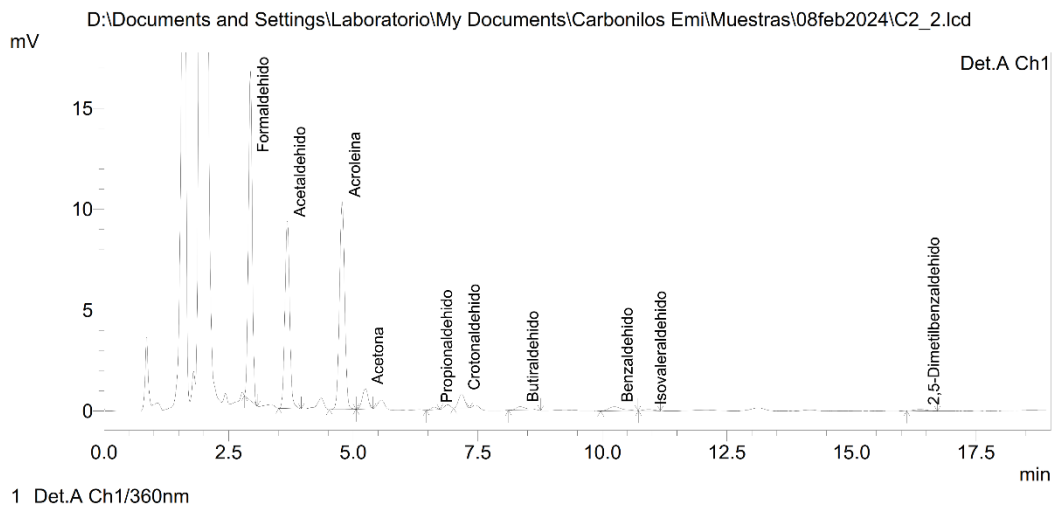
Se presenta un reporte de cromatograma para cada periodo de muestreo.

Cromatograma del periodo 8:00 a 9:45.

====INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA CAMBIO CLIMÁTICO

LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRAFÍA====

D:\Documents and Settings\Laboratorio\My Documents\Carbonilos Emi\Muestras\08feb2024\C2_2.lcd
Acquired by : Admin
Sample Name : C2
Sample ID : C2
Tray# : 1
Vail # : 1
Injection Volume : 20 uL
Data File Name : C2_2.lcd
Method File Name : Carbonilosfeb2024Emi.lcm
Batch File Name :
Report File Name : Default.lcr
Data Acquired : 13/02/2024 12:08:41 p.m.
Data Processed : 15/02/2024 12:06:29 p.m.



PeakTable

Detector A Ch1 360nm					
Peak#	Ret. Time	Name	Conc.	Units	Area
1	2.934	Formaldehído	0.234	ppm	86100
2	3.675	Acetaldehído	0.220	ppm	61827
3	4.774	Acroleína	0.169	ppm	75365
4	5.240	Acetona	0.043	ppm	8101
5	6.622	Propionaldehído	0.015	ppm	1030
6	7.173	Crotonaldehído	0.038	ppm	5850
7	8.349	Butiraldehído	0.035	ppm	3172
8	10.245	Benzaldehído	0.041	ppm	3752
9	10.914	Isovaleraldehído	0.016	ppm	918
10	16.396	2,5-Dimetilbenzaldehído	0.040	ppm	1396
Total					247511

