

El ambiente es de todos

Minambiente

BOGOTÁ D.C.
2021

Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de **emisiones de compuestos orgánicos volátiles**

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana

El ambiente es de todos | Minambiente

REPÚBLICA DE COLOMBIA
Iván Duque Márquez
Presidente

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Carlos Eduardo Correa E.

Viceministro de Políticas y Normalización Ambiental
Francisco Cruz Parada

Directora de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana
Andrea Corzo Alvarez

Coordinador Grupo de Gestión Ambiental Urbana
Mauricio Gaitán Varón

EQUIPO TÉCNICO (COAUTORES)
DIRECCIÓN DE ASUNTOS AMBIENTALES, SECTORIAL Y URBANA
Mauricio Gaitán Varón, Luisa Fernanda González Herrera,
Jenniffer Iveth Pedraza Vega

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Laura Camila León Manrique, José Alejandro Murad Pedraza

Agradecimientos
Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Convenio de prácticas y pasantías número 277 de 2019
Secretaría Distrital de Ambiente - SDA. Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA
Asociación Nacional de Empresarios de Colombia - ANDI

Corrección de Estilo
María Emilia Botero Arias. Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental, Minambiente

Diagramación
José Roberto Arango Romero. Grupo de Comunicaciones, Minambiente

CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN: Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental.
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles [Recurso electrónico] / Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y Urbana: Gaitán Varón, Mauricio; González Herrera, Luisa Fernanda; Pedraza Vega, Jennifer Iveth; Universidad Distrital Francisco José de Caldas: León Manrique, Laura Camila; Murad Pedraza, José Alejandro. ------ Bogotá D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021.

110 p. il.

ISBN: 978-958-5551-74-9

1. compuestos orgánicos volátiles - COV - 2. contaminación del aire 3. buenas prácticas 4. instrumentos de política 5. metalmecánica 6. industria del plástico 7. artes gráficas 8. industria del caucho 9. estaciones de servicio I. Tit. II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CDD: 628.5

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021
Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.
No comercializable - Distribución gratuita



Lista de figuras

Figura 1. Mapa de selección (basado en los costos netos más bajos) para elegir una tecnología de reducción de compuestos orgánicos volátiles. 27
Figura 2. Mecanismos de impresión tipográfica 30
Figura 3. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión tipográfica 31
Figura 4. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión flexográfica 31
Figura 5. Impresión en retrograbado 32
Figura 6. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión rotográfica 33
Figura 7. Impresión offset 34
Figura 8. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión offset 36
Figura 9. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en recubrimiento automotriz 43
Figura 10. Proceso de obtención de llantas para automotor 54
Figura 11. Proceso de extrusión 52
Figura 12. Lámina de calandrado 55
Figura 13. Equipo vulcanizador 55
Figura 14. Sección de medición con respecto a la perturbación 70
Figura 15. Sección de medición con respecto a la salida del ducto 70
Figura 16. Diagrama conceptual de flujo de compuestos orgánicos volátiles 81
Figura 17. Representación de biorreactores a) biofiltro, b) biofiltro percolador, c) biolavador. 104
Figura 18. Clasificación de compuestos orgánicos volátiles de acuerdo con la constante de Henry 105

Lista de tablas

Tabla 1. Definición Internacional de los compuestos orgánicos volátiles 15
Tabla 2. Clasificación de compuestos orgánicos volátiles según el punto de ebullición 16
Tabla 3. Límite máximo de emisión -(OSHA- de compuestos orgánicos volátiles por solvente 18
Tabla 4. Compuestos orgánicos volátiles más comunes en la industria nacional 21
Tabla 5. Actividades que conforma el sector metalmecánico 39
Tabla 6. Eficiencia de control 45
Tabla 7. Técnicas de control de emisiones en las estaciones de servicio 63
Tabla 8. Métodos de medición directa para compuestos orgánicos volátiles. 67
Tabla 9. Clasificación de impacto y toxicidad 72
Tabla 10. Clasificación de Industrias para la vigilancia de compuestos orgánicos volátiles 72
Tabla 11. Tiempo de aplicabilidad 72
Tabla 12. Parámetros del ducto circular 73
Tabla 13. Parámetros del ducto rectangular 73
Tabla 14. Métodos de extracción de muestra 76
Tabla 15. Alternativas de sustitución de sustancias peligrosas. 84
Tabla 16. Alternativas de sustitución de solventes tóxicos 85
Tabla 17. Compuestos orgánicos volátiles que presentan riesgo para la salud. 96
Tabla 18. Efectos en la salud y propiedades cancerígenas de algunos compuestos orgánicos volátiles. 97
Tabla 19. Métodos de control y tratamiento de compuestos orgánicos volátiles. 99
Tabla 21. Métodos de control y límites de inflamabilidad. 101
Tabla 22. Factor de emisión de compuestos orgánicos volátiles 106

Siglas y acrónimos

ACA	Air Compliance Advisor
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
CFR	Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos (CFR)
CIIU	Código Industrial Internacional Uniforme
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EDS	Estaciones de Servicio
EEA	Agencia Ambiental Europea (Environmental European Agency - EEA)
EM	Espectroscopia de masas
ENEC	Estrategia Nacional de Economía Circular
EPD	Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong
FID	Detector de ionización de llama
HPLC	Cromatografía de alta eficiencia
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
ICP	Indicador de consumo de compuestos orgánicos volátiles por unidad de producto
IEC	Indicador de emisiones de compuestos orgánicos volátiles por unidad de consumo de compuestos orgánicos volátiles
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
LDAR	Leak Detection and Repair (siglas en inglés)
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Minambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ORVR	On Board Vapor Recovery (siglas en inglés)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PID	Detectores de fotoionización
P&D	Piping and Instrument Diagram (siglas en inglés)
RVP	Presión de vapor Reid (siglas en inglés)
Udea	Universidad de Antioquía
U.S. EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
SOA	Aerosoles orgánicos secundarios
SRV	Sistema de recuperación de vapores

Nomenclatura

BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos
COV	Compuestos orgánicos volátiles
COVBs	Compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico
NMVOC	Compuestos orgánicos volátiles no metánicos
PAN	Nitrato de peroxiacilo (Peroxi Acil Nitrate)
PBR	Polibutadieno (del inglés Poli-Butadiene-Rubber)
PVC	Cloruro de polivinilo
SBR	Estireno-butadieno (del inglés Styrene-Butadiene- Rubber)
SVOC	Compuestos orgánicos semi-volátiles
VVOC	Compuestos orgánicos muy volátiles

Tabla de Contenido

1. **INTRODUCCIÓN** 8
2. **OBJETIVOS DE LA GUÍA** 11
3. **ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA GUÍA** 13
4. **ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES** 15
   - 4.1. Definición 15
   - 4.2. Los compuestos orgánicos volátiles, su importancia y efectos en la salud 16
   - 4.3. Fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles 18
   - 4.4. Compuestos orgánicos volátiles comunes en la industria nacional 20
5. **MECANISMOS Y TÉCNICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA INDUSTRIA** 23
   - 5.1. Medidas preventivas 23
   - 5.2. Medidas correctivas e implementación de sistemas de control 26
6. **REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR DE IMPRENTA Y ARTES GRÁFICAS** 29
   - 6.1. Generalidades 29
   - 6.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el proceso de imprenta y artes gráficas 29
   - 6.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de imprenta y artes gráficas 36
7. **REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR METALMECÁNICA Y RECUBRIMIENTO DE SUPERFICIES** 39
   - 7.1. Generalidades 39
   - 7.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el proceso de metalmecánica y de recubrimiento de superficies 40
   - 7.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de metalmecánica y recubrimiento de superficies 43
8. **REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO** 47
   - 8.1. Generalidades 47
   - 8.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del plástico 47
   - 8.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del plástico 50
9. **REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA DEL CAUCHO** 53
   - 9.1. Generalidades 53

9.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del caucho 53
9.3. Prácticas, medidas y equipo utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del caucho 56
10. ESTACIONES DE SERVICIO Y CENTROS DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE 59
10.1. Generalidades 59
10.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de servicio y centros de almacenamiento de combustible 59
10.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de servicio 60
11. CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES 65
11.1. Cuantificación por medio de balance de masa 65
11.2. Cuantificación mediante factores de emisión 66
11.3. Cuantificación por medición directa 67
11.4. Monitoreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles en el ambiente respirable 75
12. INSTRUCTIVO PARA IMPLEMENTAR UN PROGRAMA PARA REDUCIR EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA EMPRESA 79
12.1. Generalidades 79
12.2. Pasos a seguir para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la empresa 80
12.3. Estrategias para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la empresa 82
12.4. Alternativas de sustancias peligrosas y solventes tóxicos utilizados en la industria 84
12.5. Planes de contingencia para episodios de contaminación por compuestos orgánicos volátiles en el ambiente 87
REFERENCIAS 91
ANEXOS 97
Anexo 1. A-1 Compuestos orgánicos volátiles que presentan riesgo para la salud 96
Anexo 2. A-2 Efectos en la salud y propiedades cancerígenas de algunos compuestos orgánicos volátiles 97
Anexo 3. A-3 Métodos de control 99
Anexo 4 109
Anexo 5. A-5 Factor de emisión de compuestos orgánicos volátiles 106
GLOSARIO 107



INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud OMS o WHO por sus siglas en inglés, de la "primera conferencia mundial de la OMS sobre contaminación del aire y salud", se sabe que aproximadamente el 91% de la población mundial respira un aire insalubre y que este hoy es uno de los principales factores de muertes prematuras en el mundo (WHO, 2018).

Como entidad rectora en materia de gestión de los recursos naturales renovables y del ambiente, una de las funciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) es definir las políticas y regulaciones que permitan conservar y proteger la calidad del aire evitando los factores de riesgo para la salud y la calidad de vida.

Los contaminantes atmosféricos se distinguen en contaminantes primarios y secundarios, los primarios son aquellos que se emiten directamente de la fuente y se encuentran en la atmósfera con la misma composición química que en el punto de emisión, y los contaminantes secundarios se generan a partir de los contaminantes primarios; entre los contaminantes primarios se encuentran los compuestos orgánicos volátiles que son el enfoque de esta guía.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) no pertenecen al grupo de los contaminantes criterio, pero si son conocidos como contaminantes peligrosos del aire, por ser un conjunto de compuestos capaces de causar perturbaciones a la salud humana.

Los compuestos orgánicos volátiles se encuentran presentes en muchos productos de consumo masivo doméstico e industrial, como disolventes, aerosoles, desengrasantes, pinturas, tintas, plastificantes, entre otros.

Los compuestos orgánicos volátiles son sustancias químicas que contienen principalmente carbono e hidrógeno, aunque también contienen elementos como oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno, se evaporan fácilmente a temperatura ambiente; están presentes principalmente en las emisiones provenientes de la industria del petróleo y gas, también están en presentes en productos de consumo, materiales de construcción, la industria de pinturas y artes gráficas, el uso de disolventes orgánicos, entre otros (Herce-Vallejo, M., Canas, J., Compte, J., Serena, J. M., & Relea Gines, F. (2011); Tan, Z., 2014).

Los compuestos orgánicos volátiles son familias de compuestos abarcadas principalmente por parafinas con un contenido de carbón de (C_1-C_4), olefinas, aldehídos, cetonas y compuestos aromáticos como el benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos (BTEX), benzaldehído, entre otros (Tan, Z., 2014).

Al ser emitidos a la atmósfera, los compuestos orgánicos volátiles pueden transformarse u oxidarse mediante procesos fotoquímicos en presencia de luz solar), generando contaminantes atmosféricos secundarios como los aerosoles orgánicos secundarios o SOA (por su sigla en inglés), ozono troposférico y otros contaminantes fotoquímicos, como el nitrato de peroxiacilo, conocido también como PAN (del inglés Peroxi Acil Nitrate).

Este documento presenta en primer lugar, una descripción sobre la importancia de los compuestos orgánicos volátiles y sus efectos en la salud, así como las principales fuentes de emisión de este tipo de contaminantes. Se identifican, además, los principales sectores productivos generadores de estos compuestos, lo cual conlleva a reconocer la importancia y la estimación de la carga contaminante que es emitida actualmente hacia la atmósfera.

Posteriormente, se presenta un listado detallado de las principales recomendaciones para las industrias en sus instalaciones generadoras de emisiones de compuestos orgánicos volátiles. En el caso particular de los procesos y actividades industriales considerados en el presente documento, se recomiendan acciones de contingencia para controlar y atender oportunamente los episodios de contaminación por compuestos orgánicos volátiles que eventualmente puedan presentarse en las instalaciones industriales y su área de influencia.

El presente documento se ha diseñado para el uso y conocimiento de autoridades ambientales y en especial para empresarios e industriales; profesionales y técnicos interesados en el tema; instituciones académicas de educación superior, así como centros de investigación y público en general.





OBJETIVOS DE LA GUÍA

La presente *Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles*, tiene como objetivo establecer los criterios, prácticas y mejores prácticas y tecnologías necesarias para reducir el impacto ocasionado por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debido a las actividades industriales, así como definir los mecanismos de evaluación, monitoreo, control y seguimiento para las industrias en Colombia.



ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA GUÍA

La presente guía es el primer instrumento técnico desarrollado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para las actividades industriales instaladas en el territorio nacional que manipulen, manejen o procesen sustancias que en su composición química contengan o emitan compuestos orgánicos volátiles y que, debido a su propiedades fisicoquímicas, puedan ocasionar de manera directa problemas a la salud al ser inhalados, ingeridos o absorbidos a través de la piel (problemas como cáncer, daños en el hígado, riñones o el sistema nervioso, entre otros) o de forma indirecta, en tanto que pueden ser precursores del ozono troposférico a nivel urbano. De igual manera, esta guía está dirigida a las autoridades ambientales a cargo del control y seguimiento de las emisiones contaminantes, con el fin de proveer lineamientos técnicos para la prevención de episodios de contaminación con este tipo de sustancias tóxicas.

Los compuestos orgánicos volátiles son gases contaminantes comunes en la atmósfera y no tienen un efecto radiactivo directo sobre los gases de efecto invernadero, pero impulsan una serie compleja de transformaciones químicas y físicas que resultan en la formación de contaminantes secundarios como son la formación de ozono troposférico y material particulado secundario. La presencia de los compuestos orgánicos volátiles en el ambiente es considerada un factor de riesgo para la salud y los recursos naturales (European Environment Agency [EEA], 2012).

Debido a este riesgo sanitario, la problemática de los compuestos orgánicos volátiles en la presente guía nacional gira en torno a la reducción del impacto de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles procedentes de los sectores productivos de la industria nacional, dando prioridad a la importancia de factores de riesgo como la toxicidad y el potencial cancerígeno de los materiales empleados como insumos en los procesos de fabricación, en particular cuando se dispersan en el aire, ya sea de forma accidental o intencional (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2010)

Toda industria que en su actividad productiva utilice solventes orgánicos o sustancias que contengan compuestos orgánicos volátiles y que opere en lugares o instalaciones fijas o de carácter temporal, podrá consultar la guía con el fin de cumplir con los requerimientos de control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, sin importar su tamaño y la intensidad de producción.

La *Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de compuestos orgánicos volátiles*, le proporciona a la industria nacional información técnica básica que le permite aplicar medidas preventivas o correctivas para la reducción de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y dar cumplimiento a la normativa vigente en el territorio colombiano de acuerdo con lo dispuesto en los artículos 79 de la Constitución Política; 73 del Decreto Ley 2811 de 1974; los numerales 2, 10, 11, 14 y 25 del artículo 5 de la Ley 99 de 1993.



4. ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

4.1. Definición

No existe una definición internacionalmente unificada de los compuestos orgánicos volátiles. Comúnmente, la literatura científica los define como aquellas sustancias de origen orgánico cuya composición y estructura química les permite evaporarse bajo condiciones normales de temperatura y presión. A continuación, se presentan algunas definiciones empleadas frecuentemente por organismos o agencias ambientales internacionales de amplio reconocimiento en el ámbito mundial.

Tabla 1. Definición Internacional de los compuestos orgánicos volátiles

Organismo o agencia ambiental	Definición de compuestos orgánicos volátiles
Agencia Ambiental Europea (*Environmental European Agency - EEA*)	Son compuestos químicos orgánicos que en condiciones normales son gaseosos o pueden vaporizarse e introducirse en la atmósfera. Compuestos orgánicos volátiles incluye compuestos como el metano, benceno, xileno, propano y butano. El metano es emitido principalmente por la agricultura (por el ganado y los cultivos), mientras los compuestos orgánicos volátiles no metánicos o NMVOC, por sus siglas en inglés, son emitidos principalmente por el transporte, procesos industriales y por el uso de solventes industriales (Comisión Europea [CE], 2000).
Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong (EPD)	Son compuestos químicos orgánicos que poseen suficiente presión de vapor en condiciones normales para vaporizarse y entrar en la atmósfera. Se encuentran presentes en una gran variedad de productos de consumo e industriales y son liberados al ambiente de manera inconsciente contribuyendo a la polución y al esmog fotoquímico (EPD, 2019)
Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA)	Cualquier compuesto de carbón (excluyendo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carbonatos metálicos, y carbonato de amonio) que participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas, excepto las designadas por la U.S. EPA, que tienen una reactividad fotoquímica despreciable. Los compuestos orgánicos volátiles o COV son compuestos orgánicos químicos cuya composición hace posible para ellos la evaporación en condiciones atmosféricas normales de temperatura y presión.

Para Colombia, la definición técnica de los compuestos orgánicos volátiles (COV) se adoptará de la siguiente manera:

Los compuestos orgánicos volátiles se definen como todo compuesto orgánico cuya estructura química presenta como base el elemento carbono o que tenga una volatilidad que a condiciones normales (20 °C y 0.01KPa), se encuentren en estado gaseoso o puedan vaporizarse e introducirse en la atmósfera. Los compuestos orgánicos volátiles (COV) incluyen sustancias como benceno, xilenos, tolueno, etilbenceno, propano y butano. Los compuestos orgánicos volátiles son emitidos principalmente por las actividades de transporte, los procesos industriales o el uso de solventes.

A continuación, se presenta una clasificación de los compuestos orgánicos volátiles con referencia a su punto de ebullición, establecida por la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization. [WHO], 2018) y aceptada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], s.f -a).

4.2. Los compuestos orgánicos volátiles, su importancia y efectos en la salud

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provienen tanto de fuentes biogénicas (naturales) y antropogénicas (resultado de actividades humanas).

Las fuentes biogénicas provienen principalmente de la vegetación, incendios forestales y procesos anaeróbicos en ciénagas y pantanos, los principales compuestos son el isopreno (C_5H_8) y α-pineno (Menezes, H. C., Amorim, L. C. A., & Cardeal, Z. L., 2013), aunque las fuentes naturales son importantes y en el ámbito mundial son predominantes, en áreas urbanas las fuentes antropogénicas son las que contribuyen en mayor medida a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (Atkinson, R. & Arey, J., 2003).

Tabla 2. Clasificación de compuestos orgánicos volátiles según el punto de ebullición

Descripción	Abreviación	Rango de ebullición °C	Ejemplos de compuestos
Compuestos orgánicos muy volátiles (gases)	VVOC	0-100	Benceno, propano, butano, metil cloruro. Empleados como adelgazantes de pintura
Compuestos orgánicos volátiles	COV	50-260	Formaldehído, d-limoneno, tolueno, acetona, etanol (alcohol etílico), 2-propanol (alcohol isopropílico), hexanal. Empleados como desengrasantes y solventes.
Compuestos orgánicos semi-volátiles	SVOC	240-400	Plaguicidas (DDT, clordano, plastificantes (falatos), retardantes de fuego (PCB, PBB))

Fuente: Universidad de Antioquia [UdeA], 2013.

Las emisiones antropogénicas de compuestos orgánicos volátiles ocurren en ambientes externos e internos y tienen su origen en el uso de solventes y de combustibles fósiles, las fuentes móviles (vehículos) y fijas, los procesos industriales, incluyendo la explotación, el almacenamiento y distribución de petróleo y sus derivados. Otras fuentes de emisión son los rellenos sanitarios y las quemas agrícolas (Derwent, 1995). Las fuentes antropogénicas se pueden clasificar como fuentes estacionarias o móviles, donde estas últimas son la principal fuente de compuestos orgánicos volátiles en atmósferas urbanas (de Blas, 2009).

Los ecosistemas forestales emiten una cantidad de COVBs (sic) (compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico) que comprende alrededor del 90% de las emisiones globales de compuestos orgánicos volátiles, en las zonas urbanas se llega a emitir un 60% de COVs (sic) a causa de la vegetación, especialmente isopreno y monoterpenos, sin embargo, estos compuestos son de vida corta en la atmósfera, entre 30 minutos a 3 horas (Pérez Vallejo, M.A, 2019).

Las fuentes fijas de emisiones de compuestos orgánicos volátiles más comunes generadas por la industria son aquellas que involucran la evaporación de solventes en actividades como el desengrasado de piezas metálicas y en el recubrimiento para proteger superficies, que a su vez incluyen el uso de otros productos con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles como son los adhesivos, las pinturas y los barnices.

Otras fuentes fácilmente identificables son las pertenecientes al sector de las artes gráficas e impresiones, dado que utilizan tintas y diluyentes en forma intensiva. El uso de parafinas e hidrocarburos aromáticos en las artes gráficas también contribuye a la emisión de compuestos

orgánicos volátiles, como ocurre, principalmente, con el tolueno y los xilenos. Adicionalmente, las sustancias que contienen alcoholes, cetonas, ésteres e hidrocarburos halogenados, son fuente importante de compuestos orgánicos volátiles (de Blas, 2009).

Por otra parte, las actividades relacionadas con la explotación de hidrocarburos también generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles, en las diferentes etapas del proceso como son la fracturación hidráulica, actividades de venteo y quema de gas en teas, y la evaporación de aguas de proceso. De igual manera, la evaporación, almacenamiento y combustión de la gasolina es otra fuente de compuestos orgánicos volátiles aromáticos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, en zonas urbanas; la industria del plástico, fragancias y repelentes contribuyen a la emisión de compuestos volátiles y semivolátiles entre los que se encuentran :bifenilos, polibromatos, ésteres de alquilo, entre otros. (Menezes, H. C., Amorim, L. C. A., & Cardeal, Z. L., 2013).

Los efectos en la salud por exposición a los compuestos orgánicos volátiles dependen de sus características fisicoquímicas, de la cantidad o dosis recibida y del tiempo de exposición (Ebi, K & McGregor, G, 2008). Su grado de toxicidad e impacto en la salud se reflejan en la irritación de las mucosas y conjuntivas, las alteraciones del sistema nervioso, alergias y cambios en la función pulmonar. Un número considerable de compuestos orgánicos volátiles son reconocidos hoy día como agentes cancerígenos entre los que se mencionan el benceno y el percloroetileno (Colman *et ál*., 2011).

En la actualidad hay un creciente interés por evaluar los riesgos asociados a la salud a causa de la exposición a compuestos orgánicos volátiles. En Colombia se han realizado estudios sobre trabajadores expuestos a compuestos orgánicos volátiles en industrias ubicadas en el interior del país, evaluando los efectos genotóxicos y el daño al ADN (Vargas Ramos, Y. E., & Marrugo Negrete, J. L. 2014). Otro factor de riesgo radica en la tendencia de los compuestos orgánicos volátiles a constituirse en precursores para la formación de aerosoles orgánicos secundarios mediante reacciones fotoquímicas o por el mecanismo de condensación. Estos aerosoles hacen parte del material particulado en la baja atmósfera, el cual tiene efectos negativos directos en la calidad del aire y la salud pública.

Por esto, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidas [U.S. EPA] (a través de su *Estrategia Integrada de Tóxicos del Aire Urbano*, cuyo objetivo es la protección de la salud pública y del medio ambiente) evaluó los efectos adversos derivados de la exposición a los 188 contaminantes peligrosos del aire, 97 de los cuales son compuestos orgánicos volátiles y los clasifica por sus propiedades carcinogénicas. De acuerdo con la clasificación, se establecen los 33 compuestos tóxicos del aire, entre los que se encuentran 20 compuestos orgánicos volátiles (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], s.f-c).

En el **anexo 1** se presentan los compuestos orgánicos volátiles que se encuentran dentro de los compuestos tóxicos del aire según la U.S. EPA y los que presentan riesgo para la salud de acuerdo con la OMS (de Blas, M., 2009).

En el **anexo 2** se presenta la clasificación de las sustancias según sus propiedades cancerígenas conforme a las categorías establecidas por la EPA y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, asociada a la OMS.

Esta clasificación se establece considerando los valores límites de toxicidad y de actividad carcinógena, determinados por organizaciones internacionales de protección ambiental de larga trayectoria y con excelentes resultados en la aplicación de políticas de reducción de emisiones en los últimos diez años, entre ellas se destacan la Environmental Protection Agency de Estados Unidos; la Agencia Europea de Medio Ambiente -AEMA y la Occupational Safety and Health Administration -OSHA de cobertura mundial.

En nuestro país el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, considerando factores como el riesgo para la salud y el grado de toxicidad de las sustancias, recomienda como límites de

concentración de compuestos orgánicos volátiles los valores establecidos en la norma OSHA, con el objetivo de proteger la salud de las personas dentro y alrededor de edificios o estructuras.

En la tabla 3, se presentan los máximos niveles de emisión recomendados para los compuestos orgánicos volátiles (compuestos orgánicos volátiles) considerados de alta peligrosidad en el territorio colombiano.

Tabla 3 Límite máximo de emisión -(OSHA- de compuestos orgánicos volátiles por solvente

Compuesto	Norma OSHA mg/m³
1,1,2,2-tetracloroetano	35
1,2-dicloroetano	400
1,2-dicloropropano	350
1,3-butadieno	2200
1,3-dicloropropeno	5
Acetaldehído	360
Acrilonitrilo	2
Acroleína	0.25
Benceno	3
Cloroformo	240
Cloruro de vinilo	5
Dibromuro de etileno	5
Diclorometano	174
Formaldehído	7.5
Hidracina	1.3
Óxido de etileno	5
Tetracloroetileno	170
Tetracloruro de carbono	10
Tricloroetileno	267
Disulfuro de carbono	31
Estireno	85
Xileno	435
Tolueno	0.4

Fuente: World Health Organization [WHO], 1989

4.3. Fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles

En general, las fuentes más comunes de emisiones de compuestos orgánicos volátiles están asociadas a las actividades industriales que generan, almacenan y utilizan líquidos o gases que contienen estos compuestos orgánicos, donde los materiales se encuentran bajo presión, sometidos a una reducción de la presión de vapor o desplazados desde un espacio cerrado (Corporación Financiera Internacional [IFC], 2007).

En el medio industrial las fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera pueden ser fijas o difusas. Las fuentes fijas se caracterizan porque sus sitios de descarga son visibles y localizados, tal es el caso de las chimeneas o la descarga de un sistema de ventilación o extracción de vapores ubicados en la cima de un equipo de proceso: debido a que se encuentran localizadas en un punto y son plenamente identificables, las emisiones de fuentes fijas son fácilmente medibles y controlables.

Las emisiones al aire provenientes de fuentes fugitivas corresponden a emisiones distribuidas espacialmente en zonas amplias, no se concentran en un solo lugar de descarga y proceden de operaciones en las que los escapes no se canalizan a través de chimeneas o ductos de ventilación. Las emisiones fugitivas tienen un potencial de impacto por unidad de carga de material mucho mayor que las emisiones derivadas de fuentes fijas, puesto que su descarga y dispersión se producen cerca de la superficie del suelo y las chimeneas facilitan la dispersión del material contaminante a mayor altura y distancia (IFC, 2007).

A diferencia de las fuentes fijas, las fuentes difusas pueden contener uno o varios puntos de salida; estos son de difícil identificación y sus emisiones se caracterizan por cubrir amplias áreas de las zonas industriales haciendo difícil su control. Algunos ejemplos son:

- Escapes en líneas de flujo.
- Fugas en equipos.
- Derrames.
- Manipulación.
- El almacenamiento en condiciones inadecuadas.
- Envases deteriorados, o inapropiados para recoger una determinada sustancia, que pueden dar lugar a emanaciones de vapores.

A nivel nacional, la elaboración y actualización de los inventarios de emisiones permite identificar las fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles, algunos de los resultados encontrados de estos inventarios son:

De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) de Bogotá (SDA, 2014), en la capital del país las emisiones de compuestos orgánicos volátiles están principalmente relacionadas con fuentes fijas de procesos en el sector de recubrimiento y artes gráficas, este último por la impresión por retrograbado, con concentraciones de emisión de 8.528 mg/m^3 y 0.758 mg/m^3 y flujo másico del contaminante de 0.0008 y 0.018 kg/h, respectivamente. Adicional a esto, en el año 2014 las fuentes móviles, también contribuyen de forma significativa a estas emisiones, relacionadas con el aumento en la flota vehicular y el uso de gasolina como combustible (SDA, 2014).

Del inventario publicado por el Área Metropolitana del Valle de Aburra para el año 2019, se identifica que las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provienen de fuentes fijas, fuentes móviles (en ruta y fuera de ruta), fuentes de área y fuentes biogénicas. De acuerdo con la categoría vehicular, estas son las fuentes que más emiten compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera, los camiones (51%), los buses de servicio especial (33.7%) y las motos 4T (6.7%) aportan 16,707 t/año, 11,023 t/año y 2,189 t/año respectivamente. El uso de la gasolina como combustible también influye en el 94% de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles. De las especies de compuestos orgánicos volátiles (tolueno, etilbenceno, xileno y benceno) los camiones son los responsables de la mayoría de las emisiones de t/año (Área metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA], 2019).

De las fuentes de área, el subsector textil es el responsable del 40% de las emisiones totales, de las cuales el 89.7% son emisiones de compuestos orgánicos volátiles, afectando a los municipios de Medellín e Itagüí. El sector de plásticos, cauchos y empaques es el responsable del 82.5% de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles no metanóicos (NMVOC). En el Valle de Aburrá las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provienen en un 49.4% de los procesos industriales, las estaciones de servicio por su parte son responsables del 48.9% mientras que los tanques de almacenamiento de combustible contribuyen solo con el 1.7% restante (Área Metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA], 2019).

El municipio de Manizales en la actualización del inventario de emisiones por fuentes móviles utilizó el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE, por sus siglas en inglés), que utiliza

información respecto a los patrones de conducción, composición dinámica de la flota, distribución de tecnología vehicular y distribución de partidas de frío.

Para el año 2014 las fuentes móviles de ruta aportaron un 99.95% de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Para el 2017 la actualización llevó a la evaluación de la flota vehicular de la ciudad, en este caso las motocicletas de dos tiempos 2W que son el 45% de la flota vehicular, aportan en un 75% a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles con un total de 3,843.23 t/año. Además, el uso de combustible también fue evaluado y la gasolina es el combustible usado en el 100% por las motocicletas de 2W, aportando a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en un 92%. Este es un estudio realizado al parque automotor de la ciudad, por lo tanto, el área de afectación es la cabecera urbana de la ciudad de Manizales (Valencia, M.C, 2019).

Santiago de Cali es un municipio líder en industrias del sector del caucho, químicos, fabricación de muebles, papel y molinería; de un trabajo acerca de las emisiones atmosféricas por fuentes estacionarias y estaciones de servicio (EDS) se concluyó que los compuestos orgánicos volátiles se emiten de estas dos fuentes; las fuentes estacionarias y difusas (EDS) son las que emiten compuestos orgánicos volátiles en mayor cantidad, el 98.4% proviene de fuentes puntuales, con un total de 5,163.7 t/año y el 1.6% de fuentes difusas.

Del inventario de emisiones del año 2012 elaborado por el DAGMA en comparación con este estudio del año 2017, las emisiones provenientes de las EDS disminuyeron en un 81%, no porque hubiera cambiado el combustible distribuido, si no por el factor de emisión usado de acuerdo con las actividades realizadas en las EDS de la ciudad (Jiménez-Restrepo, N., 2019).

Del inventario publicado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca para el municipio de Santiago de Cali del año 2018, se logró identificar que para las fuentes fijas las actividades que generan mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles son el sector metalmecánico; fundición y manejo de metales, hierro, metales no ferrosos, producción de maquinaria eléctrica y no eléctrica y actividades terciarias (comercio y servicios) con, 58.6 y 44.1 t/año, respectivamente. De las fuentes móviles las motocicletas de 4T son las que más emiten compuestos orgánicos volátiles, con un total de 5 g/km, seguido de pesados de tecnología Euro I y II que emiten 2.53 g/km. Las motocicletas generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles de 50,662.49 t/año.

Las comunas con presencia de estaciones de servicio y por tanto con emisiones provenientes de esta actividad son: comuna 4 (al norte), 9 (centro), 10 (suroccidente) y 12 (suroriente). La comuna 3 es la que más aporta a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles por la actividad económica que allí se desarrolla con un total de 58.294 t/año (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [CVC], 2018).

4.4. Compuestos orgánicos volátiles comunes en la industria nacional

Estos son algunos de los compuestos más comunes encontrados en las emisiones evaporativas de los procesos industriales nacionales asociados a riesgos en la salud humana:

Tabla 4. Compuestos orgánicos volátiles más comunes en la industria nacional

Propiedades	Benceno	Tolueno	Xileno			Formaldehído	Estireno	Cloro benceno	Nitrobenceno
			M	O	P				
Peso molecular [g/mol]	78.11	92.13	106.16	106.16	106.16	30.03	104.15	112.56	123.1
Punto de fusión [°C]	5.5	-95	-47.8	-25.2	13.2	-92	-30.6	-45.6	5.7
Punto de ebullición [°C]	80.1	110.6	139.1	144.5	138.4	-21	145.2	132	210.8
Densidad [g/ml]	0.879*	0.87*	0.864*	0.88*	0.861*	0.815****	0.9059*	1.1058*	1.2037*
Presión de vapor [mmHg]	95.2**	58.4**	8.29**	6.61**	8.84**	10***	5*	8.8*	0.15*
Punto de inflamación [°C]	-11.1	4.4	27	32	27	60	29.4	29.4	87.7
Solubilidad en agua [g/L]	1.8**	0.515*	0.161**	0.178**	0.162**	Muy soluble hasta 50%	0.5*	0.5*	1.9*

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency [EPA], s.f.-a.
*Temperatura a 20 °C
**Temperatura a 25 °C
***Temperatura a -88°C
****Temperatura a -20°C



5. MECANISMOS Y TÉCNICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA INDUSTRIA

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles son de interés debido a su impacto potencial en la salud y a su participación como agentes precursores en la formación del ozono troposférico, por lo que es necesario establecer los mecanismos preventivos y correctivos que permitan controlar los compuestos orgánicos volátiles en la fuente; de acuerdo con la *Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible* expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2010 (MAVDT, 2010). Dichos mecanismos orientan al uso eficiente de materiales, agua y energía, en la empresas y sectores productivos del país se presentan diferentes alternativas de reducción de tales contaminantes, aplicables en el ámbito industrial.

5.1. Medidas preventivas

5.1.1. Eliminación y sustitución de solventes

El método más efectivo e ideal para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles es el control en la fuente, es decir, prevenir la emisión mediante el reemplazo de un material o proceso por otro más seguro que genere menos emisiones hacia la atmósfera. En principio, es preferible evitar el problema eliminando y sustituyendo que intentar corregir una decisión inicial inadecuada o poco efectiva para lograr minimizar las emisiones (Comisión Europea [CE], 2000) (Rincón-Cuervo, C.G. & Ortiz-Vásquez A.M.,2015).

5.1.2. Buenas prácticas de operación

La reducción de residuos y emisiones es el objetivo fundamental de las buenas prácticas de operación y en el ámbito nacional este propósito está incluido en la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) (Gobierno de la Republica de Colombia, 2019), involucrando la sostenibilidad ambiental con el desarrollo económico que son conceptos sujetos a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)[1]; en esta guía en particular están dirigidos a enfrentar de manera preventiva el problema de la contaminación industrial y, en especialmente, la contaminación atmosférica. Estas medidas apuntan a mejorar la eficiencia de los procesos productivos; optimizar el uso de las materias primas; identificar mejoras orientadas hacia la búsqueda de la eficiencia en la reducción de las emisiones y vertimientos y, por último, procuran el logro de la calidad total. La experiencia internacional ha demostrado que a largo plazo las buenas prácticas son herramientas que resultan más efectivas desde el punto de vista económico y más coherentes desde el punto de vista ambiental, con relación a los métodos tradicionales de tratamiento “al final del proceso” (Graedel, T. & Howard-Greenville, J., 2005).

La técnica de buenas prácticas de operación puede aplicarse a cualquier proceso de producción e involucra desde simples cambios en los procedimientos operacionales de fácil e inmediata ejecución, hasta cambios mayores, que impliquen la substitución de materias primas, insumos o mejoras en las líneas de producción que sean más limpias y eficientes.

1 https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

A continuación, se indican algunas acciones o medidas consideradas como buenas prácticas operativas:

a) Para las materias primas

- Seleccionar como materias primas sustancias con bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles.
- Cuando sea posible, eliminar el uso de solventes sustituyéndolos por sustancias o procesos alternativos.
- Optimizar las dosificaciones de las distintas mezclas que involucren solventes en su contenido, es decir minimizar la cantidad de solvente a emplear en las mezclas y procesos.
- Mantener al mínimo las cantidades almacenadas de sustancias con contenido de compuestos orgánicos volátiles, ya sean materias primas o productos y planificar una rotación de entrada y salida para mantener las mínimas existencias.

b) Para el proceso

- Las operaciones que involucren manejo de sustancias con contenido de compuestos orgánicos volátiles deben ser lo más rápidas posible, es decir, se deben efectuar en el tiempo estrictamente necesario, sin sacrificar la calidad del producto.
- Utilizar las máximas medidas de contención, aislamiento o control de fugas y escapes en los procesos que manejen grandes cantidades de solvente o sistemas de reacción que produzcan o consuman sustancias con contenido de compuestos orgánicos volátiles tales como: solventes, monómeros y polímeros.
- Cuando no exista la posibilidad de aislamiento, se deben ubicar sistemas de extracción localizada que faciliten el manejo y reciclaje de los vapores de solvente captados.
- Reducir emisiones de compuestos orgánicos volátiles manteniendo tapados los recipientes con solventes utilizados en la limpieza y desengrase o realizar estas actividades en sitios de contención.
- Todos los contenedores de solvente llenos o parcialmente llenos deberán ser transportados y almacenados con tapas y las otras aberturas selladas al aire.
- Si el contenedor va a utilizarse para acumular material para reciclaje o para la disposición de desechos, debe almacenarse con tapa y selladas las otras aberturas.

c) Para los residuos

- Recuperar la mayor cantidad de solvente posible de las corrientes de residuo, mediante filtración, adsorción, destilación y reciclaje.
- Toda corriente de residuos que contenga compuestos orgánicos volátiles debe ser captada y almacenada herméticamente para evitar fugas de vapores de dichos compuestos.
- Cuando existan residuos que no se puedan reutilizar, se deben entregar a un gestor de residuos legalmente constituido para su disposición final.

5.1.3. Identificación, reducción y control de emisiones fugitivas

Las emisiones fugitivas tienen lugar en una corriente de proceso (gas o líquido) cuando los componentes situados en ella se fugan. Estas emisiones son difícilmente predecibles y pueden ser intermitentes e, incluso, variar en intensidad a lo largo del tiempo. Existen, diversas fuentes potenciales de emisiones fugitivas:

- Escapes por sellos, empaquetaduras y bridas de equipos de procesos tales como bombas,

válvulas, agitadores, compresores y válvulas de alivio de presión.

- Escapes por sistemas de drenajes, conexiones, toma de muestras en líneas y circuitos de proceso.

Respecto a la metodología para reducir las emisiones fugitivas, es ampliamente conocido que el Método 21 de la U.S. EPA (2017) describe procedimientos para controlar tales emisiones de compuestos orgánicos volátiles, ya sea que procedan de equipos de proceso o de cualquier otra fuente en el circuito de producción. Con base en este método se sugieren algunas técnicas complementarias:

A. La sustitución de los equipos existentes por otros que no ofrezcan o que reduzcan de forma drástica la posibilidad de emisiones fugitivas.
B. La aplicación estricta de un programa de detección y reparación de fugas conocida como LDAR (del inglés Leak Detection and Repair), concentrado en los puntos de fugas en tuberías y ductos de proceso, tanques y en general en todos los equipos del circuito.
C. Aplicación de técnicas y dispositivos de captación, canalización y control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

5.1.4. Reducción de emisiones difusas en el almacenamiento y transporte

Las técnicas empleadas y recomendadas para lograr la reducción de emisiones difusas generadas en procesos de almacenamiento, manipulación y operaciones de transferencia son las siguientes (Richardson, 1992(:

- Techo flotante externo con sellos dobles (para sustancias no muy peligrosas); tanques de techo fijo con tapas internas flotantes y sellos de borde (para líquidos más volátiles); tanques de techo fijo con protección de gas inerte, almacenaje presurizado (para sustancias muy peligrosas u olorosas).
- Interconectar los contenedores móviles con los recipientes de almacenamiento a través de líneas de balance.
- Reducir al mínimo la temperatura de almacenamiento de los solventes.
- Instrumentar adecuadamente los recipientes de almacenamiento con sistemas controladores de nivel para evitar derrames de solvente.
- Disponer de un sistema impermeable de contención secundaria en caso de derrame cuya capacidad sea de al menos un 110% de la capacidad del tanque más grande.
- Recuperar material con compuestos orgánicos volátiles (por condensación, absorción y adsorción) de la corriente de salida o venteos antes de ser enviado a reciclaje o destrucción por combustión en una unidad de intercambio térmico, incinerador o tea.
- Cargar por el fondo los tanques de almacenamiento y disponer de boquillas de llenado que estén ubicados por debajo de la superficie del líquido para evitar salpicaduras.
- Disponer de dispositivos de detección en los brazos de carga para detectar algún tipo de movimiento excesivo.
- Conexiones de manguera auto sellantes/ acoplamiento hermético.
- Barreras, señalización o sistemas de bloqueo para evitar el movimiento accidental o imprevisto de vehículos.

Respecto a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles asociadas a la manipulación de productos químicos en tanques abiertos y procesos de mezcla, las técnicas de prevención y control recomendadas incluyen:

- Recogida de vapores a través de extractores de aire y posterior tratamiento de flujos de gas mediante la eliminación de los compuestos orgánicos volátiles a través de aparatos condensadores o mediante tratamientos de absorción de carbón activado.
- Recogida de vapores a través de extractores de aire y conducción para su posterior tratamiento.

En general, las emisiones difusas de compuestos orgánicos volátiles son difíciles de cuantificar ya que varían con el tipo de operación, tipo de producto y tratamiento de las piezas, la velocidad de aplicación y el tiempo de operación, por ello se deben buscar alternativas de sustitución a través de solventes orgánicos con diferentes grados de aplicabilidad.

5.2. Medidas correctivas e implementación de sistemas de control

La elección del sistema de control final es una de las etapas más delicadas del proceso ya que involucra aspectos económicos, técnicos y regulatorios con el fin de obtener concentraciones de compuestos orgánicos volátiles que cumplan con la norma de emisión adoptada en esta Guía; el empresario está en plena libertad de escoger la tecnología que más convenga a sus intereses, siempre que asegure la reducción en sus emisiones (Porta et. al, 2011).

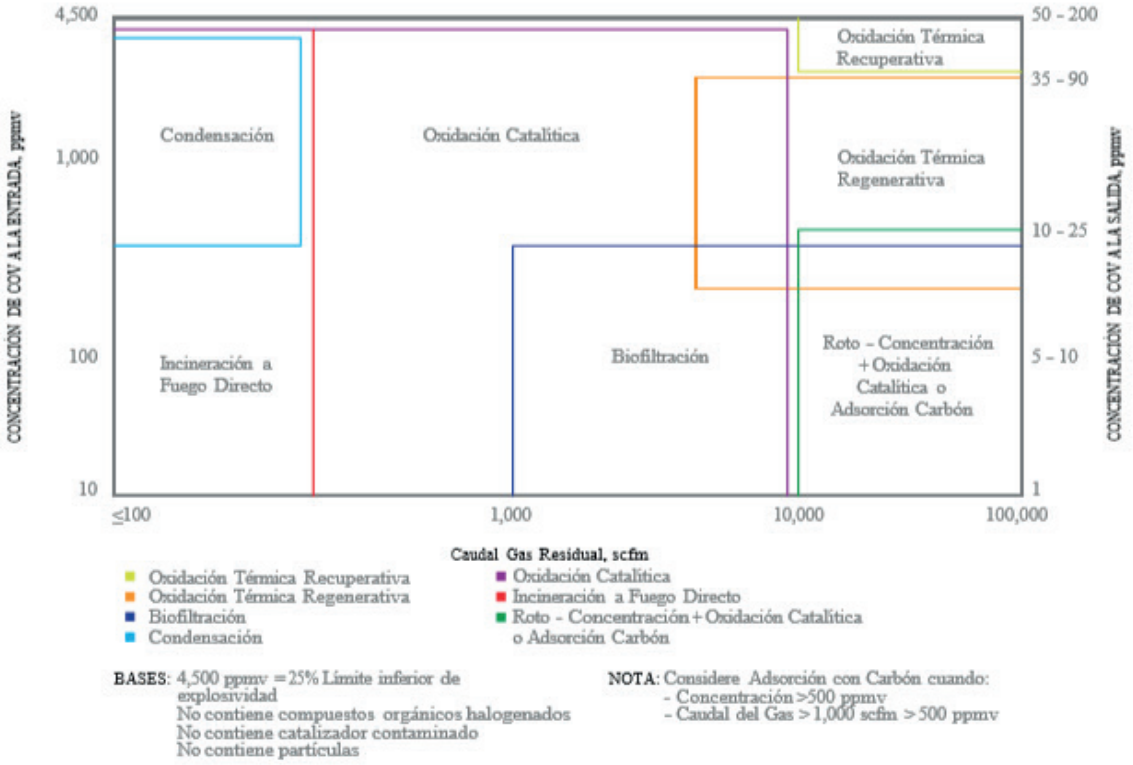
El flujo de aire y la carga de contaminantes son los dos criterios de diseño más importantes para escoger el sistema de control de compuestos orgánicos volátiles. La figura 1 es un gráfico de aplicabilidad de las tecnologías de control más populares, en ella se presentan los rangos de caudal y de concentración de compuestos orgánicos volátiles en el gas residual, en los cuales los dispositivos de control funcionan con mayor eficiencia y rentabilidad.

Para escoger el sistema de control adecuado destinado a controlar las emisiones compuestos orgánicos volátiles de la industria, se recomienda:

- El primer paso consiste en detectar los problemas, definirlos y tratar de averiguar las causas que los originan, pues para solucionarlos se tendrá que acudir a la raíz del problema, ya que, de lo contrario, las soluciones que se propongan serán temporales.
- Una vez detectado el problema se procede a estudiarlo en profundidad para proponer alternativas viables. Para esto se debe consultar a profesionales y expertos relacionados con el tema.
- Una vez estudiada la problemática, es el momento de plantear alternativas válidas y viables, por ejemplo, costos y porcentajes de remoción. El costo de equipo e instalación del dispositivo de control final de compuestos orgánicos volátiles se puede estimar mediante la utilización de *software* especializado, algunas veces disponible de forma gratuita, tal como el ACA (Air Compliance Advisor) desarrollado por la US EPA y la NASA para ayudar a la industria simulando las distintas alternativas de control al final del tubo.
- Con las alternativas ya bien definidas, se debe escoger e implementar un sistema o tecnología de control al final del tubo.
- La última etapa consiste en evaluar que la solución propuesta cumpla con la normatividad para control de los compuestos orgánicos volátiles.

En los **ANEXOS 3 y 4** se presentan las distintas alternativas de control, así como la descripción de las tecnologías de control indicadas en la figura 1.

Figura 1. Mapa de selección (basado en los costos netos más bajos) para elegir una tecnología de reducción de compuestos orgánicos volátiles.



Fuente: Adaptado de Moretti, E., 2002



6. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR DE IMPRENTA Y ARTES GRÁFICAS

6.1. Generalidades

El sector imprenta y artes gráficas está asociado a las actividades industriales clasificadas con los códigos del CIIU (Código Industrial Internacional Uniforme) en la revisión 4 adaptada a Colombia: 181 «Actividades de impresión y actividades de servicios relacionados con la impresión», incluyendo las siguientes actividades: 1811 «Actividades de impresión» que incluye la impresión de medios gráficos utilizando procesos como impresión offset, tipografía, flexografía, retrograbado, serigrafía e impresión digital, y la actividad 1812 «Actividades de servicios relacionados con la impresión» que incluye empresas editoriales de libros, diarios y publicaciones periódicas, servicios de preparación de placas, entre otros (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2012).

Mediante el proceso de impresión se reproducen escritos e ilustraciones, presionando una matriz solida sobre un tipo de soporte cualquiera, con intervención de tintas o pigmentos que permiten plasmar la impresión formando una delgada capa sobre el soporte.

Por ejemplo, la impresión de un libro depende del molde, de la forma con que ha de imprimirse de la máquina, de la prensa que ha de realizar la operación, del soporte que ha de recibir la huella impresa y del número de ejemplares que se quiera obtener. Se tienen diversos tipos de formas según el molde que se coloca en la prensa para imprimir una cara del pliego de papel. De estas se mencionan las siguientes:

- **Formas tipográficas:** se distinguen de las demás formas por tener los elementos impresores en relieve. Comprende los moldes realizados con materiales tipográficos (letras sueltas o líneas bloque, líneas, filetes, blancos, grabados, entre otros).
- **Formas calcográficas:** estas formas tienen los elementos impresores en hueco en relación con los que han de quedar en blanco y pueden ser planas cuando se obtienen mediante el grabado o cilíndricas que consisten en cilindros con una capa electrolítica de cobre que se graba con los procedimientos de formas en hueco.
- **Formas planográficas:** están constituidas por planchas en las cuales no hay elementos en relieve ni en hueco, sino que es la misma superficie la que imprime mediante efectos fisicoquímicos que actúan a nivel de los elementos impresores y de los blancos.

En estos tipos de impresión, las sustancias utilizadas habitualmente como solventes son: acetato de etilo, etanol, n-propanol, isopropanol, tolueno, metiletilcetona (MEK), metilisobutilcetona (MIBK), isopropoxietanol, ciclohexanona o xilol, que en su mayoría poseen características de riesgo para el ser humano.

6.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el proceso de imprenta y artes gráficas

La impresión y el recubrimiento de papel pueden emplear métodos de retrograbado o litográfico, que suponen la aplicación de tintas mediante prensado. Ambas técnicas poseen dos elementos

en común: la aplicación de tintas con un alto contenido de solventes y la rápida evaporación del solvente por movimiento del aire caliente a través de la superficie húmeda y el aire impregnado que sale del sistema. Este aire es una de las fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles más significativa en el proceso de imprenta.

Las tintas de impresión varían ampliamente en su composición, pero todas contienen tres componentes principales: pigmentos, aglutinantes y solventes con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles. Por esta razón, la actividad que utilice dichas tintas o solventes se clasifica como fuente de compuestos orgánicos volátiles dentro de la línea de producción.

Las principales fuentes emisión de compuestos orgánicos volátiles en este sector son las operaciones de secado y limpieza, aunque, estas emisiones son difíciles de cuantificar y clasificar ya que son emisiones fugitivas. En la mayoría de los procesos de impresión no se cuenta con sistemas o dispositivos de control de emisiones.

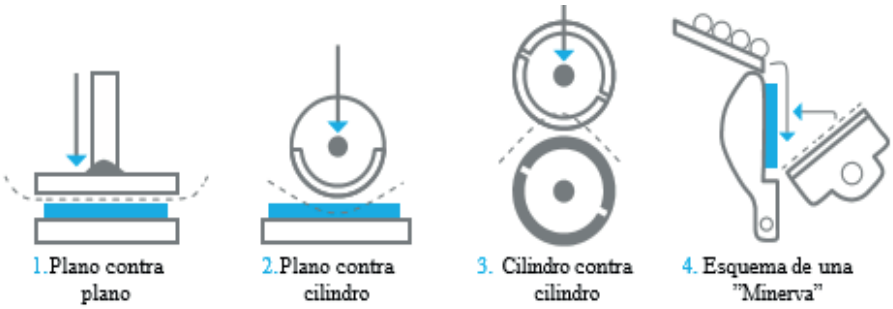
6.2.1. Descripción de los procesos de artes gráficas

Detallando los distintos procesos de impresión involucrados en el sector de imprenta y artes gráficas se puede llegar a una comprensión del tipo, toxicidad, impacto y ubicación de sus fuentes.

6.2.1.1. Impresión tipográfica

El proceso de impresión tipográfica con moldes en relieve y máquina o prensa puede ser de presión plano-plano, plano-cilíndrica o cilíndrica-cilíndrica. El mecanismo de entintado está conformado por una serie de rodillos que toman la tinta, la agitan para homogeneizarla y le proporcionan al molde la cantidad adecuada para producir una buena impresión. Los distintos tipos de mecanismos de impresión tipográfica se observan en la figura 2.

Figura 2. Mecanismos de impresión tipográfica

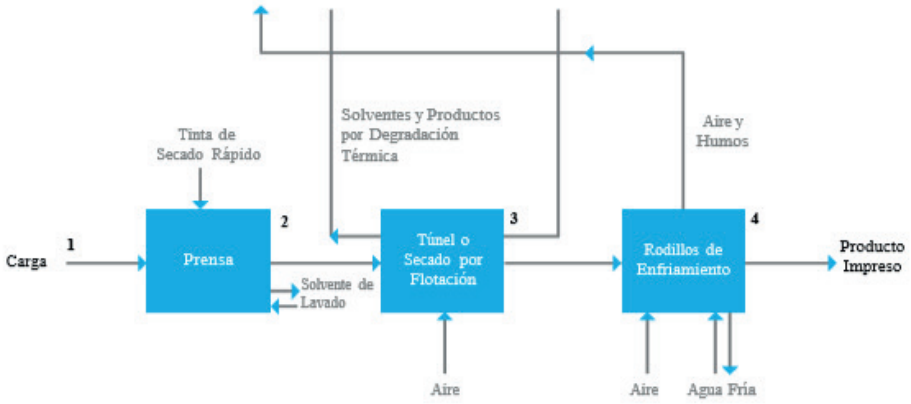


Fuente: Martínez Sicluna, 1945.