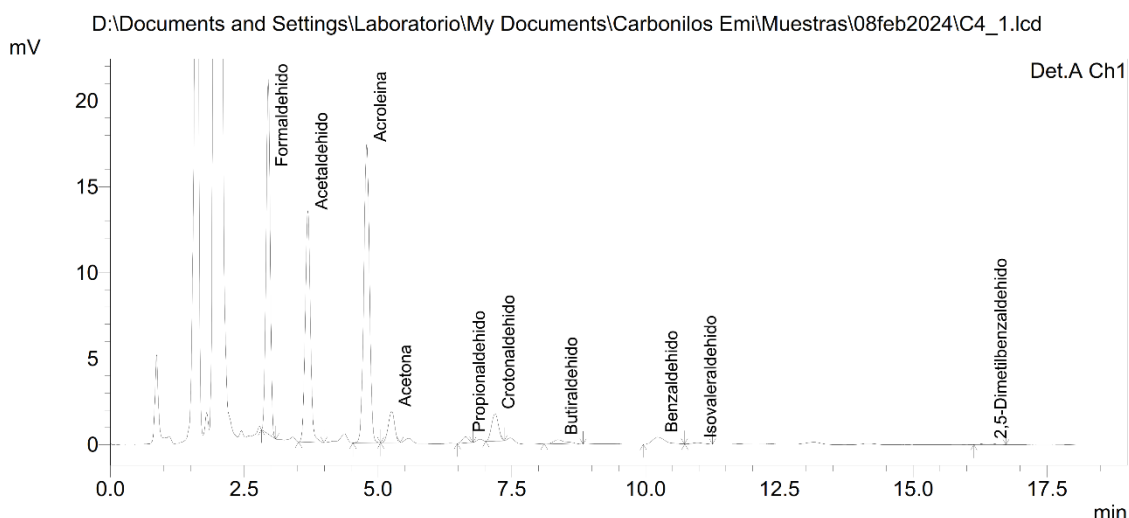
Cromatograma del periodo 10:00 a 11:45.

====INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA CAMBIO CLIMÁTICO

LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRFÍA====

D:\Documents and Settings\Laboratorio\My Documents\Carbonilos Emi\Muestras\08feb2024\C4_1.lcd

Acquired by : Admin
Sample Name : C4
Sample ID : C4
Tray# : 1
Vail # : 1
Injection Volume : 20 uL
Data File Name : C4_1.lcd
Method File Name : Carbonilosfeb2024Emi.lcm
Batch File Name :
Report File Name : Default.lcr
Data Acquired : 13/02/2024 01:51:47 p.m.
Data Processed : 15/02/2024 12:07:45 p.m.



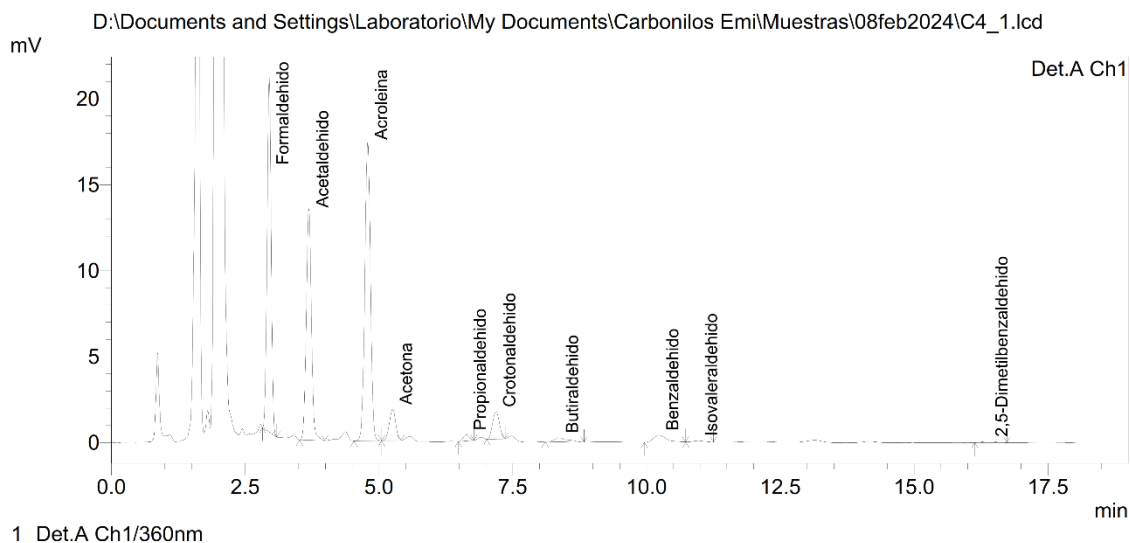
PeakTable						
Detector A Ch1 360nm						
Peak#	Ret. Time	Name	Conc.	Units	Area	
1	2.946	Formaldehído	0.292	ppm	108315	
2	3.687	Acetaldehído	0.315	ppm	89656	
3	4.786	Acroleína	0.279	ppm	127322	
4	5.252	Acetona	0.072	ppm	15079	
5	6.633	Propionaldehído	0.024	ppm	2862	
6	7.183	Crotonaldehído	0.079	ppm	14353	
7	8.357	Butiraldehído	0.043	ppm	4103	
8	10.230	Benzaldehído	0.066	ppm	6781	
9	10.953	Isovaleraldehído	0.018	ppm	1102	
10	16.379	2,5-Dimetilbenzaldehído	0.039	ppm	1341	
Total					370915	

Cromatograma del periodo 12:00 a 13:45.

====INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA CAMBIO CLIMÁTICO

LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRFÍA====

D:\Documents and Settings\Laboratorio\My Documents\Carbonilos Emi\Muestras\08feb2024\C4_1.lcd
 Acquired by : Admin
 Sample Name : C4
 Sample ID : C4
 Tray# : 1
 Vail # : 1
 Injection Volume : 20 uL
 Data File Name : C4_1.lcd
 Method File Name : Carbonilosfeb2024Emi.lcm
 Batch File Name :
 Report File Name : Default.lcr
 Data Acquired : 13/02/2024 01:51:47 p.m.
 Data Processed : 15/02/2024 12:07:45 p.m.



PeakTable

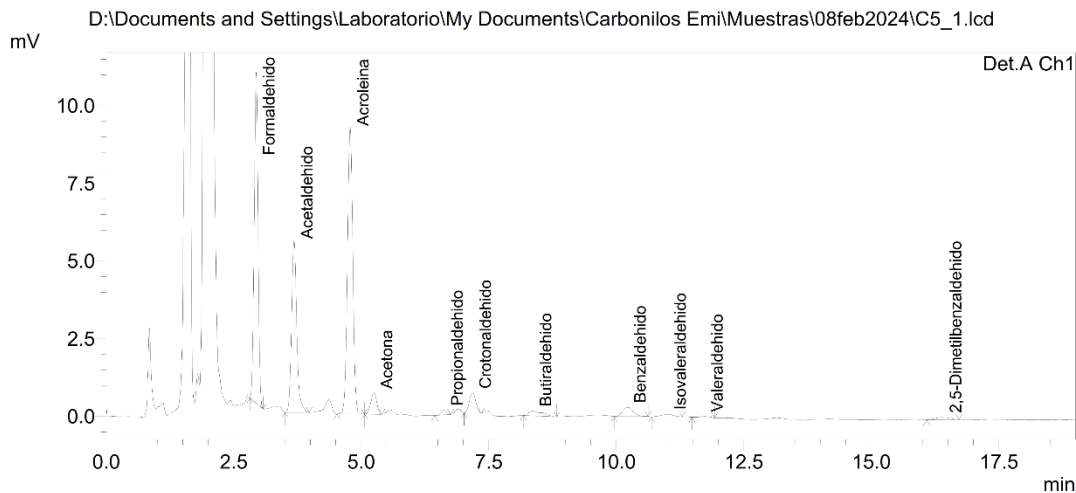
Detector A Ch1 360nm						
Peak#	Ret. Time	Name	Conc.	Units	Area	
1	2.946	Formaldehído	0.292	ppm	108315	
2	3.687	Acetaldehído	0.315	ppm	89656	
3	4.786	Acroleína	0.279	ppm	127322	
4	5.252	Acetona	0.072	ppm	15079	
5	6.633	Propionaldehído	0.024	ppm	2862	
6	7.183	Crotonaldehído	0.079	ppm	14353	
7	8.357	Butiraldehído	0.043	ppm	4103	
8	10.230	Benzaldehído	0.066	ppm	6781	
9	10.953	Isovaleraldehído	0.018	ppm	1102	
10	16.379	2,5-Dimetilbenzaldehído	0.039	ppm	1341	
Total					370915	

Cromatograma del periodo 14:00 a 15:45.

====INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA CAMBIO CLIMÁTICO

LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRAFÍA====

D:\Documents and Settings\Laboratorio\My Documents\Carbonilos Emi\Muestras\08feb2024\C5_1.lcd
 Acquired by : Admin
 Sample Name : C5
 Sample ID : C5
 Tray# : 1
 Vail # : 1
 Injection Volume : 20 uL
 Data File Name : C5_1.lcd
 Method File Name : Carbonilosfeb2024Emi.lcm
 Batch File Name :
 Report File Name : Default.lcr
 Data Acquired : 13/02/2024 02:49:12 p.m.
 Data Processed : 15/02/2024 12:08:11 p.m.