Para trabajos de publicación de impresión tipográfica se utiliza una banda que imprime el papel por un lado a la vez y seca después de cada aplicación de color. Las tintas empleadas, aplicadas en caliente, tienen un contenido aproximado de solvente del 40% en volumen, por lo cual son una fuente de emisión de compuestos orgánicos volátiles importante. En la figura 3 se indican los puntos de emisión en el proceso de impresión tipográfica que corresponden a): (U.S. EPA, 2009

- Prensado (incluidos el porta imagen y el mecanismo de entintado).
- Secado.
- Rodillo de enfriamiento.
- Producto.

Figura 3. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión tipográfica



Fuente: adaptado de AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors (U.S. EPA 2009).

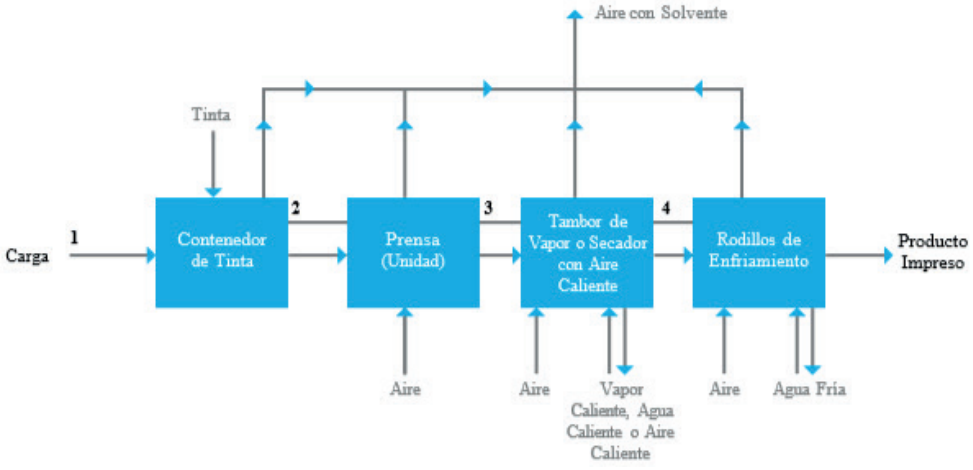
6.2.1.2. Impresión flexográfica

El proceso de impresión flexográfica se realiza con moldes de caucho o de plástico con relieve y se utilizan tintas (a base de alcohol) muy volátiles, de aproximadamente 75% en volumen de solvente orgánico para que produzca un secado casi instantáneo. Los solventes típicos incluyen glicoles, cetonas y éteres. El secado de la tinta se realiza por absorción de la tinta y evaporación del solvente, usualmente se utiliza el tambor de vapor de alta velocidad o secadores de aire caliente con temperaturas por debajo de los 120 °C (U.S. EPA, 2009).

En la figura 4 se observan los puntos de emisión para la impresión flexográfica, los cuales corresponden a:

- Contenedor de tinta.
- Prensado.
- Secador (punto de mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles).
- Rodillos de enfriamiento

Figura 4. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión flexográfica



Fuente: AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. (U.S. EPA 2009).

6.2.1.3. La calcografía (retrograbado)

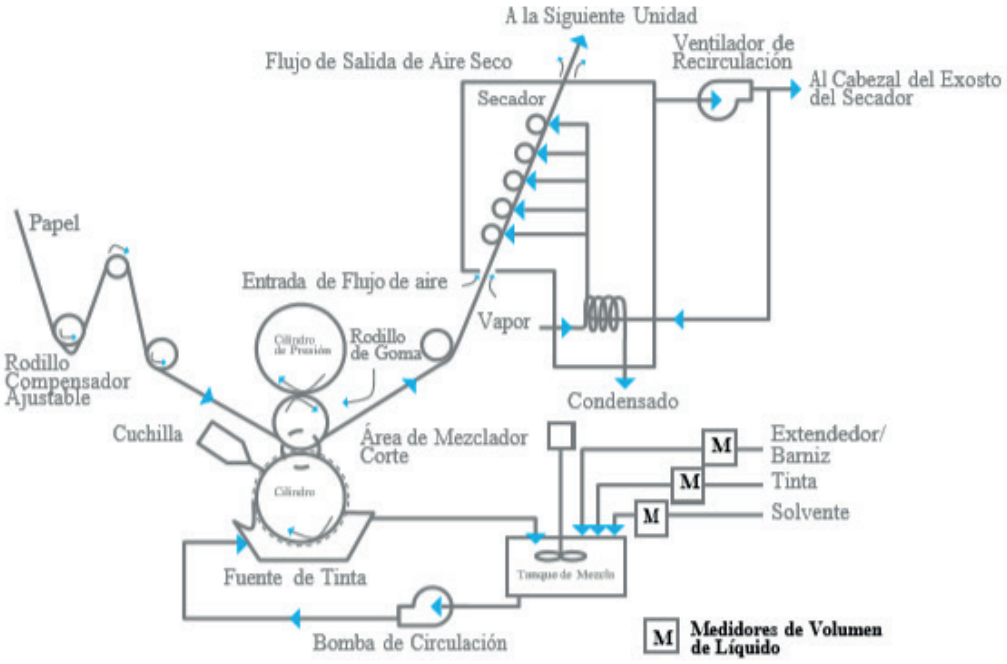
La calcografía se aplica a los procedimientos de impresión que utilizan planchas, generalmente de cobre, grabadas en hueco y las formas pueden ser hechas de forma manual (xilografía, talla dulce) o realizadas por incisiones químicas (aguafuerte, aguatinta), siempre dentro del campo del grabado artístico.

El retrograbado es el procedimiento moderno e industrial de la calcografía. Es un procedimiento de impresión rotativa que emplea formas cilíndricas cuyos elementos impresores están en hueco. La tinta muy líquida y fluida está compuesta principalmente de solventes muy volátiles.

Al imprimir, la tinta en exceso sobre el cilindro es retirada por una cuchilla de acero llamada rasqueta o raedera.

La impresión por retrograbado es similar a la impresión tipográfica, en la cual se utiliza una banda que imprime el papel por un lado a la vez y debe secarse después de la aplicación de cada color. Por ejemplo, para cuatro colores, dos caras, se emplean ocho prensas, y cada una de las veces pasa por el tambor de vapor o por medio de un secador de aire caliente a temperaturas que van desde la temperatura ambiente hasta 120 °C, donde casi todo el solvente se elimina (U.S. EPA, 2009), generando así una fuente de compuestos orgánicos volátiles.

Figura 5. Impresión en retrograbado



Fuente: AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. U.S. EPA 2009.

Las tintas utilizadas en el proceso de retrograbado están compuestas por pigmentos, aglutinantes y solventes tipo aromáticos. Actualmente se utilizan dos tipos básicos de solventes: tolueno y una mezcla de tolueno- xileno-nafta. A su vez, los solventes a base de nafta son los más comunes. El benceno está presente en ambos tipos de solventes como impureza, en concentraciones de aproximadamente 0,3% en volumen (U.S. EPA, 2009).

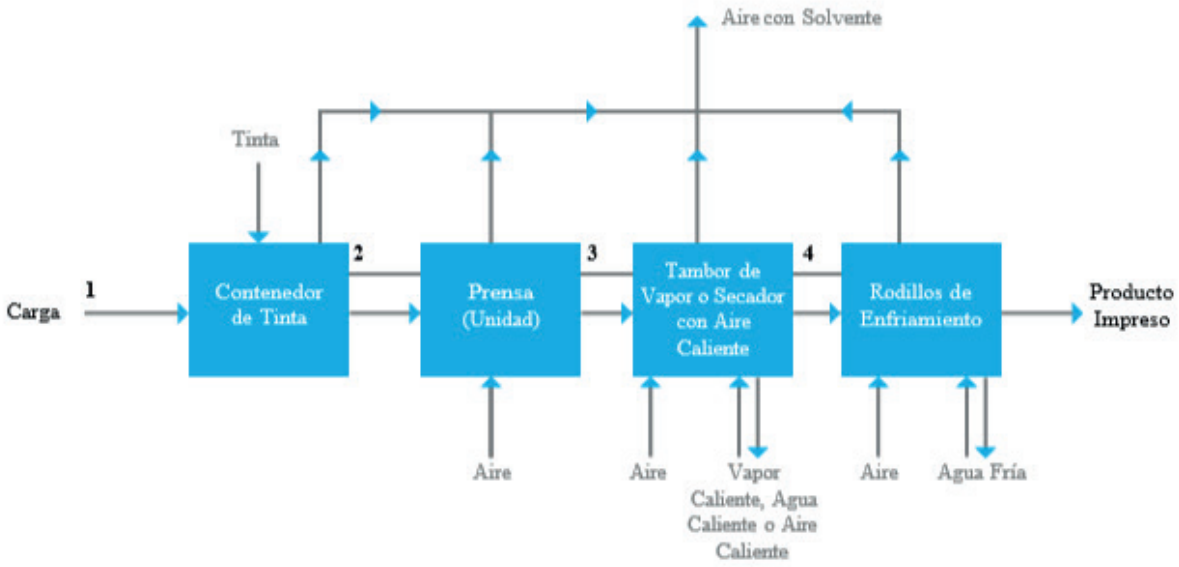
Las tintas para este proceso poseen entre 40% a 60% en volumen de solvente y los recubrimientos relacionados contienen aproximadamente 60% a 80% en volumen de solvente. La mezcla de

tinta requiere de 75% a 80% de solvente para conseguir la fluidez adecuada que se necesita en el retrograbado, lo cual indica un gran consumo de solvente en la operación..

En la figura 6 se observan los puntos de emisión para este tipo de impresión, los cuales corresponden a:

- Contenedor de tinta.
- Prensado.
- Secador.
- Rodillos de enfriamiento.

Figura 6. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión rotográfica



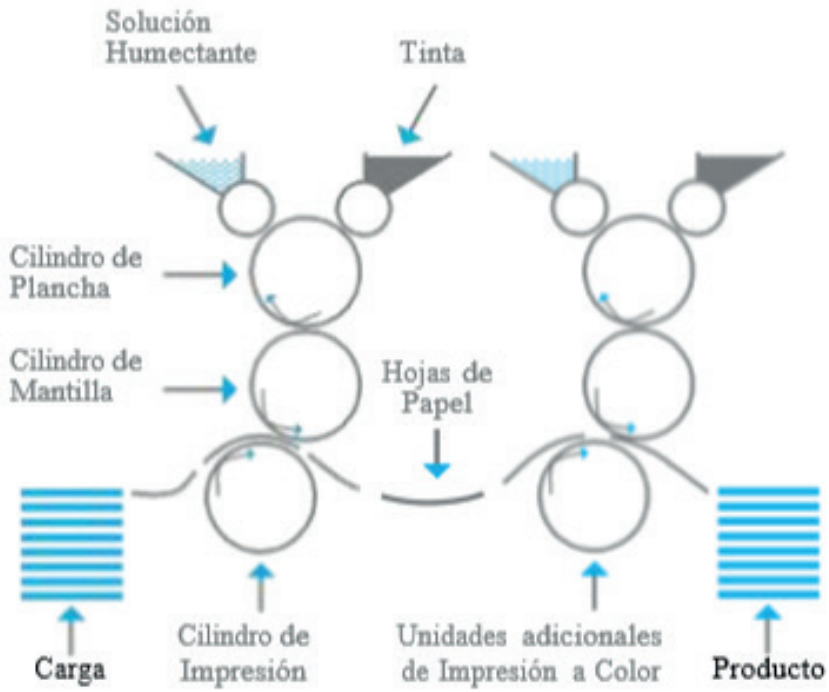
Fuente: AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. (U.S. EPA 2009).

6.2.1.4. Planografía

Este procedimiento de impresión utiliza moldes planos, es decir, planchas sin relieves ni huecos. A este tipo de técnica pertenece el *offset*, que es un sistema de impresión litográfica indirecta. Es decir, la plancha no imprime directamente en el soporte de impresión (generalmente papel), sino indirectamente, con la mantilla de caucho como intermediaria, ya que es ésta la que recibe la imagen y la transfiere al papel. Este fenómeno es posible en el *offset* gracias a la concurrencia de dos elementos que se repelen: la tinta grasa y el agua. En el proceso intervienen tres cilindros del mismo diámetro: el cilindro portaplancha, que lleva la plancha insolada con la imagen imprimible; el cilindro portamantilla, al que se fija la mantilla de caucho que ha de transferir la imagen y el cilindro de presión, que porta el papel que ha de recibir la impresión. Las máquinas o prensas de *offset* son rotativas, pero unas imprimen pliegos sueltos (las más utilizadas) y otro papel en bobina (papel continuo).

El punto de mayor emisión de compuestos orgánicos volátiles se presenta en el secado, ya que la mayoría de los compuestos orgánicos volátiles se evaporan fácilmente durante este proceso debido a que se encuentran en la tinta de bajo punto de ebullición.

Figura 7. Impresión offset



Fuente: Martínez Sicluna, 1945.

Este tipo de impresión emplea calor para el secado y utiliza también tintas de secado muy rápido. Los trabajos de publicación en este tipo de impresión utilizan tintas con aproximadamente 40% de solvente.

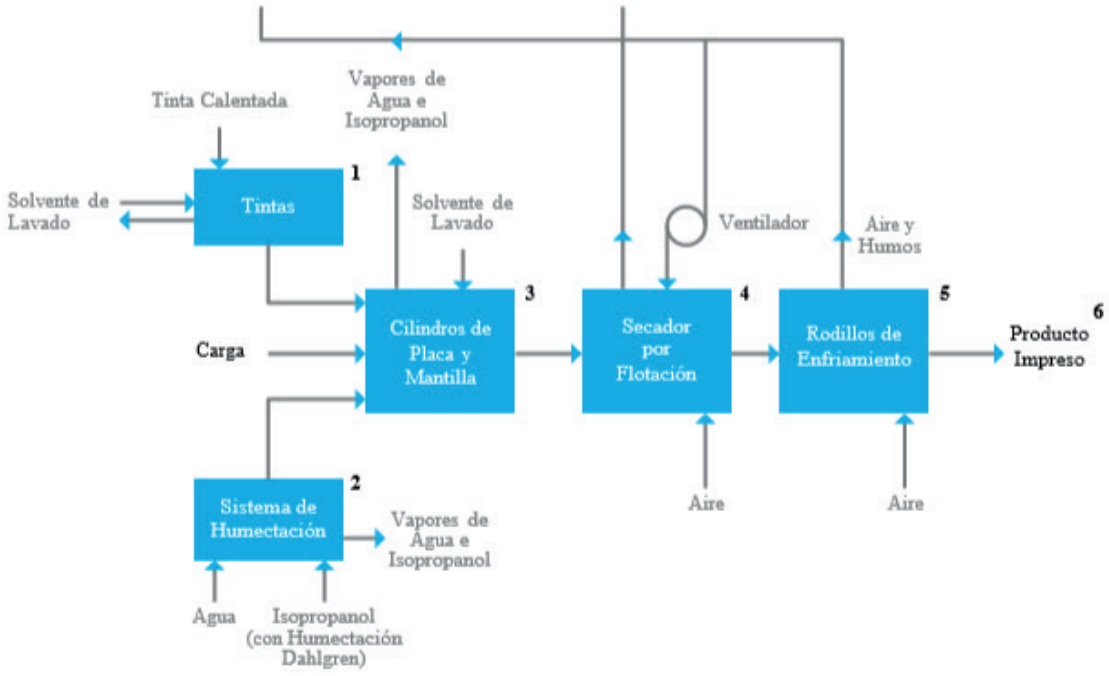
En el proceso *offset* la impresión se realiza en ambos lados del sustrato simultáneamente, atravesando un túnel o flotador de secado que se encuentra entre 200 °C y 290 °C. El secado se efectúa mediante aire caliente o llama directa; en el secador de llama directa puede degradarse térmicamente el 40% del solvente entrante. En los trabajos de impresión de periódicos no se utilizan equipos de secado y se estima que la mayor parte del solvente permanece sobre el papel en la película de tinta (U.S. EPA, 2009). Los puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión *offset* incluyen:

- Contenedor de tinta (1).
- Contenedor de solución acuosa (2).
- Rodillo cubierto por la mantilla de caucho (3).
- Secador (4).
- Rodillos de enfriamiento (5).
- Producto (6).

El alcohol se emite desde los puntos (2) y (3). Las corrientes de lavado son una fuente pequeña de emisiones en los puntos (1) y (3). El secado (4) es la fuente principal, ya que del 40% al 60% del solvente de la tinta se retira de la banda durante este proceso. En el proceso de impresión las emisiones de compuestos orgánicos volátiles varían dependiendo de la formulación de las tintas y recubrimientos empleados, tamaño y velocidad del prensado y el tiempo de operación.


iUV
iUV

Figura 8. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la impresión offset



Fuente: AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. (U.S. EPA, 2009).

6.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de imprenta y artes gráficas

La industria de las artes gráficas involucra el uso intensivo de solventes con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles altamente tóxicos. Para minimizar los riesgos ocasionados por las emisiones se pueden adoptar dos tipos de medidas: preventivas como buenas prácticas o correctivas con la instalación de equipos de control.

Medidas preventivas

Las medidas o prácticas de tipo preventivo recomendadas y de fácil aplicación en la industria para el sector de imprenta son:

- Emplear, cuando sea posible, tintas a base de agua con escaso porcentaje de solventes orgánicos (Sørensen, F. & Styhr Petersen, H.J., 1992).
- Estar al tanto de las innovaciones en el uso de nuevos productos que generan una emisión menor de contaminantes, como por ejemplo las tintas de base monosolvente, que posibilitan la recuperación más fácil y económica de los solventes.

- Estudiar alternativas a los solventes orgánicos para la limpieza de las máquinas *offset* y demás. Actualmente se dispone en el mercado de productos de limpieza de base vegetal, como aceite de soya o de colza que no contienen solventes orgánicos volátiles.
- Mantener los trapos de limpieza usados, preferiblemente, en un contenedor que disponga de un sistema hermético para prevenir la liberación de vapores.
- Instalar en las máquinas de flexografía un control de emisión de solventes o, si no es posible, un sistema de captación de estos en cartuchos que después son procesados para recoger el solvente.
- Utilizar solventes en aerosol para solventes de poco consumo que minimicen su evaporación.
- Reducir la limpieza de las piezas: la mayoría de las prensas se limpian manualmente con un trapo empapado en el solvente de limpieza. Para reducir la cantidad de solventes y el número de trapos utilizados, los tinteros deberían limpiarse solo cuando se utiliza tinta de un color diferente.
- Usar tintas de secado por radiación ultravioleta cuyo contenido queda en forma 100% sólida sobre el papel o cartón. Es recomendable en el sistema *offset*.
- Preparar planchas sin necesidad de utilizar película, es una buena opción que además ayuda a reducir residuos dado que disminuye el uso de tintas y solventes.
- Una de las opciones más innovadoras y populares en la industria gráfica mundial es la técnica de grabado mediante láser sobre material polimérico que minimiza el uso de tintas y solventes, eliminando así la producción de residuos.

6.3.2. Medidas correctivas

La industria de las artes gráficas requiere un nivel de tratamiento especial que incorpore el uso de dispositivos para el manejo de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, estos dispositivos son de captura (canalizadores) y control (correctivos), adecuados para ambientes contaminados con altas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles de elevada toxicidad. Los dispositivos de captura son apropiados para mantener las condiciones pertinentes de trabajo y salud ocupacional recomendadas por la OSHA (WHO, 1989).

Entre los dispositivos de captura se destaca el uso de campanas totales o de recintos cerrados para las actividades de impresión flexográfica, impresión de rotograbado, recubrimientos, laminado, impresión serigráfica, que tiene una eficiencia de captura cercana al 100%, además permite canalizar las emisiones a los dispositivos de control.

Así mismo, los dispositivos de control al final de tubo recomendados para este sector incluyen incineradores recuperativos e incineradores térmicos, los cuales ofrecen una eficiencia de destrucción de compuestos orgánicos volátiles cercana al 99%.

A su vez, la impresión tipográfica utiliza una variedad de tintas con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles altamente nocivos, por lo cual se recomiendan controles destructivos, como por ejemplo el uso de incinerador térmico o catalítico, de tal manera que aseguren la máxima conversión de los compuestos orgánicos volátiles a sustancias menos tóxicas (U.S. EPA, 2009).

Por último, para alcanzar un alto grado en la reducción de emisiones compuestos orgánicos volátiles, se recomienda utilizar configuraciones que combinen dispositivos de captura y control, pero, ante todo, se deben valorar y priorizar las medidas de prevención.



7. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR METALMECÁNICA Y RECUBRIMIENTO DE SUPERFICIES

7.1. Generalidades

La industria metalmecánica y de recubrimiento de superficies está basada en la trasformación de las materias primas (metal, solventes, pinturas y lacas) para la elaboración de productos de uso común, mediante la aplicación de procesos de limpieza y aplicación de películas protectoras. Este sector comprende industrias cuya actividad productiva es la fabricación de maquinarias industriales y herramientas, a la vez que son proveedoras de partes a las demás industrias metálicas.

Es una de las industrias más importantes del país y representa cerca del 14 % de la producción industrial nacional y el 13 % del empleo dentro del PIB industrial; el Valle del Cauca es uno de los departamentos principales donde se ubican las empresas metalmecánicas, en esta lista se ubican también los departamentos de Santander, Bogotá (ciudad región) y Antioquía (Betancourt-Guerrero, B., & Cruz-Jaramillo, J. A, 2018).

Las industrias que pertenecen a este sector están incluidas en el código CIIU 4ta. Revisión, en la sección C «Industrias manufactureras», en la división 24 «Fabricación de productos metalúrgicos básicos» y la división 25 «Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo», 28 «Fabricación de maquinaria y equipo n.p.c», 29 «Fabricación de vehículos automotores, remolques y semirremolques», y la división 30 y 31, además, realizan algunas de las siguientes actividades o procesos:

Tabla 5 Actividades que conforma el sector metalmecánico

Código	Actividad
2410	Industrias básicas de hierro y acero.
251	Fabricación de productos metálicos para uso estructural, tanques, depósitos y generadores de vapor.
259	Fabricación de otros productos elaborados de metal y actividades de servicios relacionados con el trabajo de metales.
281	Fabricación de maquinaria y equipo de uso general.
2910	Fabricación de vehículos automotores y sus motores.
2920	Fabricación de carrocerías para vehículos automotores, fabricación de remolques y semirremolques.
2930	Fabricación de partes, piezas y accesorios (autopartes) para vehículos automotores y para sus motores.
311	Fabricación de muebles.
309	Fabricación de otros tipos de equipo de transporte.

7.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el proceso de metalmecánica y de recubrimiento de superficies

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera en los procesos metalmecánicos son causadas por el uso de solventes y pinturas en los procesos de tratamientos de superficies (desengrase) y en el recubrimiento de superficies (UK, 2012). Las emisiones varían con el tipo de operación, tipo de producto y tratamiento de las piezas, velocidad de aplicación y tiempo de operación, por ello se deben buscar alternativas de evaluación como por ejemplo la cuantificación de los solventes utilizados (Cordero-Mora, 2013).

La actividad de acabado también genera emisiones de compuestos orgánicos volátiles, estas provienen de procesos de desengrasado y pintura (preparación y aplicación), así como también el almacenamiento de tintas, pinturas y solventes (AMVA, 2016; González, L., Beltrán, N. Y. & Picón, R. E., 2019).

Los solventes comúnmente empleados en este sector son los hidrocarburos alifáticos como el butano y el propano; alcoholes de bajo peso molecular como el etanol y aromáticos de alta toxicidad como el tolueno. También se usa con frecuencia la cetona (MEK o MIBK), así como la ciclohexanona y, en menor cantidad, esteres de ácidos aromáticos y éteres. Los solventes puros son utilizados como medios de desengrase o limpieza y en mezclas como medio de adelgazamiento de pinturas en las cuales llega a un 50% del contenido (U.S. EPA, 1981).

7.2.1. Desengrase

La operación de desengrase se realiza con anterioridad a la aplicación de recubrimientos de protección (pinturas, barnices, esmaltes o galvanizado) y del ensamblado de las piezas, así como antes y después de operaciones metalmecánicas (soldado o tratamiento térmico) y previa al empaque (Álvarez, 2009).

Los solventes orgánicos son empleados para la remoción de grasas, aceites y otras películas orgánicas de superficies de piezas elaboradas. El solvente es aplicado mediante cepillado, inmersión, rociado o enjuague. En un limpiador típico las piezas se limpian manualmente con rociado y enjuague. Después, las piezas se suspenden sobre el tanque o sobre un escurridor para recuperar el solvente. Hay dos diseños básicos de tanques que incluyen el tanque de rociado y el tanque de inmersión (con agitación para mejorar la eficiencia) (U.S. EPA, 2009).

En el desengrasado por vapor se realiza el proceso de limpieza con la ayuda de la condensación de vapor caliente de solvente sobre las partes metálicas frías. Para este proceso se emplean solventes halogenados (usualmente percloroetileno, tricloroetileno o 1,1,1-tricloroetano) (U.S. EPA, 2009).

Las operaciones de desengrasado con vapor se realizan en tanques que contienen solvente y serpentines con vapor de agua que calientan el solvente hasta su punto de ebullición, produciendo vapor saturado de solvente en la parte superior del tanque. Los objetos son insertados manual o automáticamente en la zona de vapor, condensándose éste sobre la superficie del objeto disolviendo grasas y suciedad. La operación continúa hasta que la temperatura del objeto alcanza la temperatura del vapor, finalizando la condensación (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1999).

7.2.2. Recubrimientos

Los recubrimientos superficiales abarcan operaciones como las de aplicación de pintura, laca, barniz o imprimación con propósitos decorativos o de protección (Veira, A.F., 2006). Todo recubrimiento,

bien se trate de una imprimación, barrera o acabado, se compone fundamentalmente de tres partes: pigmento, vehículo fijo o ligante y vehículo volátil o solvente.

El pigmento y el vehículo fijo son los componentes que permanecen en la película de recubrimiento una vez seca y, el vehículo volátil, utilizado exclusivamente para hacer posible la aplicación del recubrimiento, se pierde totalmente por evaporación produciendo emisión de compuestos orgánicos volátiles (Sika, 2010). El factor fundamental de tales emisiones es la cantidad de materia volátil contenida en el recubrimiento. Frecuentemente la porción volátil de los recubrimientos superficiales se acerca al 50% y la mayoría o toda esta cantidad se volatiliza, emitiéndose durante la aplicación del recubrimiento (Veira, A.F., 2006).