PeakTable

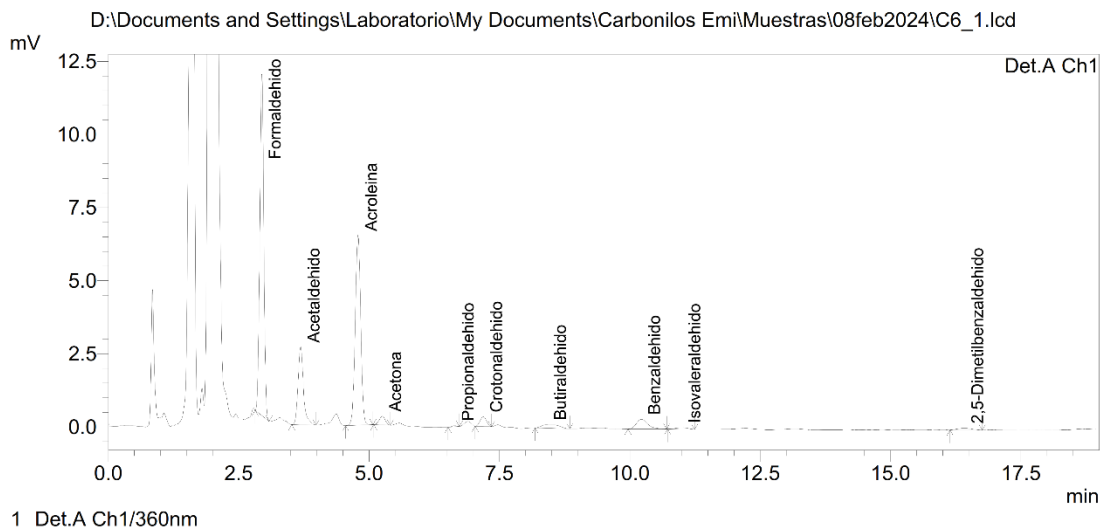
Detector A Ch1 360nm						
Peak#	Ret. Time	Name	Conc.	Units	Area	
1	2.936	Formaldehído	0.156	ppm	56041	
2	3.679	Acetaldehído	0.142	ppm	38937	
3	4.778	Acroleína	0.152	ppm	67365	
4	5.245	Acetona	0.032	ppm	5528	
5	6.625	Propionaldehído	0.015	ppm	1116	
6	7.178	Crotonaldehído	0.037	ppm	5681	
7	8.361	Butiraldehído	0.034	ppm	2999	
8	10.213	Benzaldehído	0.046	ppm	4326	
9	11.000	Isovaleraldehído	0.019	ppm	1316	
10	11.721	Valeraldehído	0.017	ppm	499	
11	16.397	2,5-Dimetilbenzaldehído	0.040	ppm	1404	
Total					185211	

Cromatograma del periodo 16:00 a 17:45.

====INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA CAMBIO CLIMÁTICO

LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRFÍA====

D:\Documents and Settings\Laboratorio\My Documents\Carbonilos Emi\Muestras\08feb2024\C6_1.lcd
Acquired by : Admin
Sample Name : C6
Sample ID : C6
Tray# : 1
Vail # : 1
Injection Volume : 20 uL
Data File Name : C6_1.lcd
Method File Name : Carbonilosfeb2024Emi.lcm
Batch File Name :
Report File Name : Default.lcr
Data Acquired : 13/02/2024 03:28:33 p.m.
Data Processed : 15/02/2024 12:08:36 p.m.