Los recubrimientos convencionales contienen en volumen al menos 20% de solventes para permitir su fácil manejo y aplicación. Típicamente contienen entre 70% a 85% de solventes en volumen. Estos solventes pueden ser de un componente o una mezcla de éteres, acetatos, aromáticos, hidrocarburos alifáticos o agua (U.S. EPA, 2009).

Los recubrimientos a base de agua son de diferentes tipos incluyendo emulsiones de agua, dispersión coloidal y soluble en agua y electro-recubrimiento. Las relaciones más comunes de agua/solvente en recubrimientos de tipo emulsión y dispersión son de 80/20 y 70/30 (U.S. EPA, 2009).

Existen diferentes procedimientos para la aplicación de recubrimientos entre los que se encuentran la aspersión convencional, la aspersión sin aire, la aspersión electrostática, la impresión por rotograbado, el recubrimiento por inmersión y el recubrimiento por flujo (U.S. EPA, 2009).

La aspersión convencional (atomizada por aire) es uno de los métodos de recubrimiento más versátil, pues permite pintar una variedad de tamaños y formas bajo muchas condiciones de operación. Con ella, se pueden aplicar recubrimientos convencionales o basados en agua con pocas modificaciones, sin embargo, presenta baja eficiencia y altos costos de energía en el compresor. En la aspersión por aire, la pintura es forzada a través de unas boquillas atomizadoras, reduciendo las pérdidas de pintura y por consiguiente las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, aunque se debe tener cuidado con el taponamiento del orificio de las boquillas.

La aspersión electrostática es el proceso más eficiente para pinturas de baja viscosidad; las partículas de pintura cargadas son atraídas hacia superficies con carga opuesta, alcanzando de esta manera eficiencias de 90% a 95%, no obstante, las superficies interiores son difíciles de recubrir (U.S. EPA, 2009).

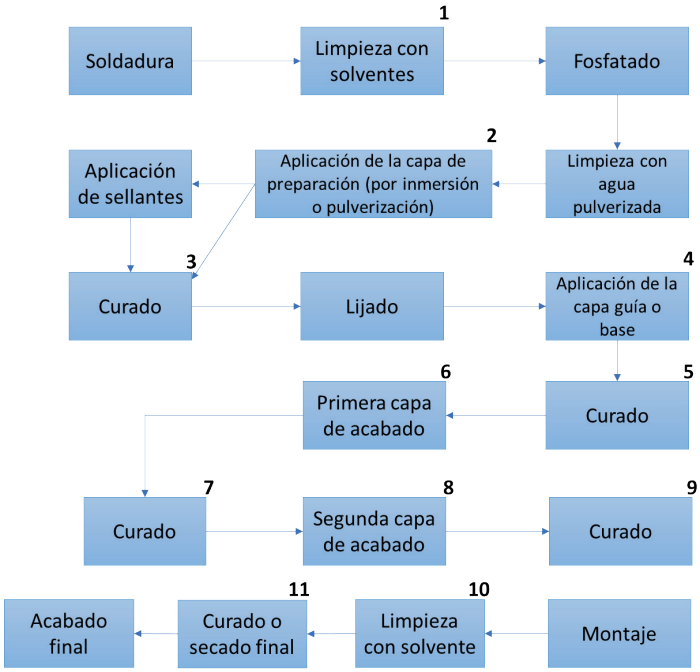
Una actividad importante en Colombia es la del recubrimiento automotriz, la cual utiliza los elementos básicos del recubrimiento general y le añade complejidad debido a las distintas capas de recubrimiento que se deben aplicar.

El recubrimiento de la superficie de una carrocería de automóvil es una operación de múltiples etapas llevada a cabo en una línea de montaje a nivel industrial en las fábricas automotrices. Este tipo de procesos no es exclusivo de la gran industria y se lleva a cabo también en talleres denominados de embellecimiento automotor o de latonería, que realizan las mismas actividades a pequeña escala (recubrir pequeñas fracciones de superficie dañadas en accidentes, choques o por desgaste de la pintura). A continuación, se describen algunas actividades típicas de este proceso:

- El uso de solventes con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles, utilizados como medios de dilución para pinturas, como desengrasantes y limpiadores de superficies.
- El fosfatado o proceso de pasivación de superficies metálicas, en el cual, mediante aspersión o inmersión, se aplican sales de fosfato, que reaccionan químicamente con la superficie del metal para formar una capa o película cristalina de fosfato no soluble que protege de la corrosión al resto del metal.
- El curado o proceso de polimerización que implica la reacción química del sistema de resinas por medio de calor y que permite a la pintura alcanzar las características físicas adecuadas. En talleres a menor escala no se usa el curado, la pieza se deja secar “al aire” lo que ocasiona emisiones difusas de compuestos orgánicos volátiles y una calidad inferior en la adhesión de las capas de recubrimiento.
- La aplicación de capa guía o base, que es la capa intermedia que permite la adición de la capa superficial o de acabado y garantiza un acabado uniforme.
- La utilización de pinturas con contenido de compuestos orgánicos volátiles, utilizadas en el recubrimiento de la superficie.

El esquema típico de la línea de producción de recubrimientos se presenta en la figura 9.

Figura 9. Puntos de emisión de compuestos orgánicos volátiles en recubrimiento automotriz



Fuente: adaptado de AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. (U.S. EPA 2009).

Inmediatamente se procede a aplicar la capa guía para darle grosor de película, rellenando así imperfecciones de la superficie. Existen guías base agua o solvente. Paso seguido se lleva a curado para adherir correctamente la capa guía.

Finalmente, el recubrimiento se realiza en etapas alternadas de aplicación y curado de la pintura de acabado para formar la capa superior, la cual proporciona el color y apariencia de la superficie.

Las capas finales se aplican de una a tres veces para asegurar un espesor de revestimiento adecuado. Como mínimo, la capa de acabado final se hornea en un horno de alta temperatura.

Los acabados de la industria del automóvil han sido tradicionalmente lacas y esmaltes base solvente. Las tendencias recientes están encaminadas a materiales con alto contenido de sólidos (polvo) y bajo en solvente.

7.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de metalmecánica y recubrimiento de superficies

7.3.1. Medidas preventivas

La industria de recubrimiento y metalmecánica maneja cargas muy altas de solventes y compuestos orgánicos volátiles, señalando la necesidad de un manejo preventivo basado principalmente en la

optimización de los recursos, la introducción de tecnologías más limpias y la sustitución de insumos, así como buenas prácticas de reutilización y reciclaje. Según lo anterior, las recomendaciones para este tipo de sector son:

- Utilizar válvulas de conservación para los recipientes o tanques que almacenen líquidos volátiles; estas válvulas previenen la evaporación, por lo cual permiten una correcta presurización y despresurización de los almacenamientos sin pérdida de vapores.
- Utilizar solventes no basados en compuestos orgánicos volátiles, reemplazándolos por alternativas verdes como por ejemplo solventes a base de ácido cítrico.
- Instalar sistemas de captura en zonas de manipulación de solventes que faciliten la canalización y la ventilación del ambiente de trabajo.
- Usar recipientes adecuados o recomendados por el fabricante de las materias primas.
- Asegurarse de que para todos los recipientes se siga un programa de mantenimiento y estén en buenas condiciones.
- Almacenar solventes peligrosos en zonas con baja probabilidad de drenaje.
- Definir zonas de contención alrededor de los tanques de almacenamiento y facilitar la captación de posibles derrames por medio de tanques de almacenamiento o alrededor de las extractores y campanas.
- Disponer medios mecánicos para la recolección de la pintura sobrante del proceso de recubrimiento.
- Realizar planes de prevención de fugas durante la fase de diseño y operación de la instalación.
- Evitar la necesidad de limpieza disminuyendo o eliminando la causa de la suciedad.
- Maximizar la eficiencia de la operación de limpieza y preparación de superficies utilizando una dosificación adecuada.
- Estandarizar el uso de solventes y la formulación de los recubrimientos o pinturas a aplicar.
- Filtrar el solvente sucio para retirar los sólidos y poder reutilizarlo en la limpieza, con lo cual se estima que se ahorra hasta el doble de solvente.
- Disminuir la cantidad de enjuague en solvente.
- Ahorrar solventes inspeccionado las piezas antes del recubrimiento para no tener que volver a preparar y recubrir.
- Emplear pinturas de base acuosa cada vez que sea posible.
- Implementar cintas de arrastre, centrifugado u otros medios mecánicos en el desengrase que recolecten los lodos del baño con alto contenido de solvente.
- El diseño del sistema de desengrasado debe ser lo más corto posible para evitar emisiones fugitivas y facilitar la captación de estas por medio de extractores y campanas.
- Disponer medios mecánicos para la recolección de la pintura sobrante del proceso de recubrimiento.
- Evitar el consumo excesivo de solvente y pintura aplicando correctamente las sustancias, con distancias y tiempos adecuados para alcanzar la calidad deseada.
- Utilizar cabinas de pintado con recirculación.
- Reducir las turbulencias en la cabina de pintado para un terminado más uniforme y de esta manera economizar insumos.
- Usar un lavador de pistolas para la limpieza del equipo evitando el uso excesivo de solventes.
- Reemplazar las tecnologías convencionales a base de solvente y adoptar alternativas como recubrimientos con alto contenido de sólidos, a base de agua, recubrimiento en polvo y

especialmente aquellos recubrimientos de curado por radiación que facilitan la recuperación del solvente.

7.3.2. Medidas correctivas

Los compuestos orgánicos volátiles emitidos por el uso de solventes empleados para la preparación de piezas metálicas y superficies para recubrimientos, se eliminan al incinerarlos o al oxidarlos, transformándolos en dióxido de carbono y agua. La reacción química requiere conducir las emisiones y someterlas a altas temperaturas bien sea empleando intercambiadores de calor o cámaras de combustión.

Los sistemas más comunes para reducir los compuestos orgánicos volátiles en la industria metalmecánica son la incineración térmica y la incineración catalítica, siendo en la primera mayor la demanda de energía para alcanzar las temperaturas y una remoción de 90% a 99% (U.S. EPA, 2002), mientras que la catalítica necesita un consumo de energía más bajo para alcanzar las temperaturas requeridas por el proceso y puede llegar a niveles de remoción de entre 95% a 98% (U.S. EPA, 2002). Se considera mucho más económico y efectivo el uso de medidas preventivas como el reemplazo de solventes y la reducción en la intensidad del uso de solventes a la hora de minimizar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, llegando a niveles de reducción de hasta un 80% (U.S. EPA, 2009).

La eficiencia de algunas de las estrategias de reducción de compuestos orgánicos volátiles específicas para la industria del recubrimiento de superficies se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Eficiencia de control

Método	Opción de reducción o control	Reducción %
Reemplazo de insumos	Sustitución por recubrimiento a base de agua.	60-90
	Sustitución por recubrimiento bajo en solvente.	40-80
	Sustitución por polvo de recubrimiento.	92-98
Tecnología de tratamiento de efluente	Añadir incineradores.	95

Fuente: U.S. EPA, 1998.



8. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO

8.1. Generalidades

El sector de plásticos comprende toda aquella industria cuya actividad productiva involucra la transformación de materiales poliméricos provenientes del petróleo o de fuentes renovables. Esta transformación se realiza a partir de materia prima en forma de polvo, gránulos, escamas, líquidos o en forma estándar como láminas, películas, barras, tubos, formas estructurales y laminados, identificadas con el código CIIU 222 «Fabricación de productos de plástico».

Una de las más amplias ramas de la industria de los plásticos comprende las empresas que producen, a partir de películas y láminas, artículos como cortinas, impermeables, artículos inflables, tapicería, equipajes, artículos de tocador, cocina, entre otros. Por lo tanto, incluyen actividades específicas de producción como moldeo y conformado, ya sea moldeado por prensa, moldeado por inyección, prensado por inyección, moldeado por soplado de cuerpos huecos, termoformado, calandrado, refuerzo y recubrimientos como pintura dura, maquinado, unión o colado en moldes.

8.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del plástico

8.2.1. Cadena productiva del sector plástico

La cadena productiva del plástico se divide en dos grandes procesos o eslabones: el primero es conocido como el de obtención de plásticos, en el cual por reacciones químicas orgánicas de condensación o adición se obtienen cadenas poliméricas a partir de moléculas estructuralmente idénticas conocidas como monómeros.

El segundo gran eslabón es conocido como de moldeo, que consiste en un proceso mediante el cual los polímeros (producto de la obtención de plásticos) son deformados a través de medios mecánicos para dar forma a productos finales tales como envases, tuberías y bolsas, entre otros.

8.2.1.1. Moldeo

El moldeo de los plásticos tiene como objeto dar las formas y medidas deseadas a un plástico por medio de un molde. El molde es una pieza hueca en la que se vierte el plástico fundido para que adquiera su forma. Existen distintos tipos de moldeo dependiendo de su forma final y la aplicación de esfuerzos mecánicos.

A. Moldeo a alta presión

En esta clase de moldeo el plástico se calienta y funde para luego inyectarse a alta presión en un molde o boquilla que da su forma definida.

Básicamente existen tres tipos de moldeo a presión que se describen a continuación:

- **Compresión:** en este tipo de moldeo, el plástico granulado es fundido por calentamiento y luego comprimido entre las dos partes de un molde mediante la acción de una prensa hidráulica que le da al proceso la potencia necesaria para alcanzar la compresión adecuada.
- **Extrusión:** es el proceso que moldea productos de manera continua, ya que el material es forzado por un tornillo sinfín a través de un cilindro que termina en una boquilla, produciendo segmentos homogéneos de longitud indefinida. Al cambiar la forma de la boquilla se pueden obtener barras de distintos perfiles (cilíndricas, cuadradas, hexagonales y demás). El producto final se enrosca o se corta, dependiendo del uso al que estará destinado.
- **Inyección:** este tipo de moldeo consiste en introducir el plástico granulado o *peletizado* dentro de un cilindro, donde se funde por acción del calor. Al interior del cilindro hay un tornillo sinfín que actúa como el émbolo de una jeringuilla. Cuando el plástico se reblandece lo suficiente, el tornillo sinfín lo inyecta a alta presión en el interior de un molde de acero para darle forma. El molde y el plástico se enfrían mediante un sistema de refrigeración interno o externo.

Una variante de los moldeos por extrusión y por inyección es el procedimiento de extrusión-soplado o inyección-soplado en el que el plástico que va saliendo de la boquilla se comprime entre las dos mitades de un molde a la vez que se inyecta aire a presión. El material plástico se adapta a la forma del molde obteniéndose una pieza hueca.

B. Moldeo a baja presión

El moldeo a baja presión se emplea para dar formar a láminas de plástico mediante la aplicación de calor y presión hasta adaptarlas a un molde.

- Vacío: consiste en aplicar vacío a la pieza absorbiendo el aire que hay entre la lámina y el molde, de manera que la lámina se adapte a la forma deseada. Este tipo de moldeo se emplea para la obtención de envases de productos alimenticios o envases que reproducen la forma de los objetos que han de contener.
- Soplado: en este proceso se inyecta o se sopla aire a presión contra la lámina de plástico hasta adaptarla al molde. Esta técnica se emplea para la fabricación de piezas huecas.

C. Colada

Existen dos tipos de colada. La colada fría es el remanente de polímero solidificado que queda en los canales y que es necesario cortar de la pieza final. La colada caliente mantiene al polímero en estado fundido para continuar con la inyección. Con esta técnica se ahorra una considerable cantidad de plástico, aunque presenta algunos inconvenientes: los pigmentos deben tener mayor resistencia a la temperatura, el polímero en sí aumenta su poder calórico, teniendo que diseñar el molde especialmente para esto, entre otros.

D. Espumado

El espumado es el proceso por el cual, mediante medios mecánicos o reacciones químicas, se logra insertar aire u otro gas dentro de una masa de plástico de manera que se formen estructuras porosas. Por este procedimiento se obtiene la espuma de poliestireno (porexpán), la espuma de poliuretano (gomaespuma), entre otros. Con estos materiales se fabrican colchones, aislantes térmicos, esponjas, embalajes, cascos de ciclismo y patinaje, plafones ligeros y otros.

E. Calandrado

Consiste en hacer pasar el material plástico a través de unos rodillos que producen, mediante presión, láminas de plástico flexibles de diferente espesor. Estas láminas se utilizan para fabricar hules, impermeables o planchas de plástico de poco grosor.



8.2.2. Fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles en la industria del plástico

Las principales sustancias emitidas por esta industria son los monómeros, vapores de solventes y aditivos involucrados en la reacción y proceso de deformación. El plástico terminado y almacenado emite cantidades pequeñas de monómeros compuestos orgánicos volátiles de manera espontánea (Montoya A., J., González B., H., & Ossa, J., 2010).

En la producción de plásticos los compuestos orgánicos volátiles se encuentran en: materias primas o monómeros, solventes con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles, así como otros líquidos volátiles producidos y emitidos durante la reacción de polimerización.

Las fuentes identificables de emisión compuestos orgánicos volátiles son: almacenamiento de materias primas, tanques de mezcla, tanques de reacción o polimerización, secadoras, extrusoras y el almacenamiento del plástico terminado.

8.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del plástico

Medidas preventivas

Las medidas preventivas recomendadas para la cadena productiva del plástico recopilan prácticas de producción más limpia y optimización del uso de los insumos, entre ellas se destacan:

- Implantar control de calidad en el proceso productivo para evitar desperdicio de solventes.
- Trabajar a velocidades adecuadas en el proceso para evitar generación de vapores.
- Canalizar mediante dispositivos de captura las fuentes de compuestos orgánicos volátiles identificadas.
- Canalizar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles mediante dispositivos tipo extractor de las fuentes difusas, así como de los lugares de almacenamiento tanto de materias primas como de productos terminados e incluso de las áreas de transporte del proceso.
- Reutilizar los solventes reciclando y recuperando. Si por alguna razón no es posible recuperar el solvente, se debe enviar la emisión a las calderas, como el aire de combustión enriquecido.
- Eliminar el abuso de los solventes compuestos orgánicos volátiles en actividades de limpieza.
- Instalar válvulas de presión y vacío en los recipientes de almacenamiento para que en el momento de cargue o descargue se reduzcan las pérdidas de vapores de compuestos orgánicos volátiles.
- Manejar fechas de caducidad de los productos que contengan compuestos orgánicos volátiles y de los materiales que conforman los recipientes de estos.
- Comprar las resinas a granel, disminuyendo su precio de costo y produciendo menos pérdidas de materia prima, dado que en recipientes grandes se reduce el líquido adherido hasta en un 5% de la cantidad original, mientras que en recipientes pequeños la materia prima adherida puede llegar al 20% dependiendo de la viscosidad del insumo.
- Estandarizar los procesos e instalar sistemas mecánicos de dosificación en las etapas de mezclado, aplicación de solventes y plastificado, optimizando la operación.
- Realizar revisiones periódicas de tanques, instalaciones y equipos donde se manipule solvente o monómero para evitar pérdidas por fuga.
- Realizar el llenado de tanques de mezcla con monómeros y solventes por el fondo para evitar la evaporación de compuestos orgánicos volátiles. Esta práctica disminuye en 15% las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el llenado.

8.3.2. Medidas correctivas

Los sistemas de control recomendados para la industria del plástico dependen de la eficiencia de la reacción de polimerización. Si la eficiencia es baja se recomiendan tecnologías de control recuperativo (recuperación de los monómeros) y para una alta eficiencia, las tecnologías de control destructivas.

Los sistemas de control utilizados en la industria de producción del plástico involucran el uso de equipos de recuperación de vapores como absorbedores y condensadores con eficiencias

de remoción de entre el 90% y 95%, permitiendo así reutilizar algunas sustancias, reducir gastos operativos y, por consiguiente, disminuir los costos referidos a las materias primas.

Para las industrias que produzcan plástico en operaciones continuas se recomienda específicamente controlar sus emisiones con dispositivos de condensación debido a las bajas eficiencias en algunos de sus procesos y por la recuperación de todo el monómero presente en los vapores generados. Por otra parte, si la eficiencia de reacción es alta se puede adoptar un sistema de control tipo tea o un incinerador, teniendo en cuenta que lo que se quema es monómero (materia prima), ocasionando pérdidas para la industria. Adicionalmente cuando en el proceso se realicen purgas o emisiones eventuales se recomienda la utilización de teas, en todo caso se deberán considerar las distancias a población expuesta y asegurar la debida dispersión de los gases emitidos por la quema.

También se recomienda el almacenamiento de insumos en tanques de techo flotante para reducir las pérdidas por evaporación; el control de las emisiones fugitivas se canalizará por captura a través de sistemas de vacío. Para la fabricación de productos de plástico por moldeo se recomiendan configuraciones que combinen dispositivos de captura y controles de tipo destructivos, como teas con una alta eficiencia de reducción de compuestos orgánicos volátiles hasta del 98%.





9. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA DEL CAUCHO

9.1. Generalidades

El sector de la industria del caucho y sus productos abarcan los procesos de elaboración de caucho básico natural, caucho básico sintético y la fabricación de productos y artículos para usos diversos. La clasificación de este sector se encuentra referenciado en la división 22 grupo 221 «Fabricación de productos de caucho» según la versión 4 de códigos CIIU, que incluye actividades como la fabricación de llantas, neumáticos y otros productos de caucho.

Una de las características fundamentales de la cadena del caucho es la diversidad en el tamaño de las empresas que la conforman. En Colombia el 75% de las empresas procesadoras de productos derivados del caucho son empresas pequeñas, el 22% del total son medianas y el resto lo constituyen grandes empresas (DANE, 2003).

La mayoría de las empresas que procesan caucho lo hacen principalmente para producir llantas y neumáticos para automóviles, camiones, aeronaves y maquinaria de uso agrícola, al igual que diferentes clases de productos intermedios o derivados (U.S. EPA, 2008). La producción de llantas en Colombia está concentrada en la actualidad en dos grandes empresas: la multinacional Good Year e Icollantas-Michelin, que cubren aproximadamente el 60% de la demanda nacional. El 40% restante lo cubren las importaciones asiáticas, principalmente de China.

El mercado nacional de llantas para vehículos de trabajo pesado, en particular buses y tractocamiones, lo cubren Good Year con un 54% de la producción e Icollantas-Michelin con un 32%, en sus plantas de Yumbo y Bogotá respectivamente. El resto lo cubren Bridgestone y Pirelli-Firestone.

A continuación, se presentan aspectos clave relacionados con el sector de la industria del caucho y se dan lineamientos orientados a la reducción de emisiones de los compuestos orgánicos volátiles derivados de los procesos y actividades de producción.

9.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del caucho

Según su origen y morfología existen dos tipos de caucho: el caucho natural que proviene del sangrado de las especies arbóreas moráceas y euforbiáceas como la *Hevea Brasiliensis* de donde se obtiene el cis-1,4-polisopreno; y el caucho sintético, que es un producto de reacciones de polimerización a partir de corrientes olefínicas o aromáticas derivadas del petróleo, específicamente de monómeros como el etilbenceno y el estireno (Beliczky, L.S., & Fajen, J., 1994).

El etil-benceno y el estireno son la base para elaborar productos de amplia demanda comercial tales como el estireno-butadieno o SBR (del inglés Styrene-Butadiene- Rubber), el polibutadieno o PBR (del inglés Poli-Butadiene-Rubber), el polisopreno, el alquilonitrilo butadieno o el neopreno , entre otros.

La industria del caucho también cubre productos intermedios o formas básicas como son el caucho no vulcanizado, planchas, hilos, varillas, perfiles de caucho no reforzados, soportes elásticos, soportes para puentes y para la construcción, sellos de seguridad para acoples de compresores,

revestimientos, rodillos, guantes, tubos y mangueras no endurecidas, entre otros. En el presente aparte se hace énfasis en los procesos de manufactura de llantas y neumáticos.

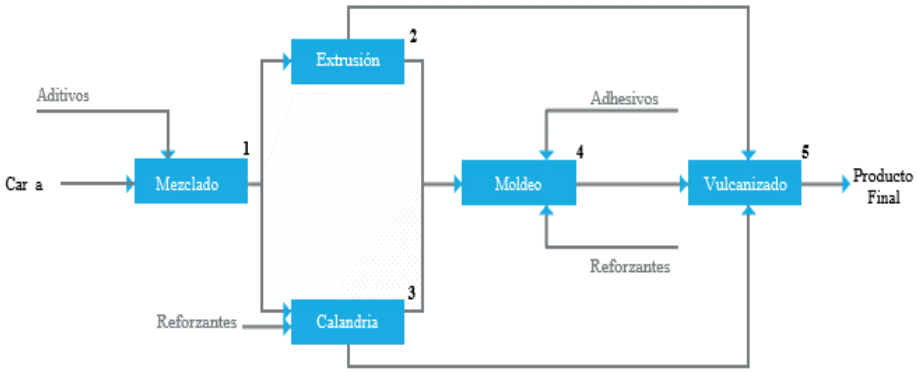
9.2.1. Proceso del caucho natural

El látex obtenido de la *Hevea* puede comercializarse ya sea en forma de concentrado o sometido a procesamiento para comercializarlo como caucho seco. El proceso consiste en tratar la base con ácido para coagularla y llevarla posteriormente a la etapa de cilindrado en rodillos con el fin de elaborar planchas que puedan ser cortadas o granuladas, tamizadas o embaladas según el tamaño.

Las formulaciones empleadas para la fabricación de compuestos que utilizan caucho natural son muy parecidas a las utilizadas para elaborar derivados de los cauchos sintéticos. El uso de aceleradores, retardantes, antioxidantes, materiales de relleno, reforzadores, agentes plastificantes y vulcanizantes, son los más comúnmente utilizados como insumos en el proceso de producción (Beliczky, L.S., & Fajen, J., 1994).

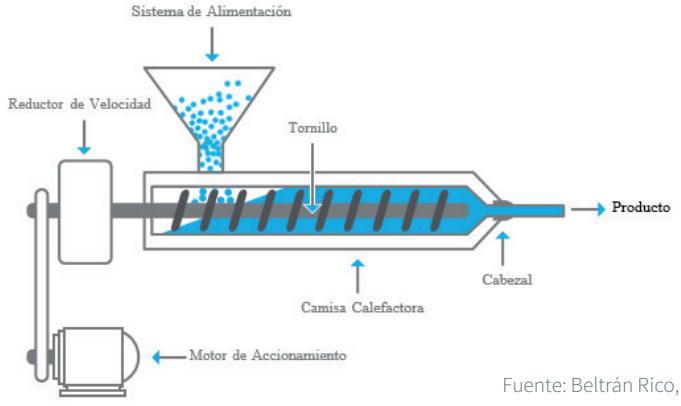
La manufactura del caucho, y en particular el proceso de elaboración de llantas comprende cinco etapas: mezclado, extrusión, calandrado, moldeo y vulcanización. En la figura 10 se presenta un proceso típico de fabricación de llantas para vehículos automotores. Los números en negrilla corresponden a los aspectos (actividades por etapa) e impactos ambientales relacionados con el proceso.

Figura 10. Proceso de obtención de llantas para automotor



Fuente: adaptada de AP-42, Compilation, Afair Pollutant Emission Factors. (U.S. EPA, 2009).

Figura 11. Proceso de extrusión



Fuente: Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A., 2012.

La primera etapa del proceso la constituye el mezclado de la carga que consiste en preparar un compuesto de caucho natural o sintético, añadiendo diferentes tipos de aditivos a la mezcla de gomas. El tiempo de operación, el calor suministrado y las características fisicoquímicas de la materia prima, son variables operativas que influyen en la calidad del producto.

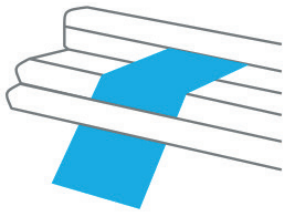
Dentro de los aditivos comúnmente empleados se tienen acelerantes como el óxido de zinc, retardantes, antioxidantes, sostenedores, reforzantes de consistencia como el carbón y vulcanizantes como el azufre. La figura 11 representa el material de base ya mezclado que pasa a extrusión.

Durante la etapa de extrusión el caucho molido y preparado con los diferentes aditivos se mezcla con otros para darle un perfil o forma determinada a través de una tobera o dado y es sometido a temperaturas del orden de los 160 °C. Una vez perfilado, el caucho es enfriado con agua o aire industrial para obtener las condiciones de estabilidad requeridas.

El calandrado es la etapa en la cual se obtienen láminas o perfiles específicos de caucho. En esta etapa se da forma y espesor definido a la lámina, al igual que en el recubrimiento final con caucho se da forma a determinado tipo de fibras o tejidos con el fin de brindarles mayor consistencia.

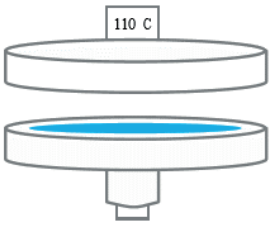
El caucho extrusado y calandrado es moldeado en la forma requerida, previa adición de adhesivos y materiales reforzantes antes de pasar a vulcanización. La figura 12 representa la lámina de caucho que sale de calandrado.

Figura 12. Lámina de calandrado



Fuente: Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A., 2012.

Figura 13. Equipo vulcanizador



Fuente: Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A., 2012.

La vulcanización se lleva a cabo a unos 110 °C y el caucho moldeado se introduce en equipos de prensas especiales para hacerlo cambiar del estado termoplástico al termoelástico, según especificaciones del producto final. El caucho, originalmente flexible, se convierte en un material menos flexible y de mayor durabilidad. En la figura 13 se muestra el esquema de un equipo de vulcanizado para llantas de vehículos automotores.

Durante el proceso de fabricación la mayoría de los productos y subproductos del caucho requieren la adición de sustancias para mejorar sus propiedades. Es así como se utilizan sustancias adhesivas, cementadores, retardantes, aditivos, reforzantes, entre otros. La mayoría de estas sustancias, como

los adhesivos, por ejemplo, se adicionan al caucho mezclándolos con solventes que contienen altos porcentajes de compuestos orgánicos volátiles.

Para determinar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles es necesario conocer primero el tipo de sustancia emitida. Pruebas realizadas en plantas para producir neumáticos de automotores, han demostrado que las emisiones típicas en estos procesos consisten en hidrocarburos de bajo peso molecular de la familia de los C_6 a C_8. No se descarta la presencia de hidrocarburos más pesados en razón a las altas temperaturas que se manejan en las distintas etapas del proceso productivo (U.S. EPA, 2009).

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, debido al uso de sustancias adhesivas, retardantes o solventes en general, se determinan a partir de balances de materiales asumiendo pérdida del 100% del solvente utilizado hacia el ambiente atmosférico y en algunos casos por medición directa (U.S. EPA, 2009).

Entre los aspectos e impactos ambientales generados durante las etapas de procesamiento y elaboración de productos del caucho, se resaltan los siguientes:

A. Mezclado, extrusión y calandrado

Durante el proceso de preparación del caucho es necesario agregar diferentes clases de aditivos y adhesivos en cada una de estas etapas, es allí donde se emiten altas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles al ambiente debido al alto contenido de vapores que poseen los solventes utilizados. Se estima que al menos un 40% del insumo empleado en la mezcla corresponde a hidrocarburos de bajo peso molecular y alta volatilidad, como el n-hexano y el n-heptano dentro de los hidrocarburos alifáticos y el benceno, el tolueno y xilenos dentro de los aromáticos.

B. Vulcanizado

Durante la vulcanización el mayor impacto se tiene al momento de destapar el autoclave para sacar las piezas de caucho elaboradas. Las temperaturas de manejo y las altas presiones del sistema son factores importantes durante esta operación. En consecuencia, el impacto hacia el ambiente atmosférico por presencia de compuestos orgánicos volátiles es bastante significativo.

Es importante anotar que, durante el mantenimiento y la limpieza de los equipos, ya sean los tanques de mezclado, las extrusoras o autoclaves para vulcanización, también se generan altas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles hacia el ambiente.

9.3. Prácticas, medidas y equipo utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el sector de la industria del caucho

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, la industria del caucho involucra el uso frecuente de solventes y otras sustancias con un alto contenido de compuestos orgánicos volátiles. Para reducir las emisiones al final del tubo, se pueden adoptar medidas preventivas o correctivas de control.

9.3.1. Medidas preventivas

En la industria del caucho la forma efectiva de reducir las emisiones es mediante la aplicación de las siguientes medidas:

- Eliminar o sustituir materiales con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles. Se recomienda reemplazar el hexano con heptano u octano (Nafta) que son sustancias menos volátiles y producen menor neblina de compuestos orgánicos volátiles.
- Realizar las operaciones de producción de caucho en sistemas cerrados y evitar el contacto con los monómeros libres, por ser sustancias con efectos cancerígenos como el estireno y el butadieno, clasificadas por la OSHA como de alto riesgo (WHO, 1989).
- Evitar el desperdicio por uso excesivo de solventes, estandarizando los procesos y respetando las dosificaciones requeridas.
- Realizar las operaciones que involucren adición de sustancias que contienen compuestos orgánicos volátiles en ambientes con dispositivos y circuitos de conducción que succionen los vapores y humos en los diferentes puntos críticos del proceso, para recolectarlos y enviarlos posteriormente hacia los dispositivos de control al final del tubo.
- Recurrir a métodos de aspiración localizada para controlar la neblina y los humos que se produzcan durante la preparación y el mezclado de los compuestos del caucho y en los procesos de acabado.
- Canalizar mediante dispositivos de captura las emisiones difusas de compuestos orgánicos volátiles que se presentan en los sitios de almacenamiento de insumos y en las áreas de acopio de productos terminados.
- Utilizar sistemas de dosificación que permitan emplear solo las cantidades requeridas, evitando así la evaporación y las pérdidas de vapores.
- Minimizar el uso de solventes en el proceso de limpieza de superficies y moldes o emplear medios mecánicos de limpieza utilizando talcos como antiadherentes.
- Realizar el proceso de vulcanizado en campanas cerradas de extracción. Los vapores y humos del proceso son emisiones con alto contenido de aceites, compuestos de azufre y compuestos orgánicos volátiles.

9.3.2. Medidas correctivas

De manera similar a las demás industrias que involucren polimerización con alta eficiencia de reacción, se recomienda el uso de controles de emisión destructivos y, para los procesos con reacciones de baja eficiencia, se recomiendan sistemas recuperativos y de reciclado.

Entre los dispositivos de recuperación para empresas con alta producción y procesos continuos, se encuentran los condensadores que pueden ofrecen eficiencias entre 70% y 95% de recuperación de compuestos orgánicos volátiles.

Una buena opción para este sector son los controles de asorción con carbón para emisiones pequeñas con eficiencias que varían entre 50% y 90% dependiendo del diseño y condiciones de operación. Además, existen los métodos destructivos de incineración con eficiencias de hasta 99% en la destrucción de compuestos orgánicos volátiles, aunque son de mayor costo.



10. ESTACIONES DE SERVICIO Y CENTROS DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

10.1. Generalidades

Esta actividad se contempla en el código CIIU Revisión 4 en la división 46 «Comercio al por mayor y en comisión o por contrata, excepto el comercio de vehículos automotores y motocicletas» en el grupo 466, clase 4661 «Comercio al por mayor de combustibles sólidos, líquidos, gaseosos y productos conexos».

De acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía (Minenergía, 2015), las estaciones de servicio son establecimientos en los cuales se almacenan y distribuyen combustibles líquidos derivados del petróleo, dependiendo del tipo de combustible las estaciones pueden ser de servicio de aviación, servicio automotor, servicio fluvial y marítimo. En este apartado nos vamos a concentrar en las estaciones de servicio automotriz.

La cadena productiva de productos derivados del petróleo representa un aporte significativo de emisiones evaporativas, desde el proceso de refinación, pasando por almacenamiento, llenado de carro tanques, transporte y distribución. El uso de combustibles líquidos altamente volátiles, como lo es la gasolina, ocasiona mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles entre los que se encuentran compuestos como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y xilenos (BTEX), además de emisiones no metánicas (Medina *et ál*., 2016). Algunos compuestos orgánicos volátiles habitualmente emitidos por la industria petroquímica son: etano, popileno, cloruro de vinilo, ciclohexano y tetrahidrofurano (UdeA, 2013).

El transporte y distribución de productos derivados del petróleo representa un aporte significativo de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en este sector, del estudio realizado por el Schifter et. Al., (2002) titulado "*Contribución del ciclo de distribución de gasolina en la emisión de compuestos orgánicos volátiles en el Área Metropolitana de la Ciudad de México*", los resultados indican que las perdidas evaporativas en la carga de los camiones representan el 91% del total de las emisiones, en los tanques de almacenamiento alrededor de un 7% y en los accesorios y tuberías un 2%

10.2. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de servicio y centros de almacenamiento de combustible

En la industria petrolera enfocada en la producción y comercialización de combustibles líquidos, se han identificado dos etapas donde puede ocurrir la evaporación de combustible:

10.2.1. Cadena de producción de combustibles

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, s.f.-a), las emisiones evaporativas del transporte y comercialización de combustibles líquidos se clasifican en:

- Carga, tránsito y pérdidas durante el transporte de combustibles.
- Estaciones de servicio.
- Grandes tanques de almacenamiento.

10.2.1.1. En las estaciones de servicio

10.2.1.1.1. Descargue de combustible

En esta actividad el ingreso del carro tanque debe ser con una velocidad máxima de 10km/h, y no debe impedir el desarrollo de las operaciones; al momento del descargue se deben seguir todas las medidas de seguridad y contar con un kit para derrames.

10.2.1.1.2. Almacenamiento de combustible

Para almacenar combustible hay dos tipos de tanques utilizados, de techo fijo y techo flotante, ambos tienen pérdidas durante el reposo (expulsión de vapor del tanque debido a la expansión) y las pérdidas en operación (llenado y vaciado), la U.S. EPA cuenta con un programa llamado **Tanks** diseñado para estimar emisiones de compuestos orgánicos volátiles en tanques de almacenamiento (Cordero-Mora, L.M., 2013) que requiere de la información específica sobre el tanque y su contenido y genera un estimado de las emisiones anuales o estacionales, este es un mecanismo que le permite a las empresas calcular pérdidas por operación.

10.2.1.1.3. En los vehículos

De acuerdo con la definición presentada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la *Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas* (Minambiente, 2017), las emisiones evaporativas hacen referencia a la suma de todas las emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del gas metano (NMVOC del inglés *Non methanic volatile organic compunds*) relacionadas con el combustible, pero no derivadas de la combustión de éste.

En los vehículos las emisiones se asocian al tanque, al sistema de inyección y a las líneas de combustible (SEMARNAT, 2005).

- Emisiones del motor en caliente: ocurren debido a la volatilización del combustible en el sistema de alimentación después de que el motor se ha apagado.
- Emisiones de operación: ocasionadas por las fugas de combustible líquido o vapor, presentes cuando el motor está en funcionamiento.
- Emisiones durante la recarga de combustible: emisiones desplazadas desde el tanque de combustible del vehículo durante la recarga.
- Emisiones diurnas: ocurren por el aumento en la temperatura del combustible y el aumento en la presión del vapor de éste, por causa de temperaturas ambientales altas durante las horas de luz, el aporte de calor del sistema de escape o el calor reflejado por la superficie de circulación.
- Emisiones en reposo: se presentan cuando el motor no está en funcionamiento, son causadas por fugas de combustible y la permeabilidad del vapor a través de las líneas de alimentación del combustible.

10.3. Prácticas, medidas y equipos utilizados para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de servicio

Las actividades preventivas y correctivas no solo abarcan el proceso de distribución de la gasolina, sino también, la utilización de técnicas para reducir la volatilidad en la gasolina:



10.3.1. Medidas en las estaciones de servicio

En las EDS se propone incorporar un sistema de recuperación de vapores (SRV), para recuperar y controlar la emisión de los vapores de gasolina producidos en las operaciones de transferencia de este combustible en las terminales de almacenamiento y estaciones de gasolina. Estos sistemas generalmente se dividen en tres fases:

Recuperación de vapor en la fase 0

- La recuperación de vapor en esta fase corresponde al control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles durante la transferencia del combustible del tanque de almacenamiento de la terminal de almacenamiento al camión cisterna. Los vapores que se recuperan en esta etapa son transferidos desde el camión cisterna hacia la unidad procesadora de vapores.

Recuperación de vapor en la fase 1

- La recuperación de vapores en esta fase corresponde a los generados durante la descarga de la gasolina desde el camión cisterna al tanque de almacenamiento de la estación de gasolina. El sistema de recuperación de vapores en esta fase corresponde a la instalación de accesorios y dispositivos para la recuperación y control de las emisiones de vapores de gasolina generados durante la transferencia. Los vapores recuperados son transferidos de nuevo a la terminal por condensación, adsorción o incineración.

Recuperación de vapor en la fase 2

- La recuperación de vapor en la fase 2 ocurre durante el tanqueo de los vehículos en las estaciones de gasolina, el vapor en el tanque del combustible es desplazado por el mismo combustible. En este sentido, el equipo de recuperación de vapor es diseñado para recuperar el vapor que ha sido desplazado y lo retorna al tanque de almacenamiento de combustible.

Otra medida aplicable es la instalación de sistemas de detección de fugas.

10.3.2. Medidas aplicadas al combustible (gasolina)

Estas medidas van enfocadas a disminuir la volatilidad de la gasolina, esta es una característica que se mide generalmente en términos de la presión de vapor Reid o RVP por sus siglas en inglés. Una volatilidad alta equivale a una capacidad de evaporación alta, lo que contribuye directamente a las emisiones evaporativas. Una volatilidad baja, asegura que la evaporación de combustible sea baja lo que favorece la reducción de pérdidas. Algunas medidas son:

- La instalación de debutanizadoras, que tienen como función retirar los hidrocarburos de bajo peso molecular (principalmente C_4, así como parte de C_3 y C_5).
- Mejoramiento de los sistemas de destilación atmosférica con el fin de aumentar la fracción de hidrocarburos livianos recuperados.
- Optimización de los debutanizadores y torres de destilación existentes para maximizar la recuperación de hidrocarburos volátiles.

México es uno de los países que ha desarrollado normas oficiales orientadas a instalar los SRV y verificar la eficiencia de estos, tales como: la norma NOM-004-ASEA-2017 «Sistemas de recuperación de vapores de gasolinas para el control de emisiones en estaciones de servicio para expendio al público de gasolinas -Métodos de prueba para determinar la eficiencia, mantenimiento y los parámetros para la operación» y la norma NOM-EM-002-ASEA-2016 «Que establece los métodos de prueba y parámetros para la operación, mantenimiento y eficiencia de los sistemas de recuperación de vapores de gasolinas en estaciones de servicio para expendio al público de gasolinas, para el control de emisiones».

Este tipo de normas pueden ser una guía para Colombia en la elaboración de futuras normas nacionales aplicables a las estaciones de servicio (EDS).

Algunas técnicas para controlar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de servicio son:

Tabla 7. Técnicas de control de emisiones en las estaciones de servicio

Técnica	Ventajas y desventajas	Funcionamiento
Separación por membrana	Separación y recuperación de hidrocarburos tales como alcanos y alquenos. Son flexibles, de fácil manejo, bajo uso de energía además de ser un equipo compacto. Es aplicable a estaciones de servicio y estaciones de entrega de productos en las plantas petroquímicas.	Cuando la presión del tanque de almacenamiento alcanza un valor predeterminado, se activa un compresor que extrae el exceso de aire. Una parte del vapor de hidrocarburos se condensa y la otra se devuelve al tanque como líquido.
Separación por condensación	La gasolina líquida recuperada se puede observar directamente. Los costos de inversión y operación de este sistema de recuperación son bastante altos, puesto que, para lograr mantener la concentración requerida de salida de los vapores, es necesaria una temperatura de condensación muy baja.	Consiste en condensar el vapor pasándolo a gasolina líquida utilizando refrigerantes y condensadores. La eficiencia de recuperación de vapor depende principalmente de la temperatura de condensación y la eficiencia de transferencia de calor del condensador.
Sistema de recuperación de vapores	Existen varias tecnologías para este proceso, unas recuperan compuestos orgánicos volátiles en los tanques de los vehículos y otras en las EDS. También puede utilizarse en instalaciones petroleras. El uso en conjunto de las tecnologías presenta una disminución en las emisiones evaporativas y no generan uso de mantenimiento. No tienen una capacidad de tratamiento alta y requieren un área amplia.	Consiste en dos etapas: 1. Consiste en la recuperación de compuestos orgánicos volátiles que escapan al ambiente durante el proceso de abastecimiento de los tanques subterráneos de una estación de servicio. 2. Consiste en la entrada de la tecnología ORVR (de On Board Vapor Recovery), que es un sistema de recuperación de vapores, principalmente equipada en los vehículos, para evitar la emisión de compuestos orgánicos volátiles durante el llenado de gasolina en los vehículos.

Fuente: UdeA, 2013; AMVA, 2016; Medina, F. J. M., Jiménez, F. W. M., & Alpuche, E. P., 2016.



11. CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

11.1. Cuantificación por medio de balance de masa

Conocido también como balance de materiales, el balance de masa es un método utilizado para estimar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles para las fuentes donde se conocen las cantidades o flujos de entrada de la materia prima al sistema, así como los flujos la salida y su composición química (SEMARNAT, 2005).

El método de balance de masas puede aplicarse en primera instancia como una buena estimación en los casos en donde no haya datos disponibles de muestreos en la fuente o factores de emisión aplicables. Tal es el caso de una fuente fugitiva cuyo muestreo puede ser muy difícil o costoso. Entonces, es recomendable aplicar técnicas de estimación de emisiones a partir del balance de materiales. En forma general, un balance de masa puede expresarse de la siguiente manera, siempre y cuando no exista reacción química:

Ecuación 1

$$\text{Materia}_{\text{entrada}} = \text{Materia}_{\text{salida}}$$

El término materia de salida del proceso puede estar constituido por los siguientes términos:

Ecuación 2

$$\text{Materia}_{\text{salida}} = \text{Materia}_{\text{recuperada}} + \text{Materia}_{\text{emitida}}$$

Es decir, la emisión (materia emitida) se puede cuantificar mediante el balance de materia por medio de la siguiente expresión:

Ecuación 3

$$M_{\text{emitida}} = M_{\text{entrada}} - M_{\text{recuperada}}$$

El método del balance de masa puede aplicarse al proceso productivo en general, es decir a la actividad completa, como a un circuito específico o parte del mismo proceso. El grado de precisión de este método comparado con el uso de factores de emisión es más conveniente puesto que evita sobreestimación o subestimación de las emisiones. A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación del uso del balance de masa para una planta de recubrimientos:

Ejemplo 1:

Calcular las emisiones mensuales de compuestos orgánicos volátiles de una desengrasadora de piezas metálicas que deben recubrirse. Se agregan 200 litros de solvente al comienzo del mes y adicionalmente se añaden 30 litros como restitución para compensar las pérdidas. A fin de mes, se envían 200 litros de solvente residual hacia un destilador y 0.5 kg de residuos sólidos son recolectados para su disposición final. De una caracterización realizada a los materiales se encontró que el solvente a emplear contiene 100% de compuestos orgánicos volátiles, el solvente residual un 95% de compuestos orgánicos volátiles y el residuo sólido 8% de compuestos orgánicos volátiles. La densidad del solvente es de 1.5 kg/L. El balance para un mes de operación es el siguiente:

$$= \left(200\text{L} * 1.5\ \text{kg/L} * \frac{95\%\ \text{compuestos orgánicos volátiles}}{100}\right)$$
$$+ (0.5\text{kg} * 8\%\text{compuestos orgánicos volátiles}/100) = 2804\ 5\ \text{kg} + 0.04\ \text{kg}$$
$$= 285.04\ \text{kg}$$

$$M_{\text{emitida}} = 345\ \text{kg} + 285.04\ \text{kg} = 59.96\ \text{kg} \approx 60\ \text{kg}$$

Entonces, la emisión de compuestos orgánicos volátiles de esta unidad desengrasadora es 60 kg/mes, lo que equivale a 720 kg/año.

11.2 Cuantificación mediante factores de emisión

El factor de emisión para un determinado contaminante se define como la relación numérica existente entre la cantidad de contaminante que ha sido emitido hacia la atmósfera dividido por unidad de producción tomada como referencia.

Hay dos tipos de factores de emisión: los basados en procesos y los que se fundamentan en censos. Los primeros se utilizan para estimar emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados en encuestas o en balances de materiales (SEMARNAT, 2005).

La cuantificación por factor de emisiones es un procedimiento sencillo que permite estimar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de un proceso o fuente fija dependiendo básicamente de las cantidades producidas y particularmente del factor de emisión adecuado para el proceso que se está evaluando.

La cuantificación, utilizando el factor de emisión, se realiza mediante un sencillo procedimiento matemático, para lo cual la U.S. EPA (AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factor) recomienda la siguiente expresión (U.S. EPA, 2009):

Ecuación 4

$$E = A * E_F$$

Donde:

- E = emisiones de compuestos orgánicos volátiles (kg de compuestos orgánicos volátiles /año).
- A = producción anual (kg de producto /año).
- EF = factor de emisión (kg de compuestos orgánicos volátiles /kg de producto).

Estas expresiones no incluyen la presencia de dispositivos de control de reducción de emisiones, entonces, cuando la corriente efluente es tratada con una técnica correctiva de control, la nueva expresión para cuantificar la emisión se amplía de la siguiente manera:

Ecuación 5

$$E = A * E_F * \left(1 - \frac{E_R}{100}\right)$$

Donde:

- E_F = eficiencia de reducción de emisiones

La expresión permite estimar las emisiones totales de compuestos orgánicos volátiles generadas por un proceso determinado, dependiendo de la cantidad producida y del factor de emisión adecuado. El factor de emisión para cada actividad productiva puede ser consultado en distintos textos o en bases de datos especializadas, como por ejemplo el AP-42 de la U.S. EPA y el Intergovernmental Panel on Cimate Change -IPCC.

Ejemplo 2:

Una fábrica de tuberías de PVC produce 20,000 unidades al año. Cada tubería tiene un peso promedio de 2.5 kg, adicionalmente se tiene un sistema de control de emisiones que remueve el 70% de los compuestos orgánicos volátiles. Para evaluar los escenarios en caso de falla del sistema de control, se necesita a) estimar las emisiones anuales del proceso sin sistema de control y b) con sistema de control de emisiones:

a. La estimación de las emisiones totales, sin o en caso de falla del sistema de control (E_R=0) se calcularán de la siguiente manera:

Remplazando en la ecuación (4) con E_R=0, se obtiene:

$$E = 50000 * 7.7 \quad E_F = 7.77 * 10^{-03} \frac{\text{kg compuestos orgánicos volátiles}}{\text{kg de plástico}}$$

El valor estimado de las emisiones totales de compuestos orgánicos volátiles del proceso de producción de PVC sin sistema de control es 388.6 kg compuestos orgánicos volátiles/año.

b. Con sistema de control, se realizará la estimación de la siguiente manera:

Se calcula la masa total de plástico PVC producida al año:

$$A = \text{unidades} * \text{peso unitario}$$

$$A = 20000 \frac{\text{unidades}}{\text{año}} * 25 \frac{\text{kg plástico}}{\text{unidad}} = 50000 \frac{\text{kg plástico}}{\text{unidad}}$$

El factor de emisión del proceso se presenta en el anexo 8.

$$E_F = 7.77 * 10^{-03} \frac{\text{kg compuestos orgánicos volátiles}}{\text{kg de plástico}}$$

Se posee un sistema de control, el cual ofrece el 70% de reducción de compuestos orgánicos volátiles, E_R=70.

Reemplazamos los valores obtenidos en la ecuación (5), se obtiene:

$$E = 50000 * (7.77 * 10^{-03}) * \left(1 - \frac{70}{100}\right) = 116.6 \frac{\text{kg compuestos orgánicos volátiles}}{\text{año}}$$

Por lo tanto, el valor estimado de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en el proceso de producción de PVC al año es de 116.6 kilogramos.

11.3. Cuantificación por medición directa

Para el desarrollo de la medición directa de compuestos orgánicos volátiles que se generen en la fuente fija, se adoptan los métodos promulgados en el Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos (CFR) (U.S EPA, 2015), que son los siguientes:

Tabla 8. Métodos de medición directa para compuestos orgánicos volátiles.

Método	Título	Descripción
24	Determinación del contenido de material volátil, contenido de agua, densidad, volumen de sólidos y peso de sólidos en la actividad de recubrimiento de superficies.	Método de medición de compuestos orgánicos volátiles, en lacas, pinturas, barnices y demás productos de recubrimiento.
24 A	Determinación del contenido y densidad del material volátil en la actividad de recubrimiento de tintas por rotograbado y publicaciones rotograbadas relacionadas.	Método de medición de compuestos orgánicos volátiles, en tintas, solventes y diluyentes de la industria gráfica.
25	Determinación de las emisiones gaseosas orgánicas totales diferentes al metano dadas como carbón.	Método de medición de compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano reportándolos como carbono total, en efluentes gaseosos de fuentes fijas.