PeakTable					
Detector A Ch1 360nm					
Peak#	Ret. Time	Name	Conc.	Units	Area
1	2.941	Formaldehído	0.172	ppm	62338
2	3.684	Acetaldehído	0.075	ppm	19366
3	4.785	Acroleína	0.111	ppm	47830
4	5.251	Acetona	0.020	ppm	2401
5	6.644	Propionaldehído	0.011	ppm	247
6	7.187	Crotonaldehído	0.024	ppm	2826
7	8.413	Butiraldehído	0.032	ppm	2806
8	10.215	Benzaldehído	0.053	ppm	5188
9	10.985	Isovaleraldehído	0.016	ppm	920
10	16.412	2,5-Dimetilbenzaldehído	0.037	ppm	1249
Total					145171

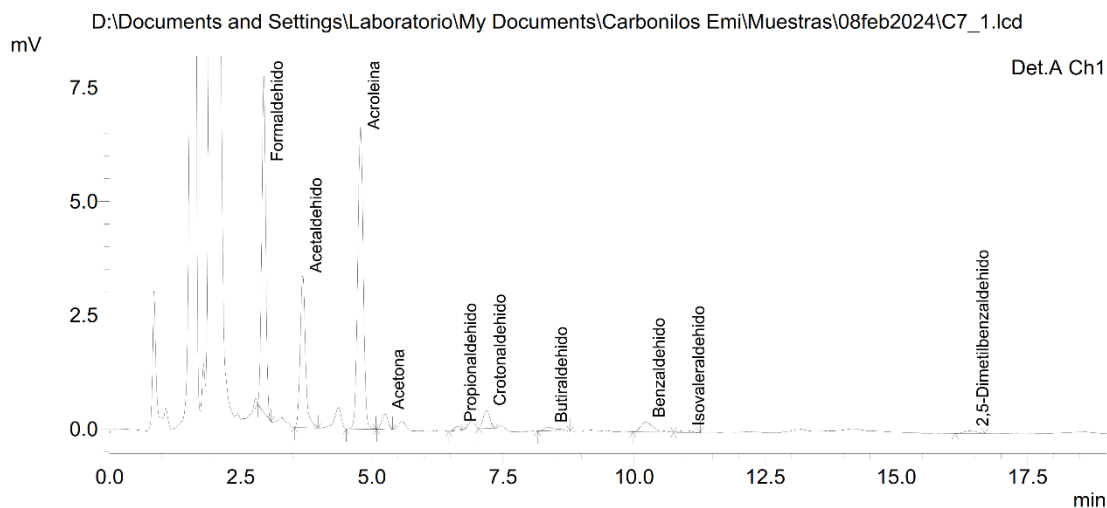
Cromatograma del periodo 18:00 a 19:45.

====INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA CAMBIO CLIMÁTICO

LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRAFÍA====

D:\Documents and Settings\Laboratorio\My Documents\Carbonilos Emi\Muestras\08feb2024\C7_1.lcd

Acquired by : Admin
Sample Name : C7
Sample ID : C7
Tray# : 1
Vail # : 1
Injection Volume : 20 uL
Data File Name : C7_1.lcd
Method File Name : Carbonilosfeb2024Emi.lcm
Batch File Name :
Report File Name : Default.lcr
Data Acquired : 13/02/2024 04:08:35 p.m.
Data Processed : 15/02/2024 12:08:58 p.m.



PeakTable						
Detector A Ch1 360nm						
Peak#	Ret. Time	Name	Conc.	Units	Area	
1	2.935	Formaldehído	0.111	ppm	38944	
2	3.678	Acetaldehído	0.089	ppm	23404	
3	4.779	Acroleína	0.113	ppm	48908	
4	5.247	Acetona	0.021	ppm	2677	
5	6.624	Propionaldehído	0.013	ppm	663	
6	7.182	Crotonaldehído	0.026	ppm	3333	
7	8.357	Butiraldehído	0.022	ppm	1495	
8	10.219	Benzaldehído	0.039	ppm	3570	
9	10.972	Isovaleraldehído	0.015	ppm	776	
10	16.389	2,5-Dimetilbenzaldehído	0.034	ppm	1061	
Total					124832	

Anexo 4.- Certificado de calibración del sensor de flujo SFM4100 (Sensirion AG, 2023).

Se presenta el certificado de calibración del sensor de flujo másico marca Sensirion SFM4100.

Calibration Certification – Gas Flow Sensors



Calibration Certification

Name and address of the manufacturer: Sensirion AG
Laubisruefstrasse 50
CH-8712 Switzerland

Description: Gas Flow Sensors

- SFM3xxx
- SFM4xxx
- SFM6xxx
- SFM7xxx
- SFT40xx

The above mentioned products are calibrated to meet the specifications according to the corresponding Sensirion data sheet. Each device is individually tested after its calibration.

Sensirion uses transfer standards for the calibration. These transfer standards are themselves subject to a scheduled calibration procedure. The calibration of the reference itself used for the calibration of the transfer standards is performed in accordance with ISO9001:2015.

The accreditation bodies of our references are full members of the International Laboratory Accreditation Cooperation (www.ilac.org). Calibration certificates issued by facilities accredited by a signatory to the ILAC Mutual Recognition Arrangement (MRA) are accepted by all signatories to the ILAC MRA.

Staeafa, 16 January 2023

Stephan Weber,
Director,
Head of Quality Management, Sensirion AG

Volker Born
Manager,
Head of Quality Engineering, Sensirion AG

Certificate of Analysis

T011/IP-6A Aldehyde/Ketone-DNPH Mix

*Certified
Reference
Material*

Description

Product ID CRM4M7285
Lot LRAC7968
Expiration Date September 2023
Manufacturing Date September 2020
Storage Conditions Refrigerate
Solvent/Matrix ACETONITRILE

Certified Values

Analyte	Certified Functional ¹⁴ Gravimetric Conc.	Units	Certified Derivative Gramimetric Conc.	Raw Material Purity, %	Elution order	Raw Material Lot	CAS
FORMALDEHYDE-2,4-DNPH	15.1 ± 0.3	µg/mL	105.8	98.8	01	0012017	1081-15-8
ACETALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	76.3	97.0	02	52-GHZ-45-1	1019-57-4
ACROLEIN-2,4-DNPH	15.3 ± 0.2	µg/mL	64.4	99.9	03	1-AWT-59-1	888-54-0
ACETONE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.3	µg/mL	61.5	99.9	04	FN05021401	1567-89-1
PROPIONALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	61.5	89.0	05	FN05011402	725-00-8
CROTONALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	53.5	90.0	06	15-BHW-144-5	1527-96-4
BUTYRALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	52.4	86.0	07	LRAB7629	1527-98-6
BENZALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	40.5	99.9	08	LC19975	1157-84-2
ISOVALERALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	46.3	80.0	09	03052020	2256-01-1
VALERALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	46.3	85.0	10	FN05021402	2057-84-3
O-TOLUALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	37.5	99.5	11	LC18690	1773-44-0
P-TOLUALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	37.5	99.5	12	LA45001	2571-00-8
M-TOLUALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	37.5	99.2	12	ER08131401	2880-05-9
HEXALDEHYDE-2,4-DNPH	15.0 ± 0.3	µg/mL	42.0	98.9	13	LA45139	1527-97-5
2,5-DIMETHYLBENZALDEHYDE -2,4-DNPH	15.0 ± 0.2	µg/mL	35.1	90.0	14	LB84616	152477-96-8

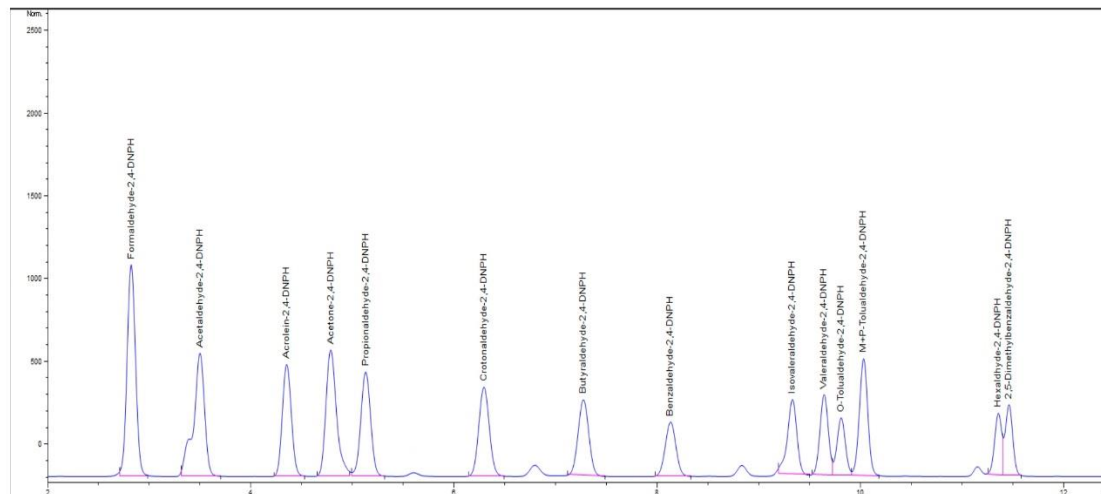


SIGMA-ALDRICH®
2931 Soldier Springs Rd. Laramie, Wyoming 82070 USA
800-325-5832
TechService@milliporesigma.com www.sigma-aldrich.com