Método	Título	Descripción
25 A	Determinación de la concentración de gases orgánicos total empleando un analizador de ionización de llama.	Método de medición de compuestos orgánicos volátiles alcanos, alquenos aromáticos y árenos, reportados en términos de propano (gas de calibración del método), en efluentes gaseosos de fuentes fijas.
25 B	Determinación de la concentración de gases orgánicos totales total empleando un analizador de infrarrojo no dispersivo.	Método de medición de compuestos orgánicos volátiles, determina la concentración total de vapores orgánicos en una muestra de gas, principalmente alcanos.
204 B	Determinación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en una corriente capturada.	Método de determinación del contenido de compuestos orgánicos volátiles presente en una corriente de captura proveniente de las operaciones de recubrimiento e imprenta. (No aplicable en condiciones de oxidación, ni presencia de material carbonizado).
204 C	Determinación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en una corriente capturada (técnica de dilución).	Método de determinación del contenido de compuestos orgánicos volátiles presente en una corriente de captura proveniente de las operaciones de recubrimiento e imprenta. (No aplicable en condiciones de oxidación, ni presencia de material carbonizado).
204 D	Determinación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en una corriente libre (caja total temporal).	Método de determinación del contenido de compuestos orgánicos volátiles presente en una corriente de captura proveniente de las operaciones de recubrimiento e imprenta.
204 E	Determinación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la corriente libre de recinto.	Método de determinación del contenido de compuestos orgánicos volátiles presente en una corriente de captura proveniente de las operaciones de recubrimiento e imprenta.

Fuente: US EPA, 2015; US EPA, 2006.

Estos métodos de referencia serán aceptados por la autoridad ambiental para la cuantificación de compuestos orgánicos volátiles en Colombia. Existen otros métodos alternativos de medición que serán aceptados previa aprobación de la autoridad ambiental.

11.3.1. Criterios para medición directa de compuestos orgánicos volátiles

Para facilitar la trasmisión de la información técnica requerida para un muestreo y un análisis adecuado de compuestos orgánicos volátiles al público en general, se presenta una breve aproximación a los requisitos técnicos básicos comprendidos por los métodos de referencia de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos -U.S. EPA.

El objetivo de esta sección técnica es definir los requisitos mínimos que deberán cumplir las chimeneas o conductos donde se realicen las medidas directas de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, y, en general, brindar las condiciones de medición directa de compuestos orgánicos volátiles en fuentes fijas por métodos directos.

Dentro del presente capítulo se definen los requisitos que deben cumplir:

A. La sección de medición.

B. El plano de muestreo.

Además, se recoge la metodología para verificar la homogeneidad del flujo y definir los puntos donde se realizará el muestreo en rejilla, para muestreo isocinético o flujo no homogéneo.

El alcance incluye todas las fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles de las instalaciones en las que se desarrollen actividades industriales donde se manejan solventes y sustancias con

alto contenido de compuestos orgánicos volátiles, tanto nuevas como existentes (conforme a lo establecido en la Resolución 909 de 2008 de Minambiente y el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (Minambiente, 2010).

Para obtener calidad, fiabilidad, comparabilidad y repetitividad en la información obtenida mediante las mediciones, es necesario escoger secciones y sitios de medición adecuados, que garanticen también que las muestras sean representativas y fieles a las emisiones reales del proceso.

Para ello, el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (Minambiente, 2010). recomienda aplicar los métodos de referencia 1, 1A y 2 de la U.S. EPA, así como los métodos de medición directa de emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

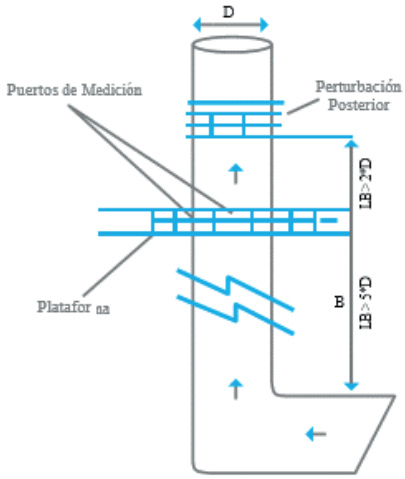
Para permitir un muestreo representativo, la sección del conducto de gas residual debe asegurar un perfil de flujo ordenado, libre de turbulencia y retroflujo, donde se localiza un plano de medición que proporciona una rejilla de puntos de muestreo suficientes para poder evaluar la distribución de los compuestos orgánicos volátiles objeto de medición y los parámetros auxiliares (presión, temperatura, humedad, caudal, entre otros).

- Las instalaciones deben permitir el acceso seguro del equipo de trabajo al sitio de medición (plataforma). Además, se debe garantizar que en dicho sitio el personal pueda trabajar con seguridad y manejar de forma correcta los equipos necesarios.
- La sección de medición es el tramo de ducto o chimenea en el cual se logran condiciones estables de flujo y alrededor de la cual se localizan las instalaciones adecuadas para ejecutar la medición de compuestos orgánicos volátiles. El plano de muestreo está situado dentro de la sección de medición donde se ubican los puertos de muestreo para realizar el muestreo por rejilla, recomendado por los métodos de referencia de medición de compuestos orgánicos volátiles.
- La sección de medición debe permitir la toma de muestras y la realización de ensayos en un plano de muestreo apropiado. Se deben cumplir las siguientes especificaciones:

La sección de medición debe estar localizada en un tramo del ducto que cumpla con los siguientes requisitos:

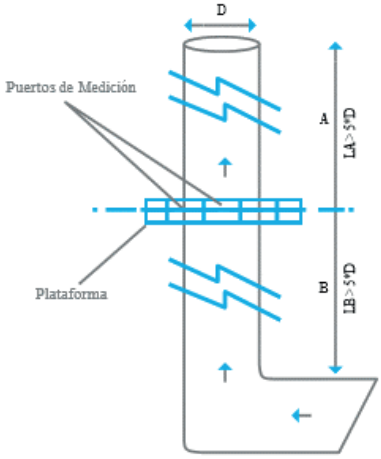
A. Fuentes nuevas o modificadas: que, entre la sección de medición y la perturbación anterior a esta, en el sentido del flujo de los gases (codo, conexión, cambio de sección, etc.), exista al menos una distancia de cinco diámetros hidráulicos de conducto recto y una distancia de dos veces el diámetro hidráulico respecto a la perturbación posterior (ver figura 14). Teniendo en cuenta que si la perturbación posterior es la salida de descarga del ducto a la atmósfera (figura 15), la distancia debe ser de cinco veces el diámetro hidráulico para evitar variaciones en el flujo por las diferencias de presión (criterio heurístico).

Figura 14. Sección de medición con respecto a la perturbación



Fuente: U.S. EPA, 2009.

Figura 15. Sección de medición con respecto a la salida del ducto



Fuente: U.S. EPA, 2009.

Para geometrías distintas a los ductos circulares se adopta la medida del diámetro hidráulico según la relación:

Ecuación 6

$$D = 4 * \frac{A}{P}$$

Donde:

- D: diámetro hidráulico.
- A: área transversal del ducto o fuente.
- P: perímetro de la fuente.

Por ejemplo, para determinar el diámetro equivalente de una fuente rectangular o cuadrada se utiliza la siguiente relación:

Ecuación 7

$$D = 2 * \frac{a}{a+b} * b$$

Donde a y b son los lados de la sección interior rectangular o cuadrada.

B. Para fuentes antiguas, en las cuales se dificultan modificaciones estructurales, se debe cumplir al menos con que entre el plano de muestreo y las perturbaciones anterior a éste, en el sentido del flujo de los gases, exista al menos una distancia de dos diámetros hidráulicos de conducto recto y 0.5 veces el diámetro hidráulico del conducto a cualquier perturbación posterior.

Estos requisitos deben permitir que se puedan tomar muestras representativas de la emisión en el plano de muestreo para la determinación del flujo volumétrico y de la concentración másica de contaminantes.

C. En caso de que el ducto o chimenea no permita la localización de la sección de medición debido a distintas causas, la empresa deberá dirigirse a la autoridad local encargada de la medición y control de emisiones para solicitar una evaluación técnica especial. Estos aspectos se consideran cumplidos si son respetados los requisitos para la sección y sitio de medición de acuerdo con los métodos y procedimientos adoptados en el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (Minambiente, 2010).

Así las fuentes nuevas y las modificaciones estructurales de las existentes se ajustan al protocolo antes citado cumpliendo las condiciones que se detallan a continuación.

La correcta realización del control de las emisiones requiere unas condiciones de flujo determinadas en el plano de muestreo, es decir, un perfil de flujo ordenado y estable, sin turbulencias ni reflujo, de manera que puedan establecerse la velocidad y la concentración de compuestos orgánicos volátiles a determinar en el gas residual.

11.3.1.1. Condiciones del plano de muestreo

Este plano debe permitir que durante la realización de las mediciones la corriente de emisión en el plano de medida cumpla los siguientes requisitos:

- La desviación de la velocidad o flujo de emisión deberá ser máximo de 15° con respecto al eje del conducto.
- No debe existir en ningún punto flujo negativo (presión negativa) o caídas abruptas de presión.
- La velocidad mínima de flujo debe ser mayor que la velocidad límite de detección del método de medición de caudal utilizado.
- La velocidad mayor medida en todo punto del plano de muestreo no debe ser superior a tres veces la velocidad menor medida en cualquier punto en dicho plano, lo cual indicaría una contracción del efluente y un perfil no valido para medir.

De no cumplirse las condiciones anteriores se deberá modificar la ubicación del plano de muestreo. El plazo para llevar a cabo las modificaciones necesarias, realizar las mediciones y disponer del informe correspondiente, será de seis meses desde que se ha constatado el incumplimiento de los requisitos de la localización del plano de muestreo.

11.3.2. Frecuencia para la realización de los monitoreos de compuestos orgánicos volátiles

Las instalaciones se clasifican en función de las actividades emisoras de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera que en ellas se desarrollen. Cuando en una instalación se realicen actividades de distintos grupos de los incluidos en la clasificación de actividades para la vigilancia de compuestos orgánicos volátiles, la instalación se clasificará en el grupo de mayor potencial contaminador en orden decreciente de tipo 1 a tipo 3 (ver tabla 7).

Tabla 9 Clasificación de impacto y toxicidad

Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Alto	Medio	Bajo

Para efectos de monitoreo o vigilancia, las diferentes actividades industriales han sido clasificadas en:

Tabla 10. Clasificación de Industrias para la vigilancia de compuestos orgánicos volátiles

Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Recubrimientos	Producción plástico polipropileno	Elaboración artículos de plástico polipropileno
Desengrasado	Producción plástico poliestireno	Elaboración artículos de plástico poliestireno
Elaboración artículos de caucho	Producción plástico polietileno baja densidad	Elaboración de artículos de plástico polietileno de baja densidad
Conversión de caucho	Producción plástico polietileno alta densidad	Elaboración de artículos de plástico polietileno de alta densidad
Imprenta consumo de solvente >200 t/año	Producción plástico metacrilato	Elaboración artículos de plásticos metacrilato
Imprenta con consumo de compuestos orgánicos volátiles de alto riesgo	Producción plástico PVC	Elaboración artículos de plástico PVC
	Imprenta consumo de solvente <200 t/ año>20 t/año	Imprenta consumo de solvente <20 t/año

La periodicidad de los controles se determinará siempre que no tengan lugar modificaciones importantes del proceso o sistema de control de emisiones en función del grupo en el que se encuentre clasificada la instalación.

Por lo tanto, para cada grupo de actividades se realizará la vigilancia según las siguientes frecuencias

Tabla 11 Tiempo de aplicabilidad

Tipo	Control externo (años)	Control interno (años)
Tipo 1	2	0.5
Tipo 2	3	1.5
Tipo 3	5	2.5

En caso que tengan lugar modificaciones importantes, se deberá notificar al organismo ambiental competente de la región donde se encuentra ubicada la instalación con seis meses de antelación a la fecha de inicio de funcionamiento del proceso modificado. En un plazo máximo de seis meses desde el inicio del funcionamiento del proceso modificado, el órgano competente deberá disponer de los controles realizados a las fuentes correspondientes.

11.3.3. Métodos directos de monitoreo

El cumplimiento de los anteriores requisitos no segura por sí solo que la composición y parámetros físicos del gas residual sean homogéneos y representativos de la caracterización del efluente, por ello tiene que aplicarse una estrategia de muestreo adecuada.

Distribución de los puntos internos de medida o rejilla de muestreo: en fuentes nuevas y modificaciones estructurales de las existentes, el número mínimo de líneas de muestreo de que deben disponer los conductos y el número de puntos internos de muestreo por plano que se deben realizar son los que se indican en la tabla 12 y en la tabla 13. El número de puntos de muestreo y su distribución configuran la rejilla de distribución. Los puntos internos de muestreo donde realizar la medición deben localizarse en el centro de áreas iguales en el plano de muestreo.

- En el caso de fuentes circulares el número de orificios de muestreo coincide con el número de líneas de muestreo o diámetros, no obstante, para no utilizar sondas excesivamente largas, en fuentes que tengan un diámetro interior superior o igual a 2 m, el número de orificios se duplicará para acceder a los puntos internos de muestreo de la misma línea por ambos extremos.

Tabla 12 Parámetros del ducto circular

Área	Diámetros	Líneas de muestreo	Número de puntos de muestreo
<0.1	<0.35	1	1
0.1 a 1	0.35 a 1.1	2	4
1.1 a 2.0	>1.1 a 1.6	2	8
>2.0	>1.6	2	12 a 20

- En el caso de fuentes con ductos rectangulares, el número de orificios de muestreo coincide con el número de divisiones por lado, no obstante, para no utilizar sondas excesivamente largas, en ductos que tengan el lado más corto superior o igual a 2 m, el número de orificios se duplicará para acceder a los puntos internos de muestreo de la misma división por ambos extremos. Los orificios se encontrarán sobre el lado más extenso y se distribuirán de forma simétrica a lo largo de ese lado.

Tabla 13 Parámetros del ducto rectangular

Área	Divisiones por lado (cuadrícula)	Número de puntos de muestreo
<0.1	1	1
0.1 a 1	2	4
1.1 a 2.0	3	8
>2.0	≥3	12 a 20

En fuentes existentes se admitirá el número y ubicaciones de puertos de muestreo, así como los puntos internos de muestreo (rejilla de muestreo) que se indican a continuación.

- El número de puertos de muestreo será de dos en fuentes circulares situados en diámetros perpendiculares y de tres en fuentes de sección rectangular. Los puntos de muestreo por plano serán los establecidos en la tabla 12 y tabla 13, y se localizarán en el centro de áreas

iguales. No obstante, en fuentes de diámetro hidráulico o equivalente inferior a 70 cm se admite un único orificio en el centro. En estos casos, siempre que se pueda, se utilizará el número mínimo de puntos de muestreo por plano que se han indicado en las dos tablas mencionadas anteriormente

Si no fuera posible, el organismo de control autorizado deberá asegurar un muestreo representativo aumentando el número de puntos de medición y distribuyéndolos entre los orificios de muestreo disponibles de forma simétrica.

11.3.3.1. Número y duración de las mediciones para métodos directos

El objetivo de las mediciones es asegurar el cumplimiento de la norma de emisión establecida mediante la Resolución 909 de 2008 de Minambiente, por tanto, el organismo de control autorizado deberá planificar las mediciones para cumplir este objetivo elaborando un plan de medición. A estos efectos, sin perjuicio de otros datos que sean necesarios, el plan de medición debe incluir:

- Número de mediciones.
- Duración de las mediciones.
- Las condiciones de funcionamiento de la instalación bajo las que se deben realizar las mediciones.
- El número de mediciones de los parámetros contaminantes, y su duración debe permitir conocer las emisiones de las fuentes de forma representativa.

Se recomienda realizar 3 medidas de una hora cada una para obtener información fiable, tanto para los controles externos como para los internos (o autocontroles). Las tres medidas deben realizarse en condiciones normales y estables de funcionamiento del proceso que genera las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, es decir sin ninguna perturbación de las condiciones de salida típicas del efluente.

En caso que el funcionamiento normal de un proceso no permita la realización de mediciones de una hora, se admitirán mediciones con una duración inferior a la hora siempre que se justifique debidamente. En cuanto al número de medidas, siempre que sea posible, se llevarán a cabo las tres medidas, debiendo justificarse adecuadamente en caso contrario.

11.3.3.2. Periodo de ejecución de la recolección de mediciones

El periodo en el cual deben ejecutar las mediciones deberá escogerse cuidadosamente para captar con fidelidad las muestras representativas del efluente contaminado con compuestos orgánicos volátiles, para ello se tendrán en cuenta los criterios establecidos según el tipo de funcionamiento del proceso:

- Proceso continuo.
- Proceso continuo con emisiones variables en el tiempo.
- Proceso por lotes

En cualquier caso, se recomienda un plazo máximo de cinco días de operación.

11.3.3.3. Medición del caudal de emisión

Adicionalmente, en la realización de las mediciones de compuestos orgánicos volátiles se incluirán siempre medidas del caudal de emisión. Para la medición del caudal se realizarán tres medidas que coincidan con la medición de los compuestos orgánicos volátiles, según lo dispuesto o establecido en este capítulo. El resultado de la medición de caudal estará referido en condiciones secas y condiciones normales de presión y temperatura de acuerdo con el

Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas (Minambiente, 2010).

11.3.3.4. Expresión de las concentraciones medidas y reportes de unidades

La norma de emisión de compuestos orgánicos volátiles se encuentra establecida a condiciones de referencia de gas seco, por consiguiente, las concentraciones que sean medidas por el industrial se deberán reportar bajo las mismas condiciones. Además del monitoreo de compuestos orgánicos volátiles, se deberá medir la humedad sólo si está supera el 5%.

Las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles se reportarán en unidades específicas del sistema internacional:

mg / Nm^3= miligramo / metro cúbico normalizado

ppm= partes por millón

Y para cantidades de magnitud inferior:

µg / Nm^3= microgramo / metro cúbico normalizado

ppb= partes por billón

Las anteriores unidades serán las únicas unidades aceptadas por la autoridad ambiental.

11.4. Monitoreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles en el ambiente respirable

Los métodos para la cuantificación de los compuestos orgánicos volátiles en aire ambiente varían de acuerdo con la técnica de muestreo, el tipo de adsorbente, el método de extracción y la técnica de identificación o análisis (Kuman, A. & Viden, I., 2007).

Las técnicas más utilizadas para el análisis y especiación de compuestos orgánicos volátiles se fundamentan en la cromatografía de gases. Los bajos niveles de concentración en que muchos de los compuestos orgánicos volátiles se encuentran en el aire ambiente hace necesaria, en muchos casos, la preconcentración de la muestra antes del análisis. Son muy pocas las técnicas que permiten el análisis directo sin preconcentración y aunque el método de muestreo no implique la concentración de las muestras, estas suelen preconcentrarse antes del análisis (de Blas, 2009).

Existen varios procedimientos de muestreo para compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera. Los más usados incluyen la toma directa de muestras de aire en recipientes y la preconcentración de muestras en tubos de adsorbentes. En algunos casos bastante particulares los componentes son recolectados mediante un proceso denominado quimisorción, en el cual las sustancias a medir son adsorbidas y alteradas por una reacción química (Kuman, A. & Viden, I., 2007). El análisis de los compuestos también se puede realizar mediante analizadores continuos en los cuales el muestreo y el análisis se realizan en tiempo real.

La toma de muestras de aire puede realizarse empleando recipientes herméticos de acero inoxidable pasivado o bolsas selladas de polímeros inertes (de Blas, 2009).

Posteriormente, las muestras se envían a un laboratorio en el cual se realiza el proceso de análisis y determinación de compuestos orgánicos volátiles.

- **Recipientes herméticos:** recolección de la muestra de aire en recipientes previamente preparados a través de un proceso que minimiza la reactividad de la superficie interna del recipiente. La muestra puede tomarse mediante muestreo pasivo o activo (a través de bombeo) (Kuman, A. & Viden, I., 2007).

- **Bolsas plásticas:** recolección de la muestra de aire en bolsas (tedlar o teflón) previamente sometidas a un proceso de limpieza. La recolección de la muestra de aire requiere que ésta sea bombeada (muestreo activo). Es útil para medición de aire altamente contaminado (Kuman, A. & Viden, I., 2007)

11.4.1. Preconcentración de las muestras

Las técnicas de toma de muestras con preconcentración más utilizadas son el muestreo activo o pasivo en tubos rellenos de adsorbente (de Blas, 2009).

- **Muestreo pasivo:** los compuestos se adsorben a través de un tubo con relleno sólido por difusión. Son sencillos de utilizar y, después de un tiempo de exposición determinado (ocho horas a dos semanas), la muestra se lleva al laboratorio donde se analiza cuantitativamente. Sus aplicaciones más importantes son la toma de muestras en atmósferas de trabajo y en áreas industriales en las que existen niveles de contaminación elevados, también suele utilizarse para muestras de vegetación (de Blas, 2009; Díaz Poveda, 2020).

- **Muestreo activo:** consiste en bombardear un volumen determinado de aire a través de un tubo relleno de un adsorbente sólido, de manera que los contaminantes se retienen selectivamente y se concentran (de Blas, 2009; Menezes, H. C., Amorim, L. C. A., & Cardeal, Z. L., 2013). Posteriormente la muestra es analizada en un laboratorio. Este método permite recolectar mayores volúmenes de muestra, pero, puede representar una fuente potencial de contaminación o fugas.

11.4.2. Análisis de la muestra

Posteriormente al muestreo se realiza el análisis de la muestra para la cuantificación de los compuestos orgánicos volátiles. Este análisis comprende una etapa de extracción de las sustancias y la etapa de cuantificación de estas. Según el método de muestreo empleado, la extracción puede realizarse mediante solventes o por termo desorción.

Tabla 14. Métodos de extracción de muestra

Extracción con solventes	Termo desorción
Consiste en usar un solvente para retirar los contaminantes muestreados. Esta técnica es utilizada para ambientes con fuertes concentraciones como aire interior o industrias. Después de la extracción con solventes, el análisis es generalmente hecho por cromatografía liquida de alta eficiencia (HPLC de las siglas en inglés). Este sistema de extracción es cada vez menos empleado para el estudio de compuestos orgánicos volátiles, porque la termo desorción es más práctica, rápida y no necesita de solvente (producto tóxico para el ambiente).	Consiste en extraer los compuestos muestreados empleando la temperatura y el flujo de un gas inerte. El volumen de aire muestreado pasa a través de una trampa que concentra los compuestos a baja temperatura. Posteriormente, los compuestos son sometidos a una desorción térmica con el paso de un gas inerte a altas temperaturas y transferidos al cromatógrafo de gases para separación y análisis. Sus limitaciones están relacionadas con la estabilidad térmica de los compuestos en el momento de la desorción.

En cuanto al sistema de análisis, los cromatógrafos de gases pueden contar con diferentes tipos de detectores.

El detector de ionización de llama (FID) es uno de los tipos de detectores más empleados en la cromatografía de gases. Este tipo de detector es selectivo con respecto a los compuestos que presenten enlaces carbono-hidrógeno, lo cual supone una gran ventaja en el análisis de compuestos orgánicos volátiles. Mide el contenido de carbono total del vapor, pero no el CO_2 ni el CO. A su vez, debe instalarse un filtro con la finalidad de eliminar el vapor de agua y el material particulado. El instrumento también presenta problemas para detectar alifáticos altamente halogenados como

el cloroformo y el tetracloruro de carbono y no proporciona las concentraciones de compuestos individuales.

Los detectores de fotoionización (PID) están basados en la utilización de los fotones generados en una lámpara de descarga para ionizar los compuestos orgánicos que emergen, junto con el gas portador, de una columna cromatografíca. En este sistema, prácticamente la totalidad de los compuestos orgánicos dan algún tipo de respuesta, aunque presenta problemas para detectar un compuesto específico si existen otros en el aire. No obstante, puede utilizarse para compuestos que la FID no consigue medir bien.

El detector por espectroscopia de masas (EM) es una herramienta útil para la identificación y cuantificación de compuestos orgánicos volátiles en mezclas complejas (como el aire ambiente), pero es menos estable y presenta mayores costos de operación que el detector FID bajo condiciones normales.



12. INSTRUCTIVO PARA IMPLEMENTAR UN PROGRAMA PARA REDUCIR EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA EMPRESA

12.1. Generalidades

Por los riesgos en la salud y el ambiente que conlleva un manejo inadecuado de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, la industria nacional deberá reducir sus emisiones de compuestos orgánicos volátiles dentro del marco de las políticas de protección al medio ambiente que han sido trazadas por el Estado Colombiano. Por lo anterior, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible solicita a la industria en general, y en particular a las empresas catalogadas dentro de los sectores referenciados en este documento, elaborar y ejecutar sus respectivos programas de reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles con base en los lineamientos expuestos en la presente guía.

El programa de reducción de las emisiones deberá contener y adoptar, como mínimo, los elementos básicos del ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y actuar) de control de la calidad total, como una estrategia de gestión industrial que actualmente se aplica en el ámbito mundial referida al campo ambiental.

Como es de conocimiento general, el ciclo PHVA está conformado por cuatro acciones sencillas en una secuencia lógica que permite el mejoramiento continuo por medio de retroalimentación de resultados. Cada elemento del ciclo incluye el desarrollo de procesos orientados al logro de objetivos y al cumplimiento de indicadores previamente definidos. A continuación, se destacan las acciones más importantes involucradas en cada elemento:

Planear: en esta etapa se debe realizar un diagnóstico de las condiciones operativas y ambientales del proceso productivo que permita diseñar los lineamientos para construir un programa de gestión y definir los objetivos, metas e indicadores tendientes a reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, acordes con las políticas de la empresa.

- **Hacer:** durante esta etapa del proceso se procederá a efectuar las tareas, es decir a implementar las estrategias de reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles más convenientes para la empresa, considerando los factores de costo-beneficio, dependiendo del nivel de mejoramiento a alcanzar.
- **Verificar:** esta etapa permitirá estimar el comportamiento de las variables operativas y compararlas con los indicadores y metas previamente definidos. Es recomendable medir y registrar los posibles impactos en las variables, tanto económicas como operativas, verificando que la calidad del producto se mantenga.
- **Actuar:** durante esta etapa se evalúan los logros o resultados de la gestión que se hayan obtenido para constatar si la estrategia de control aplicada ha sido efectiva para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles o tomar los correctivos del caso con el fin de evitar impactos negativos. El uso de los indicadores permitirá cuantificar la eficiencia en la reducción, su evolución en el tiempo y, además, verificar el cumplimiento del objetivo propuesto.

12.2. Pasos a seguir para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la empresa

12.2.1. Diagnóstico de las condiciones operativas y ambientales

Acorde con el ciclo de control de procesos mencionado y como un paso inicial para diseñar el programa que permita reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la empresa, se debe, en primera instancia, conocer el escenario actual de la producción y caracterizar las condiciones de operación de los procesos, las cantidades de materia prima empleadas, los flujos y circuitos de las corrientes de proceso, las emisiones y los productos terminados. Dentro de los aspectos relevantes que deben ser considerados por la empresa para realizar el diagnóstico se destacan los siguientes:

- Elaborar una base de datos que involucre todas las etapas de manejo de los solventes o del producto que contenga compuestos orgánicos volátiles desde su ingreso a la unidad de proceso hasta su disposición al final de éste.
- Realizar una descripción del proceso o actividad productiva, incluyendo cantidades de materias primas (utilizadas y almacenadas), productos intermedios y productos terminados que se hayan almacenado. Se recomienda elaborar diagramas de flujo de los procesos e indicar en ellos los equipos y puntos críticos de emisión de los compuestos orgánicos volátiles. Como es de conocimiento en el campo de la ingeniería de procesos, los diagramas de son recomendables para señalar los equipos y accesorios en el circuito. Si se desea una representación más detallada de tales elementos, se puede utilizar el tipo de diagrama denominado de tuberías e instrumentos (P&ID del inglés Piping and Instrument Diagram). Se deberá elaborar también un diagrama de planta o plano del terreno de la unidad con el fin de establecer la localización y guardar las distancias entre equipos de acuerdo con los criterios de diseño de ingeniería.
- Elaborar una relación de las cantidades de sustancias con contenido de compuestos orgánicos volátiles compradas y el movimiento de la hoja de inventarios.
- Caracterizar las materias primas de acuerdo con las fichas de seguridad de las sustancias utilizadas en el proceso o actividad que hayan sido suministradas por el proveedor.
- Identificar las fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles, señalarlas en el diagrama de flujo del proceso y en lo posible crear un registro fotográfico de las mismas.
- Establecer y registrar las dosificaciones de las mezclas a preparar o preparadas a partir de las materias primas que incorporen sustancias con contenido de compuestos orgánicos volátiles.
- Realizar un estimativo de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles previamente a la aplicación del programa de reducción de emisiones. Considerar las metodologías referenciadas en el capítulo 11 de la presente guía.

La integración de los pasos anteriores hará parte del sistema de gestión de la calidad ambiental que toda empresa deberá diseñar y aplicar para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en sus unidades de producción.

12.2.2. Indicadores de seguimiento y vigilancia de la reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles

Un indicador de emisiones de compuestos orgánicos volátiles representa la relación entre el escenario productivo y la carga contaminante emitida por una empresa de forma cuantitativa, sencilla y directa. En el diagrama conceptual de la figura 16, se muestran de manera muy general las

corrientes de interés para calcular los indicadores que permitirán inspeccionar la reducción en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de cada empresa.

Figura 16. Diagrama conceptual de flujo de compuestos orgánicos volátiles



Para que la autoridad ambiental pueda hacer el seguimiento y la verificación del cumplimiento en la reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles por parte de la industria, las empresas deberán establecer un sistema de información que permita evaluar y reportar confiablemente los siguientes dos indicadores:

A. Indicador de consumo de compuestos orgánicos volátiles por unidad de producto (ICP): este indicador es el cociente entre la cantidad de compuestos orgánicos volátiles consumidos (en kg) por unidad de producto final (en kg):

Ecuación 8

$$ICP = \frac{\text{compuestos orgánicos volátiles consumidos (kg)}}{\text{producción (kg producto final)}}$$

En el numerador (compuestos orgánicos volátiles consumidos) se incluyen tanto los compuestos orgánicos volátiles emitidos a la atmósfera (o a otro receptor, tales como las aguas residuales) como los compuestos orgánicos volátiles incorporados al producto (por ejemplo, pinturas y barnices en el caso de una fábrica de estos productos) (ver figura 16). De este modo el indicador ICP permite monitorear las emisiones no solo durante la fase de producción sino también en etapas posteriores de consumo y disposición; es decir, con un mayor cubrimiento durante el ciclo de vida del producto. La empresa deberá decidir si usa un solo indicador ICP o varios, por ejemplo, uno por cada línea o grupo de productos.

Con el fin de evaluar el progreso hacia un menor uso de insumos con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles o menores emisiones de estos contaminantes, el fabricante deberá definir cuidadosamente su base de cálculo (unidades de producción, para poner un caso: kg de herramientas terminadas) con el fin de garantizar la estabilidad del indicador en el tiempo. Cualquier cambio en la base de cálculo deberá reportarse a la autoridad ambiental y, durante el período de transición entre una base de cálculo y otra, el ICP se deberá medir y reportar sobre ambas bases de cálculo (por ejemplo: kg de herramientas terminadas y kg piezas de herramientas).

La información para el cálculo del ICP se deberá recolectar mensualmente y el ICP deberá reportarse anualmente.

B. Indicador de emisiones de compuestos orgánicos volátiles por unidad de consumo de compuestos orgánicos volátiles (IEC): este indicador es el cociente entre la cantidad de compuestos orgánicos volátiles emitidos a la atmósfera (o a otro medio receptor, tal como aguas residuales) (en kg) y la cantidad de compuestos orgánicos volátiles consumidos (en kg):

Ecuación 9

$$IEC = \frac{\text{compuestos orgánicos volátiles emitidos (kg)}}{\text{compuestos orgánicos volátiles consumidos (kg)}}$$

Si no es posible obtener información sobre la fracción de compuestos orgánicos volátiles incorporada al producto final, se asumirá que el 100% de los compuestos orgánicos volátiles consumidos son emitidos a la atmósfera, es decir, se asumirá cien por ciento para un IEC = 1.

La información para el cálculo del IEC se deberá recolectar mensualmente y el IEC deberá ser reportado anualmente.

12.3. Estrategias para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la empresa

Existen diversas estrategias para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles dependiendo de la estructura del proceso de producción, la tecnología, antigüedad de la planta y el grado de eficiencia de remoción deseado.

Por lo tanto, para determinar la estrategia de reducción más adecuada para cada empresa, se deberán evaluar alternativas que puedan ajustarse a las necesidades del proceso, considerando los factores de costo-beneficio sin sacrificar la calidad del producto, que ante todo garanticen el cumplimento de la normativa ambiental de nuestro país.

Para garantizar un adecuado seguimiento de la calidad ambiental de los procesos y el cumplimiento de las recomendaciones relacionadas con las emisiones de compuestos orgánicos volátiles que hayan sido emanadas por la autoridad ambiental, es necesario definir y establecer indicadores específicos para cada estrategia, ya sean preventivas o correctivas.

12.3.1. Estrategias preventivas

Dentro de las estrategias o medidas preventivas de reducción de compuestos orgánicos volátiles se destacan dos: la estrategia o medidas de sustitución o reemplazo y la de mejoramiento u optimización.

A. Eliminación de la utilización de solventes por procesos mecánicos alternativos

Esta estrategia de prevención se orienta hacia el uso de procesos mecánicos sobre todo en labores de limpieza y desangrase con solventes. En otras palabras, se reemplaza el uso de solventes por tareas que pueden ser realizadas con aditamentos mecánicos o labor manual o mecánica; por ejemplo, el uso de cepillado, el empleo de medios abrasivos y la utilización de vapor de agua saturado a baja o alta presión. Indicador por aplicar: se considera reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles del 100% para un ICP=0.

B. Eliminación de la utilización de solventes por sustancias inorgánicas

Esta estrategia abarca, en especial, procesos como el lavado con soluciones acuosas ácidas (pH<7), básicas (pH>7) y neutras (pH≈7). Dentro de las neutras se destacan las que contienen detergentes, sales u otros aditivos. Indicador por aplicar: se considera reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles del 100% para un ICP=0.

C. Cambio de solvente peligroso por sustancias de menor toxicidad

En algunos casos hay que sustituir el producto que origina la contaminación, debido a que la eliminación directa genera gastos elevados o en el peor de los casos deterioro de la calidad del

producto. Entonces, es posible cambiar los productos utilizados (para limpieza, operación, etc.) por otros que presten el mismo servicio pero que sean menos tóxicos o que presenten un riesgo menor para las personas que los utilizan y para el medio ambiente.

La sustitución de los solventes peligrosos es una medida preventiva prioritaria frente a los riesgos derivados de la presencia de agentes químicos tóxicos en el sitio de trabajo. El reemplazo de un solvente de alta toxicidad implica previamente la evaluación de algunos aspectos tales como:

- Búsqueda de un sustituto técnicamente viable.
- Valoración de los riesgos de este sustituto y su comparación con el solvente a sustituir.
- Evaluación de los cambios administrativos y técnicos que implica dicha sustitución.

Indicador por aplicar: la filosofía de esta guía es salvaguardar la salud humana y del medio ambiente, por lo tanto, la erradicación de sustancias de alto riesgo del lugar de trabajo y en general de centros urbanos se considera una práctica prioritaria.

D. Reducción de la intensidad de consumo de solventes

La estrategia de mejoramiento u optimización hacia un mínimo de residuos promueve el uso inteligente de los recursos económicos de una empresa, entre ellos, las materias primas. Esta estrategia implicaría evaluar factores tales como la intensidad de uso y la eficiencia operativa (Perry, R. & Green, D.W.,2008). El objetivo primordial es limitar el consumo de solventes y en general sustancias con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles a las cantidades estrictamente necesarias en el proceso, sin sacrificar la calidad de éste, con esto se evita la generación de emisiones con altas cargas de compuestos orgánicos volátiles hacia el ambiente. Indicador por aplicar: ICP.

E. Recuperación de solventes mediante operaciones de reciclaje

La recuperación del insumo es una de las técnicas ideales y preferidas en la industria moderna que utiliza tecnologías y sistemas de control de la calidad avanzados, ya que además de reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles también generan un ahorro de recursos valiosos. Su uso no ha sido amplio debido a los altos costos de los equipos recuperadores y a los gastos que implica su instalación. No obstante, poseen la gran ventaja de minimizar la cantidad de solvente a comprar, permitiendo un ahorro en los gastos operativos de la unidad (U.S. EPA, 1994)).

12.3.2. Estrategias correctivas

Dentro de las estrategias o medidas correctivas de reducción de compuestos orgánicos volátiles recomendadas para la industria y en particular para los sectores de prioridad indicados en la presente guía nacional, se destacan las de captura de emisiones fugitivas y las de control al final del tubo.

A. Reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles empleando sistemas de control al final del tubo

El sistema de control de final de tubo es considerado como una alternativa, cuando las demás estrategias han sido insuficientes y la cantidad de material contaminante emitido es significativa, por lo tanto, puede ser capturada y conducida. Para efectuar control al final del tubo existen en el mercado diferentes opciones tecnológicas ya sean tipo destructivas o recuperativas (Virden *et ál*., 1992). Ver anexos 3 y 4.

Es necesario aclarar que los dispositivos de control recuperativos se refieren a aquellos que captan la emisión y generan corrientes de residuos líquidos o sólidos que contienen compuestos orgánicos volátiles que deben ser posteriormente tratados para eliminar los compuestos orgánicos volátiles captados (U.S. EPA, 1998). Los dispositivos destructivos generalmente emiten gases de combustión

que contienen vapor de agua y dióxido de carbono en cantidades que dependen de la eficiencia de la capacidad del sistema, así como algunas trazas de compuestos orgánicos volátiles (Khan, F & Ghoshal, A, 2000).

En síntesis, los dispositivos recuperativos generan costos de postratamiento de residuos (USAEC, 1997), contrario a lo que ocurre con la gran mayoría de los dispositivos destructivos, excepto los que emplean tecnologías de biofiltración, pues producen algunos residuos orgánicos debido a las bacterias que descomponen los compuestos orgánicos volátiles.

Indicador por aplicar: cuando se recurre a las tecnologías de control o técnicas correctivas el índice apropiado es aquel en el cual se cuantifican las emisiones, por lo tanto, el indicador adecuado es el IEC.

12.4. Alternativas de sustancias peligrosas y solventes tóxicos utilizados en la industria

La disminución de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera se puede llevar a cabo mediante la optimización de los sistemas productivos, por lo que pensar en el sistema desde la fuente sustituyendo el uso de productos con altos contenidos de compuestos orgánicos susceptibles a evaporarse es otra alternativa para reducir estas emisiones.

En la tabla 15 se consignan algunos de los principales solventes usados por los sectores económicos mencionados en esta guía.

Tabla 15. Alternativas de sustitución de sustancias peligrosas.

Solvente	Actividades adecuadas para la sustitución	Sustancia alternativa
Benceno	Para bajar el punto de congelación en un proceso	Ciclohexano solución de cloruro de sodio
	Para la solubilidad del yodo o sustancias no polares	Aceites minerales
		Hexanos
		Solventes no halogenados Alcoholes ciclohexano
Tolueno	Limpieza	Alcoholes
	Para la solubilidad del yodo o sustancias no polares	Aceites minerales
		Hexanos
		Solventes no halogenados Alcoholes ciclohexano
Xileno	Limpieza de grasas de piezas	Terpenos
	Para la solubilidad del yodo o sustancias no polares	Aceites minerales
		Hexanos
		Solventes no halogenados Alcoholes Ciclohexano

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente de México, (2012).

Las fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles en los diferentes sectores están asociadas a actividades específicas como son la limpieza, el pretratamiento de superficies, recubrimiento y unión de superficies, por lo tanto, algunas de las alternativas de sustitución de estos solventes son:

Tabla 16. Alternativas de sustitución de solventes tóxicos

Proceso de producción	Solventes orgánicos	Alternativas de sustitución
1. Limpieza de equipo con surfactantes	Butilenglicol, propilenglicol, etanol.	Surfactantes en emulsión salina. Otros tipos de surfactantes
2. Lavado de tejidos con surfactantes	Butilenglicol, propilenglicol	Surfactantes en emulsión salina. Otros tipos de surfactantes
3. Quitar manchas de aceites	CFC 113, 1,1,1-tricloroetileno	Evitar las manchas ajustando máquinas
4. Unir los adornos y refuerzos	N-Heptano, acetato de etilo	Adhesivos al agua. Cinta adhesiva a dos caras
5. Pretratamiento de superficies	Acetato de etilo	Preparación mecánica abrasiva
6. Unión de superficies	Tolueno, heptano, acetato de etilo	Fusión por calor. Capa adhesiva
7. Tapizado	1,1,1-Tricloroetano, N-Hexano, acetona, tolueno	Adhesivos al agua. Sujeción mecánica (grapas).
8. Preservación de la madera (impregnación)	Aromáticos y alifáticos	Agentes de base acuosa. Usar madera vieja u otros métodos de construcción.
9. Protectores de superficie de la madera	Hidrocarburos aromáticos, alicíclicos y alifáticos	Agentes de base acuosa.
10. Pintura, lacado	Acetato de butilo, acetato de etilo	Evitar este tratamiento. Capa de cera (pino). Tratamiento con jabón. Pintura de base acuosa.
11. Limpieza de lentes, pantallas luminosas y películas	1,1,1-Tricloroetano, etanol	Solución al 1% de carbonato de sodio.
12. Productos antiestéticos en películas	1,1,1-Tricloroetano.	Usar películas antiestáticas.
13. Pegado en montaje y composición	1,1,1-Tricloroetano, nafta	Cera. Adhesivo de doble cara.
14. Retocado de películas	Tolueno, etanol	Cubierta de color base acuosa usando pluma o cepillo
15. Revelador de películas	Etilenglicol, metilenglicol, propilenglicol, y derivados	Usar revelador sin solventes orgánicos
16. Metal	1,1,1-Tricloroetileno	Etil acetato, butil acetato
17. Fotopolímeros	Etanol	Agua, usando otro tipo de plancha.
18. Planchas de off-set	Etilenglicol, metilenglicol, propilenglicol y derivados	Revelador base agua sin solventes orgánicos, usando otro tipo de plancha.

Proceso de producción	Solventes orgánicos	Alternativas de sustitución
19. Retocado de planchas (con ácido hidrofluórico)	Dimetil formaldehído	Revisar y limpiar la película antes de la exposición. Exposición de la plancha con hoja difusora. Hacer una nueva plancha.
20. Pantalla de imprimir pegado de pantalla a la estructura (con isocianato)	Acetato de etilo, acetona. Alcoholes Nafta Butanol/tetracloro etileno	Revisar y limpiar los positivos y películas antes de la exposición. Usar la emulsión y re-exponer. Adhesivo de doble cara. Junta mecánica. Nafta/etanol usando otro tipo de cliché de fotopolímeros
21. Pantalla de imprimir emulsiones de impresión	Alcoholes	Revisar y limpiar los positivos y películas antes de la exposición. Usar la emulsión y re-exponer
22. Flexo impresión goma de pegar cliché y plancha	Nafta	Adhesivo de doble cara. Junta mecánica.
23. Reveladores para cliché de fotopolímeros	Butanol/tetracloro etileno	Nafta/etanol usando otro tipo de cliché de fotopolímeros
24. Huecograbado fotorrelieves	Solventes orgánicos	Reveladores en base acuosa usando un nuevo tipo de revelador
25. Tinta de imprimir en *offset* con solvente en forma de aerosol	1,1,1-Tricloroetano	En bote con boca plana directamente, con rodillo sin solvente orgánico
26. Limpieza de planchas	Nafta, acetonas, tolueno	Polvos de limpieza hidrosolubles
27. Pegar papel, arreglar roturas durante la impresión	N-Hexano	Cinta adhesiva por ambos lados
28. Lavado de rodillo de color y otros equipos (ej. Emulsión con agua)	Nafta, acetonas, tolueno	Fregar con cepillo y agua caliente. Agua a presión.
29. Limpieza de superficie de máquinas de imprenta	Queroseno	Agua caliente y jabón
30. Tratamiento de superficies después de imprimir	Acetato de butilo, acetato de etilo, xileno, tolueno	Tinta sin color. Laminado con productos base acuosa
31. Impresión por pantalla tintas	Tintas con solventes	Tintas en base acuosa. Tintas de resina PVC
32. Impresión por pantalla limpieza de pantalla	Solventes orgánicos	Evitar secado de la tinta. Agua si es eficaz
33. Foto impresión	Etanol, 2-propanol, acetato de etilo, MEK, tolueno	Tintas base acuosa (con 5-25% de solventes orgánicos) y limpieza con agentes en base acuosa
34. Bajo relieve	Tolueno, nafta	Tintas en base acuosa y limpieza con agentes en base acuosa
35. Encuadernación de libros con cola	1,1,1-Tricloroetano, tolueno, etanol, acetato de etilo	Adhesivos PVA sin solventes orgánicos. Fundido por calor

Proceso de producción	Solventes orgánicos	Alternativas de sustitución
36. Tratamiento de superficies y encuadernación	Acetato de etilo, etanol, tolueno, 2-Propanolacetato, acetona	Productos en base acuosa
37. Laminar	Acetona, MEK, acetato de etilo 2-Propanolacetato	Adhesivos en base acuosa. Específico hoja de poliester fijada en papel mediante calor. Co-extrusión
38. Utilización de agentes antiestáticos en forma de aerosol en superficies de equipos de encuadernación	1,1,1-Tricloroetano	Bote con cuello plano en plano o cepillo sin solvente orgánico
39. Corte de roscas y taladrar en acero inoxidable y cobre	1,1,1-Tricloroetano	Agentes basados en aceites vegetales (de colza con 50% de ácido erúcico). Agentes de base acuosa sin solventes orgánicos
40. Corte con agentes de base acuosa y solvente orgánico	Hexilen glicol, propilen glicol y derivados	Agentes de base acuosa sin solventes orgánicos
41. Bruñido	Queroseno	Hidrocarburos alifáticos con punto de ebullición 250° C.
42. Pulido previo	Queroseno	Agentes base acuosa.
43. Acabado final	Queroseno	Hidrocarburos alifáticos con punto de ebullición 250°C.
44. Soldadura fase vapor industria electrónica	CFC 113	Horno continuo de infrarrojos.
45. Eliminación de flujos post-soldadura en la industria electrónica	CFC 113/etanol, aceite terpeno naranja	Usar flujos hidrosolubles.
46. Pegar	1,1,1-Tricloroetano, tolueno, acetato, MEK diclorometano, etanol xileno, estireno, metacrilato de metilo	
47. Lubricación	1,1,1-Tricloroetano	
48. Desengrasas metales	Diclorometano, tetracloroetileno, 1,1,1-Tricloroetano, 1,1,1-Tricloroetileno, CFC 113, tolueno, Xileno, 2-propanol, nafta, n-hexano, queroseno, butilenglicol	
49. Pintura	Xileno, tolueno, butanol, 2-propanol, etilenglicol, butilenglicol, acetato de butilo	
50. Eliminación de pintura vieja	Diclorometano, metano	

Fuente: Sorensen, F. & Styhr-Petersen, H. J. 1992.

12.5 Planes de contingencia para episodios de contaminación por compuestos orgánicos volátiles en el ambiente

Por los efectos adversos que ocasionan los compuestos orgánicos volátiles en la salud y el ambiente, ya sea de manera directa o indirecta, es necesario implementar planes de contingencia para las

zonas geográficas donde se manufacturen, procesen, refinen o transformen sustancias, materiales e insumos que los contengan o generen, incluyendo sus áreas de influencia. Por lo anterior y de acuerdo con lo reglamentado en el artículo 95 del Decreto 948 de junio 5 de 1995, las corporaciones autónomas regionales y los grandes centros urbanos deberán establecer los planes de contingencia dentro de las áreas de su jurisdicción.

De la misma manera y en concordancia con el citado artículo, las corporaciones autónomas regionales y los grandes centros urbanos podrán imponer la elaboración de un plan de contingencia a las empresas industriales que almacenen, procesen, manufacturen o transformen hidrocarburos o sustancias tóxicas que puedan ser nocivas para la salud, los recursos naturales renovables o el medio ambiente; que contemple todo el sistema de seguridad, prevención, organización de respuesta, equipos, personal capacitado y presupuesto para la prevención y control de las emisiones contaminantes y la reparación de daños, que deberá ser presentado a la autoridad ambiental competente para su aprobación.

Los procesos industriales priorizados como generadores de compuestos orgánicos volátiles son los siguientes:

- Artes gráficas.
- Procesamiento y transformación de caucho natural.
- Procesamiento y transformación de caucho sintético.
- Recubrimiento de superficies.
- Industria de productos de plástico.

Los planes de contingencia al igual que los planes de emergencia o programas preventivos para los procesos y actividades mencionados, tienen muchos aspectos en común debido a la similitud de sustancias e insumos que manejan y a las emisiones atmosféricas que generan. No obstante, constituyen una valiosa herramienta gerencial para minimizar los riesgos en la salud e integridad de las personas, ocasionados por eventos programados o episodios accidentales por derrame o escape de tóxicos o compuestos orgánicos volátiles hacia el ambiente.

A. Planes de prevención para episodios de contaminación por compuestos orgánicos volátiles

A continuación, se presentan algunos lineamientos para prevenir los episodios de contaminación por compuestos orgánicos volátiles que puedan ocurrir durante el desarrollo de las actividades relacionadas con los procesos industriales antes referidos. Es fundamental identificar los factores de riesgo involucrados en las operaciones de las respectivas líneas de producción, para lo cual es importante conocer las variables del proceso y observar detenidamente sus respectivos diagramas de bloque o flujos del proceso).

Se relacionan, entre otros, algunos factores de riesgo que pueden fomentar derrames o fugas en el proceso:

- Fuga o escape de solventes o insumos debido al uso inadecuado de los recipientes o equipos que los contienen.
- Equipos de proceso e instalaciones en alto riesgo debido a programas de inspección visual o mecánica deficiente o baja frecuencia de mantenimiento preventivo.
- Manejo incorrecto de los aditamentos y accesorios de los equipos y recipientes que contienen solventes o insumos tóxicos.

Para neutralizar los factores de riesgo mencionados, es necesario establecer las medidas preventivas que contemplen elementos que permitan proteger a los trabajadores y a la comunidad en general. Se destacan, entre otras, las siguientes medidas de prevención:

- Dotar el sitio de trabajo de las condiciones mínimas de espacios para transitar y de suficientes

salidas de emergencia y evacuación. Tener en cuenta las indicaciones registradas en los respectivos planos de planta de la unidad.

- Dotar la planta de procesos de los servicios de primeros auxilios.
- Diseñar un programa de identificación de riesgos para el personal de la planta que involucre la determinación de riesgos químicos en el sitio de trabajo, el rotulado de los recipientes, equipos y líneas de conducción de productos que contengan compuestos orgánicos volátiles, la elaboración de hojas de datos de seguridad para los materiales e insumos y, por último, disponer de un programa escrito de entrenamiento sobre los materiales e insumos que contengan compuestos orgánicos volátiles.
- Estructurar planes de contingencia para controlar episodios de contaminación por compuestos orgánicos volátiles en caso de que los planes y medidas de prevención fallen.

B. Planes de contingencia para control de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles

Ante un episodio de contaminación, ya sea de fuga o derrame por daño de cualquiera de los equipos del proceso que manejen hidrocarburos, solventes o sustancias que contengan compuestos orgánicos volátiles o por falla en los sistemas de control de emisiones que se hayan instalado al final del tubo, se debe activar el plan de contingencia de la planta con el fin de tomar los correctivos que sean necesarios y proteger tanto a los funcionarios de la empresa como a la comunidad.

Un plan de contingencia por derrame o fuga de hidrocarburos, solventes o sustancias que contengan compuestos orgánicos volátiles deberá responder a la siguiente secuencia de actuación en la planta:

- Alejarse del área lo más pronto posible y ponerse a salvo de la nube tóxica.
- Identificar el producto químico o tóxico siempre que sea posible.
- Informar inmediatamente sobre lo ocurrido, alertando la presencia de heridos si los hubiera (las acciones principales deberán encaminarse al rescate y aplicación de los primeros auxilios).
- Aislar la zona afectada e informarse sobre los riesgos del producto químico o tóxico disperso Establecer un plan de acción para proteger el área, oficinas y sistemas colectores de drenajes evitando que la nube tóxica o explosiva se dirija hacia puntos calientes de la planta.
- Emplear los equipos de protección en forma adecuada y proceder a contener el derrame o fuga.
- Realizar limpieza de los residuos y proceder a reparar los daños.

De otra parte, y de acuerdo con el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (Minambiente, 2010), el plan de contingencia para los sistemas o equipos de control al final del tubo deberá contemplar como mínimo los siguientes elementos:

- Descripción de la actividad que genera la emisión en particular.
- Descripción de la actividad que se realiza en las instalaciones en las cuales se tiene ubicado el sistema de control emisiones atmosféricas.
- Identificación y caracterización de los sistemas de control de emisiones atmosféricas, incluyendo la referencia, condiciones de operación, la eficiencia de remoción de diseño y la eficiencia real de remoción.
- Ubicación de los sistemas de control. Se deben presentar los planos de las instalaciones con la ubicación geográfica de los sistemas de control de emisiones, incluyendo la ubicación de conexiones y otros que permitan el funcionamiento de estos.
- Identificación, análisis, explicación y respuesta a cada una de las posibles fallas de los sistemas de control de emisiones que se pueden presentar durante su operación, de acuerdo con las variables establecidas en el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (Minambiente, 2010), y lo establecido por el fabricante.
- Acciones de respuesta a cada una de las situaciones identificadas, especificando los

responsables de ejecutarlas, las herramientas necesarias para realizarlas (documentos, equipos, requerimientos de personal, entre otras) y en los casos en los que se tengan establecidas funciones específicas relacionadas con los sistemas de control, se deben definir los cargos.

- Recursos técnicos y humanos requeridos para ejecutar tanto el plan de mantenimiento de los sistemas de control como los procedimientos de respuesta a cada una de las situaciones de contingencia que se pueden presentar.
- Procedimientos operativos de respuesta en caso de falla de los sistemas de control de emisiones (actividades, responsable de cada actividad y documento o reporte asociado).
- Plan de mantenimiento de los sistemas de control de emisiones.