Description

Lot LRAC7968
Expiration Date September 2023
Manufacturing Date September 2020
Storage Conditions Refrigerate
Solvent/Matrix ACETONITRILE

Informational Values



Additional Information:

Analytical Method Parameters:
Column: Ascentic Express C18, 15cmx3.0mmx2.7µm (Column #609)
Mobile Phase A: Water: Tetrahydrofuran (5:2)
Mobile Phase B: Acetonitrile
Flow Rate: 0.5mL/min
Column Temperature: 35 °C
Injection Volume: 5 µL
Detector: DAD, Wavelength: 360 nm



Certificate of Analysis

T011/IP-6A Aldehyde/Ketone-DNPH Mix

*Certified
Reference
Material*

Description

Product ID CRM4M7285
Lot LRAC7968
Expiration Date September 2023
Manufacturing Date September 2020
Storage Conditions Refrigerate
Solvent/Matrix ACETONITRILE

1 Metrological traceability: Traceable to the SI and higher order standards from NIST through an unbroken chain of comparisons. The balance used to weigh raw materials is accurate to +/-0.0001 g and calibrated regularly using mass standards traceable to NIST. All dilutions were performed gravimetrically. Additionally, individual analytes are traceable to NIST SRMs where available and specified above.
4 Ucrm - Uncertainty values in this document are expressed as Expanded Uncertainty (Ucrm) corresponding to the 95% confidence interval. Ucrm is derived from the combined standard uncertainty multiplied by the coverage factor k, which is obtained from a t-distribution and degrees of freedom. The components of combined standard uncertainty include the uncertainties due to characterization, homogeneity, long term stability, and short term stability (transport). The components due to stability are generally considered to be negligible unless otherwise indicated by stability studies. The mathematical representation of the Ucrm calculation is as follows:

$$U_{CRM} = \sqrt{U_{char}^2 + U_{homogeneity}^2 + U_{stability}^2}$$

k: Coverage factor derived from a t-distribution table, based on the degrees of freedom of the data set. Assume 2.0 for a **Confidence interval = 95%**

6 Analytical Value: For QC verification of the certified value only- not to be used in calculations. Represents the analytical data obtained by comparison to a standard as analyzed by the method described in the CoA or another acceptable method. The result may differ from the certified value and UCRM based on method uncertainty as well as the uncertainty associated with the standard used for comparison.

Traceability: The standard was manufactured under an ISO/IEC 17025:2017 certified quality system. The balance used to weigh raw materials is accurate to +/- 0.0001g and calibrated regularly using mass standards traceable to NIST. All dilutions were performed gravimetrically. Additionally, individual analytes are traceable to NIST SRMs where available and specified above.

Homogeneity: Homogeneity was assessed in accordance with ISO 17034:2016. Completed units were sampled using a random stratified sampling protocol. The results of chemical analysis were then compared using a one-way analysis of variance approach as described by TNI EL-V3-2009 Appendix A.2. See Instructions for minimum sub-sample size.

Expiration is at end of month given on certificate and label.

MSDS reports for components comprising greater than 1.0% of the solution or 0.1% for components known to be carcinogens are available upon request.

THIS PRODUCT WAS DESIGNED, PRODUCED AND VERIFIED FOR ACCURACY AND STABILITY IN ACCORDANCE WITH ISO/IEC 17025:2017 (ANAB Cert AT-1467) and ISO 17034:2016 (ANAB Cert AR-1470).

Andy Ommen - QC Manager

Certification Date October 08, 2020
Version 0-1082020

Mark Pooler - QA Supervisor



SIGMA-ALDRICH®

2931 Soldier Springs Rd. Laramie, Wyoming 82070 USA
800-325-5832
TechService@milliporesigma.com www.sigma-aldrich.com