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Investigación del Cáncer [IARC]. (2020). Listado de Sustancias y Agentes Cancerígenos. Recuperado de: https://www.iarc.who.int/
- Álvarez, F. (2009). Tratamiento de emisiones a la atmósfera de acetato de etilo y tolueno mediante biofiltros de turba. Tesis doctoral, Universitat de València.
- Universidad de Antioquía [UdeA]. (2013). *Desarrollo de instrumentos técnicos para la prevención y control de la contaminación del aire, en el marco del plan de acción de la política de prevención y control* de *la contaminación del aire*.
- Área metropolitana del Valle de Aburra [AMVA]. (2019). *Inventario de emisiones atmosféricas.* https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Herramientas-de-gestion/Inventario-de-emisiones-atmosfericas.aspx
- Área Metropolitana del Valle de Aburra [AMVA]. (2016). *Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2015*. https://doi.org/10.4049/jimmunol.0804341
- Atkinson, R. & Arey, J. (2003). *Atmospheric degradation of volatile organic compounds*. Chemical Reviews. 103, 4605-4638.
- Bell, M.L., Kim, J.Y. & Dominici, F. (2007). Potential Confounding of Particulate Matter on the Short-Term Association between Ozone and Mortality in Multisite Time-Series Studies. *Environmental Health Perspectives*, 115 (11), 1591-1595.
- Bell M.L., McDermott, A., Zeger, S.L., Samet, J.M. & Dominici, F. (2004). Ozone and short-term mortality in 95 US urban communities, 1987–2000. *JAMA,* 292(19), 2372–2378.
- Bell M.L., Peng, R.D. & Dominici, F. (2006) The Exposure– Response Curve for Ozone and Risk of Mortality and the Adequacy of Current Ozone Regulations. *Environ Health Perspect,* 114(4), 532-6. doi: 10.1289/ehp.8816.
- Beliczky, L.S., & Fajen, J. (1994). Industria del caucho. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Recuperado el 18 de mayo de 2021 de:* https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADtulo+80.+Industria+del+caucho
- Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). Tecnología de polímeros Procesado y propiedades. Universidad de Alicante
- Betancourt-Guerrero, B., & Cruz-Jaramillo, J. A. (2018). Escenarios futuros del sector metalmecánico. Municipio de Tuluá y su zona de influencia. Horizonte 2018-2028. *Informador Técnico*, *82*(2), 181. doi: 10.23850/22565035.1408
- Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental [BVSDE] (2010)
- Cárdenas, B., Revah, S., Hernández, S., Martínez, A. & Gutiérrez, V. (2003). *Tratamientos biológicos de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas.* México D.C.
- CH. (1997). *Ordinance on the Incentive Tax on Volatile Organic Compounds (OVOC)* – Suiza. http://www.admin. ch/ch/e/rs/8/814.018.en.pdf.
- Colman, E., Müller, A., Lespade, P., Aguilar, M., Matamoros, N., Schlink, U., Massolo, L. & Porta, A. (2011). *Calidad del aire (COVs, MCOVs y Mohos) en áreas urbanas e industriales de la región capital de la provincia de Buenos Aires, Argentina.* Ciencia. 6 (21), 81-95.
- Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2012). *Revisión 4 adaptada CIIU Rev . 4 A . C .* 496. https://www.dane.gov.co/files/nomenclaturas/CIIU_Rev4ac.pdf
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente] (2017). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas [Recurso electrónico] / Gaitán Varón, Mauricio; Cárdenas Ruiz, Paula Andrea - Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. -- Bogotá, D.C.:
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente]. (2010). Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. Recuperado el 18 de septiembre de 2020 de: http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527666/Protocolo+fuentes+fijas.pdf/65780586-e70d-434a-9da7-264d3649b2ba
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible. Bogotá D.C. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010 Páginas: 71

- Comisión Europea (CE). (2000). *Reducing VOC Emissions from The Vehicle Refinishing Sector.* http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/ vehrefinish.pdf.
- Constitución Política de Colombia [Const]. Art. 79. 7 de julio de 1991 (Colombia).
- Cordero-Mora, L. M. (2013). *Propuesta del sistema de tratamiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles COV´s.* https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3232
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [CVC] (2018). *Informe Final Actualización del Inventario de Emisiones de Santiago de Cali.* http://www.cali.gov.co/dagma/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=30513
- Corporación Financiera Internacional [IFC]. (2007). Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad. http://documents1.worldbank.org/curated/fr/862351490601664460/pdf/112110-SPANISH-General-Guidelines.pdf
- Crosswalk Worksheet, (1992). "High-Energy Corona for Destruction of VOCs in Process Off Gases," The 1993 Technology Needs Crosswalk Report, Vol. 3, Appendix H, TTP Reference No.: RL-3211-01, Richland, WA, TRL009.
- de Blas, M. (2009). Desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas de medida de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/12212/Tesis-Maite-de-Blas.pdf;jsessionid=9CBA94089BC38E9D03BD401B2912F7A8?sequence=1
- Decreto 945 de 1995 [Ministerio del Medio Ambiente]. Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. 5 de junio de 1995.D.O. 41876
- Decreto 2811 de 1974 [con fuerza de ley]. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 18 de diciembre de 1974. D.O. No. 34243.
- Decreto Único Reglamentario 1073 de 2015 [Ministerio de Minas y energía]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía. 26 de mayo de 2015. D.O. No.
- Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong [EPD] (2019). http://www.epd.gov.hk/epd/ english/environmentinhk/air/prob_ solutions/files/voc_reg_guide.pdf.
- Derwent, R. (1995). Source, distributions, and fates of VOCs in the atmosphere. In R. E. Hester & R.M. Harrison (Eds), volatile organic compounds in the atmosphere (pp.1- 15). Cambridge, UK: Royal society of Chemistry.
- Díaz Poveda, V. C. (2020). *Evaluación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) biogénicos y antropogénicos del municipio de Manizales* [Universidad Nacional de Colombia]. http://www.bdigital.unal.edu.co/72628/
- DOE. (1994). Technology Catalogue, First Edition. February. https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_13_nfr.html#savannah2
- DOE-RL. (1993). Technical Name: VOC Offgas Membrane Separation, Technology Information Profile (Rev. 3), DOE ProTech Database, TTP Reference No.: RL-9740.
- DOE-RL. (1993). Technology Name: High-Energy Corona, Technology Information Profile (Rev. 2) for ProTech, DOE ProTech Database, TTP Reference No.: RL-3211-01.
- Ebi, K., McGregor, G. (2008). *Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health.* Environmental Health Perspectives. 116(11). 1449-1455.
- European Environment Agency [EEA]. (2012). EEA Glossary, VOC. https://www.eea.europa.eu/help/glossarother-eea-terms/voc .
- Gobierno de la Republica de Colombia, 2019. Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio. Bogotá D.C., Colombia. Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.
- González, L., Beltrán, N. Y. & Picón, R. E. (2019). *Criterios de implementación ISO 14000:2015 Caso Estudio Sector Metalmecánico*. https://padlet.com/padlets/wgut06ahysmk/exports/print.html1/9padlet.com/ramon1163/wgut06ahysmk

- Graedel, T. & Howard-Greenville, J. (2005). Greening the industrial facility: Perspectives, approaches and tools. doi: 10.1007/b136781
- Herce-Vallejo, M., Canas, J., Compte, J., Serena, J. M., & Relea Gines, F. (2011). *Infraestructuras y medio ambiente II: gestión de los recursos, de las emisiones y de los residuos urbanos* (U. O. de Catalunya (ed.)). https://www-digitaliapublishing-com.bdigital.udistrital.edu.co/a/20206/infraestructuras-y-medio-ambiente-ii---gestion-de-los-recursos--de-las-emisiones-y-de-los-residuos-urbanosHK.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2002). Contribution of the Gasoline Distribution Cycle to Volatile Organic Compound Emissions in the Metropolitan Area of Mexico City. Recuperado el 18 de octubre de 2013, de Journal of the air and waste management Association: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10473289.2002.10470803
- Jiménez-Restrepo, N. (2019). Inventario de emisiones atmosféricas por fuentes estacionarias puntuales y estaciones de servicio de combustible en el área urbana del municipio de Santiago de Cali- año 2017 [Universidad Nacional de Colombia]. http://bdigital.unal.edu.co/72679/
- Khan, F., Ghoshal, A. (2000). Removal of volatile organic compounds from polluted air. Journal of Loss Prevention in the process industries. 13. 527-545.
- Kuman, A. & Viden, I. (2007). Volatile organic compounds: sampling methods and their worldwide profile in ambient air. *Environ Monit Assess,* 131(1-3), 301-21. doi: 10.1007/s10661-006-9477-1
- Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental – SINA y se dictan otras disposiciones. 31 de diciembre de 1993. D.O. No. 41146.
- Medina, F. J. M., Jiménez, F. W. M., & Alpuche, E. P. (2016). *Estrategias para disminuir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles COV´s en tanques de almacenamiento de crudo*. *56*(2), 9.
- Menezes, H. C., Amorim, L. C. A., & Cardeal, Z. L. (2013). Sampling and Analytical Methods for Determining VOC in Air by Biomonitoring Human Exposure. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *43*(1), 1–39. doi: 10.1080/10643389.2011.604239
- Michigan Department Of Environmental Quality (s.f.). Emission Calculation Fact Sheet. Coating operations. Recuperado de: https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-aqd-air-eval-era-EmissionCalculation-coating_324042_7.pdf
- Montoya A., J., González B., H., & Ossa, J. (2010). Disminución de emisiones de compuestos orgánicos volatiles (COVs) implementando PML en la fabricación de piezas de plástico reforzado con fibra de vidrio. Scientia Et Technica, 1(44), 367-372. https://doi.org/10.22517/23447214.1873
- Moretti, E. (2002). Reduce VOC and HAP emissions. CEP Magazine. https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2002/june/reduce-voc-and-hap-emissions
- Muñoz, R., Daugulis, A. J., Hernández, M., & Quijano, G. (2012). Recent advances in two-phase partitioning bioreactors for the treatment of volatile organic compounds. *Biotechnology Advances*, *30*(6), 1707–1720. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.08.009
- Pérez Gil, M. del C. (2015). *Aplicación de técnicas de biología molecular para la caracterización de la población microbiana en la degradación de compuestos orgánicos volátiles (COV) mediante biofiltros y biofiltros percoladores*. Universidad de Valencia. https://core.ac.uk/download/pdf/71043547.pdf
- Pérez Vallejo, M. A. (2019). Estimación del efecto del cambio climático en las emisiones de COVs no metanogénicos de origen biogénico en la provincia de Chimborazo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13269/1/236T0466.pdf
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). Perry's chemical engineers' handbook. New York: McGraw-Hill.
- Porta, A. A., Valls, C., Massolo, L., Bauleo, M. F., & Luciani, M. G. (2011). Manual Nacional para Inspectores Ambientales. Argentina: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. http://www.ambiente. gov.ar/archivos/web/Ppnud08/file/Manual%20Nacional%20Inspectores%20Ambientales_Final
- Resolución 909 de 2008. [Ministerio de ambiente, vivienda y Desarrollo territorial]. Por la cual se establecen las normas

y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. 5 de junio de 2008.

- Richardson, (1992). "High-Energy Corona for Destruction of Volatile Organic Contaminants in Process Off-Gases," In Proceedings of Spectrum '92 International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management, Vol. 2, pp. 670- 673, 23-27 August 1992, Boise, ID.
- Rincón-Cuervo, C.G., Ortiz-Vásquez A.M. (2015). Descripción de la jerarquía de controles frente al peligro químico por exposición a compuestos orgánicos volátiles generados por procesos de pintura en el sector industrial. *Investig Enferm. Imagen Desarr,* 17(1). 149-69. http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.IE17-1.djcp
-
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal de México, (2012). Alternativas, procesos y/o equipos de reducción de compuestos orgánicos volátiles. Ciudad de México. Recuperado el 18 de mayo de 2021 de: http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/alternativas-reduccion-cov2012/#p=1.
- Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá [SDA]. (2014). Informe del contrato 1467 de 2013 "Desarrollo e Implementación de un Modelo de Calidad del Aire para Bogotá" suscrito entre la SDA y la Universidad de La Salle. Bogotá D.C.
- SEMARNAT. (2005). Los vehículos automotores como fuentes de emisión. http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/618/vehiculos.pdf
- Schifter, I., Magdaleno, M., Díaz, L., Krüger, B., León, J., Palmerín, M.E., Casas, R., Melgarejo. A., & López-Salinas, E., (2002) Contribution of the Gasoline Distribution Cycle to Volatile Organic Compound Emissions in the Metropolitan Area of Mexico City, Journal of the Air & Waste Management Association, 52:5, 535-541, DOI: 10.1080/10473289.2002.10470803
- Sørensen, F. & Styhr Petersen, H.J. (1992). "Substitution of organic solvents". Staub – Reinhaltung der Luft, 52, 113-118
- Tan, Z. (2014). Air Pollution and Greenhouse Gases. *Green and Energy Technology*. doi: 10.1007/978-981-287-212-8
- UK. (2012) The Volatile Organic Compounds in Paints, Varnishes and Vehicle Refinishing Products Regulations 2012– Reino Unido (http://www.legislation.gov.uk/ uksi/2012/1715/regulation/2/ made).
- USAEC, (1997). "Remediation of Air Streams Contaminated with Trichloroethylene Using Biofiltration at Anniston Army Depot" in Innovative Technology Demonstration, Evaluation and Transfer Activities, FY 96 Annual Report, Report No. SFIM- AEC-ET-CR-97013, pp. 19-20.
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (2017). METHOD 21 - DETERMINATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND LEAKS. Recuperado el 15 de junio de 2020 de: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-08/documents/method_21.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (2015). Speciated VOC Methods – Overview. Recuperado el 15 de mayo de 2021 de: https://www3.epa.gov/ttnemc01/meetnw/2015/speciatedvoc.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (2010). Indoor Air Quality (IAQ). Recuperado el 15 de mayo de 2021 de: http://www.epa.gov/iaq/voc2.html.
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (2009). Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42, Fifth edition). Recuperado el 15 de marzo de 2021 de https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA], (2006). "Method 8260D (SW-846): Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)," Revision 3. Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (1998). Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias. Recuperado el 15 de mayo de 2021 de: https://www3.epa.gov/ttncatc1/dir1/pmcontech2.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA], (1997). National ambient air quality standards for ozone. Fed Reg 62:38855–38896.
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (1994). Membrane Technology and Research, Inc. - Volatile Organic

Compound Removal from Air Streams by Membrane Separations, EPA RREL, Emergency Technology Bulletin, EPA/540/F-94/503.

- U.S. Environmental Protection Agency [EPA]. (1992). SBP Technologies Membrane Filtration, EPA RREL, Demonstration Bulletin, EPA/540/ MR-92/014; and Applications Analysis, EPA/540/AR-92/014.
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA]. (1981). *Other Metal Coating*. https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch04/final/c4s02_2d.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (s.f-a). Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Indoor Air Quality (IAQ). Retrieved July 6, 2020, from https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#8
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (s.f-b). *Electronic Code of Federal Regulations (eCFR)*. Part 60: STANDARDS OF PERFORMANCE FOR NEW STATIONARY SOURCES. Recuperado el 10 de junio de 2020 de: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=c52068b332214999e9abea952a216b6f&mc=true&node=pt40.9.60&rgn=div5#ap40.9.60.a_66
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA] (s.f-c). STANDARD NO. 5 VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS. https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/62.5_-_std_5-2017.pdf
- Valencia, M. C. (2019). Actualización de inventario de emisiones por fuentes móviles y estimación de emisiones atmosféricas por resuspension y distribución de combustible en la ciudad de Manizales [Universidad Nacional de Colombia]. http://www.bdigital.unal.edu.co/72890/2/1053827658.2019.pdf
- Vargas Ramos, Y. E., & Marrugo Negrete, J. L. (2014). Exposición a COVs en fábricas de muebles de dos poblaciones del norte de Colombia. *Revista de Salud Pública*, 16(6), 746–757. doi: 10.15446/rsap.v16n6.38585
- Veira, A.F. (2006). Compuestos orgánicos volátiles como pérdidas por evaporación reducción de emisiones y recuperación de disolventes. *Ingeniería química*, 441, 102-112. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2193049
- Virden, J.W., W.O. Heath, S.C. Goheen, M.C., Miller, G.M., Mong, & Richardson, R.L. (1992). High-Energy Corona for destruction of volatile organic contaminants in process off-gases. *International Nuclear Information System (INIS). https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/016/24016202.pdf?r=1&r=1*
- Weschler, C. J. (2006). Ozone's Impact on Public Health: Contributions from Indoor Exposures to Ozone and Products of Ozone-Initiated Chemistry. *Environmental Health Perspectives,* 114(10), 1489-1496, doi: 10.1289/ ehp.9256.
- Wolfe, G. M.; Thornton, J. A.; McKay, M.; Goldstein, A. H, Forest- atmosphere exchange of ozone: sensitivity to very reactive biogenic VOC emissions and implications for in-canopy photochemistry. Atmospheric Chemistry & Physics. (2011). Vol. 11 Issue 15, p7875-7891. 17p. DOI: 10.5194/acp-11- 7875-2011.
- World Health Organization. [WHO]. (2018). Contexto de salud pública primera conferencia mundial de la OMS sobre contaminación del aire y salud. https://www.who.int/airpollution/events/conference/Air-Pollution_and_Health_Conference_Concept-Note_FINAL_web5-ES.pdf.pdf?ua=1
- World Health Organization [WHO]. (2010) Indoor Air Quality: Selected pollutants. Recuperado el 10 de mayo de 2021 de: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf
- World Health Organization [WHO]. (2000) Air Quality Guidelines for Europe- Recuperado el 10 de mayo de 2021 de: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf
- World Health Organization [WHO]. (1989) Indoor air quality: Organic pollutants, Environmental Technology Letters, 10 (9), 855-858. doi: 10.1080/09593338909384805

1

Anexos

Anexo 1

A-1 Compuestos orgánicos volátiles que presentan riesgo para la salud

Tabla 17. Compuestos orgánicos volátiles que presentan riesgo para la salud.

Compuesto	Dentro de los 33 compuestos tóxicos de aire (U.S. EPA, 1999)	Compuestos orgánicos volátiles que presentan riesgo para la salud según la OMS (2000)
1,1,2,2-Tetracloroetano	*	
1,2-Dicloroetano	*	*
1,2-Dicloropropano	*	
1,3-Butadieno	*	*
1,3-Dicloropropeno	*	
Acetaldehído	*	
Acrilonitrilo	*	*
Acroleína	*	
Benceno	*	*
Cloroformo	*	
Cloruro de vinilo	*	*
Dibromuro de etileno	*	
Diclorometano	*	*
Formaldehído	*	*
Hidracina	*	
Óxido de etileno	*	
Quinolina	*	
Tetracloroetileno	*	*
Tetracloruro de carbono	*	
Tricloroetileno	*	*
Disulfuro de carbono		*
Estireno		*
Tolueno		*

Fuente: adaptada de Blas,2009.

Anexo 2

A-2 Efectos en la salud y propiedades cancerígenas de algunos compuestos orgánicos volátiles

Tabla 18. Efectos en la salud y propiedades cancerígenas de algunos compuestos orgánicos volátiles.

Compuesto	Efectos adversos en la salud debido a la inhalación	Propiedades cancerígenas	
		(U.S. EPA, 2009c)	(IARA, 2009)
Acrilonitrilo	Cancerígeno para animales. La evidencia de que sea cancerígeno para humanos está limitada. Riesgo de padecer cáncer (exposición a 1 µg/m a lo largo de la vida): 2*10-3 (OMS, 2000)	B1	3
Benceno	Cancerígeno, hematotóxico y genotóxico. Riesgo de padecer cáncer (exposición a 0.17 µg/m^3 a lo largo de la vida): 1*10	A	1
1,3-Butadieno	Irritación y efectos adversos en el sistema nervioso central. (OMS, 2000)	A	1
Disulfuro de carbono	Efectos adversos en el sistema vascular y en el sistema nervioso central y periférico. Límite de exposición (24h): 100 µg/m^3 (OMS, 2000)	-	-
Ciclohexano	Efectos adversos en animales causando la reducción del peso de las generaciones sucesivas (US EPA, 2009c, IRIS, 2003)	-	-
Cloruro de vinilo	Cancerígeno para humanos. Riesgo de padecer cáncer (exposición a 1 µg/m^3 a lo largo de la vida): 1*10^{-6} (OMS, 2000)	A	1
1,2-Dicloroetano	Cancerígeno para animales. Efectos adversos en el sistema nervioso central en humanos (OMS, 2000)	-	2B
Diclorometano (cloruro de metileno)	Cancerígeno. Límite de exposición (24 horas): 3 mg/m^3 (OMS, 2000)	-	2B
Estireno	Genotóxico. Causa efectos adversos en el sistema nervioso central (reducción de la agudeza visual y verbal). No hay resultados concluyentes de que sea cancerígeno para humanos. Límite de exposición (30 min) 70 µg/m^3 (OMS,2000)	B2	2B
Etilbenceno	Tóxico para el desarrollo (IRIS, 1991)	-	2B
Formaldehído	Causa irritación de la garganta, nariz y ojos. Límite de exposición (30 min): 0.1 mg/m^3. (OMS, 2000)	B1	1
N-Hexano	Causa neuropatías periféricas (US EPA, 2009C: IRIS, 1991)	D	-
N-Heptano	-	D	-
I-Propilbenceno	Daños en el sistema renal en animales (IRIS, 1993)	D	-
1,1,2,2-Tetracloroetano	-	C	3
Tetracloroetileno	Efectos adversos en el sistema nervioso central o urinario. No hay resultados concluyentes de que sea cancerígeno para humanos. Límite de exposición: 0.25 mg/m^3 (OMS,2000)	B2	2A
Tetracloruro de carbono	Puede causar daños en riñones e hígado (U.S. EPA 2009: IRIS, 2001)	B2	2B

Compuesto	Efectos adversos en la salud debido a la inhalación	Propiedades cancerígenas	
		(U.S. EPA, 2009c)	(IARA, 2009)
Tolueno	Efectos adversos en el sistema nervioso central y en el desarrollo del feto (retardo en el desarrollo, bajo peso al nacer, animalias en el esqueleto). Límite de exposición (30 min): 1mg/m³ (OMS, 2000)	-	3
Triclorobenceno	Genotóxico y cancerígeno para animales. Riesgo de padecer cáncer (exposición a 2.3 µg/m3 a lo largo de la vida) = 1*10-6 (OMS, 2000)	B2	2A
Xilenos	Causan deterioro en la coordinación motora (USEPA 2009: IRIS, 2003)	-	3

Fuente: adaptado de Blas, 2009.

Clasificación US EPA (2009c)

A: cancerígeno para humanos.

B1: cancerígeno probable para humanos, basado en evidencia limitada de que es cancerígeno para humano.

B2: cancerígeno probable para humanos, basado en evidencia limitada de que es cancerígeno para animales.

C: evidencia de que es posible que sea cancerígeno para humanos.

D: no hay suficiente información para clasificarlo como cancerígeno para humanos.

E: no es probable que sea cancerígeno para humanos.

Clasificación Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC, 2020)

1: cancerígeno para humanos.

2A: probable cancerígeno para humanos.

2B: posible cancerígeno para humanos.

3: no clasificable como cancerígeno para humanos.

4: probable no cancerígeno para humanos.

Anexo 3

A-3 Métodos de control

Tabla 19. Métodos de control y tratamiento de compuestos orgánicos volátiles.

Tipo de control	Destrucción por oxidación				
Tecnología	Antorcha	Incinerador tipo recuperativo	Incinerador tipo recuperativo	Incinerador catalítico	Incinerador térmico
% de remoción de compuestos orgánicos volátiles	>98	98 - 99	90 - 99	95 -98	98 - 99
Recomendado para el sector	Producción de plásticos, caucho y recubrimiento	Industria de artes gráficas, recubrimiento, metalmecánica, producción de caucho y plástico, almacenamiento de líquidos volátiles	Recubrimientometalmecánica	Tratamiento de caucho y plástico.	Industria de artes gráficas, recubrimiento, metalmecánica, producción de caucho y plástico, almacenamiento de líquidos volátiles
Concentración de compuestos orgánicos volátiles a tratar	Alta	Por debajo del 0.25*LII	Por debajo del 0.25*LII	Por debajo del 0.25*LII	Por debajo del 0.25*LII
Flujos de caudal	Alta	Medio	Medio	Medio	Medio
Temperatura	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Operación	Proceso continuo con emisiones variable con el tiempo	Proceso continuo	Proceso continuo	Proceso continuo	Proceso continuo
Residuos secundarios	Gases de chimenea	Gases de chimenea	Gases de chimenea	Gases de chimenea	Gases de chimenea

Fuente: adaptado de Cordero-Mora, L. M. (2013).

Tabla 20. Métodos de control y tratamiento de compuestos orgánicos volátiles.

Tipo de control	Captura				Recuperativo	Descomposición biológica
Tecnología	Adsorción con carbón activado	Depurador con lecho de fibra	Depurador con lecho empacado. Torre empacada	Depurador en humedad cámara de aspersión. Torre de aspersión	Condensador	Biofiltro
% de remoción de compuestos orgánicos volátiles	50 – 90	70 - 99	70 - 99	50 - 95	>99	90 – 95
Recomendado para el sector	Almacenamiento de sustancias con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles en tanques, procesos por lotes	Tratamiento de plásticos, caucho y recubrimiento	Tratamiento caucho y plástico	Almacenamiento de sustancias con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles en tranques	En general se recomienda para todos. Limitante el alto costo	Almacenamiento de sustancias con alto contenido de compuestos orgánicos volátiles en tanques, procesos por lotes
Concentración de compuestos orgánicos volátiles a tratar	Media - alta	Media - alta	Media - alta	Baja - media	Media - alta	Baja – media (depende de los compuestos orgánicos volátiles)
Flujos de caudal	Bajo	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo
Temperatura	Ambiental	Ambiental	Ambiental	Ambiental	Como lo requiera el punto de ebullición más bajo de los compuestos orgánicos volátiles presentes en el efluente	Ambiental
Operación	Proceso por lotes	Proceso continuo	Proceso continuo	Proceso continuo	Proceso continuo	Proceso por lotes
Residuos secundarios	Carbón cargado	Efluente líquido contaminado con compuestos orgánicos volátiles	Efluente líquido contaminado con cCompuestos orgánicos volátiles	Efluente líquido contaminado con cCompuestos orgánicos volátiles	Ninguno	Material biológico

Fuente: adaptado de Khan, F., Ghoshal, A. (2000).

Anexo 4

Tecnologías de control

Estas tecnologías se enfocan en dos grupos: las tecnologías de recuperación y las tecnologías destructivas, cada grupo se enfoca de acuerdo con que tan valiosos sean el compuesto y la cantidad presente en las emisiones. El primer grupo busca capturar el compuesto e incorporarlo al proceso productivo nuevamente, sin embargo, esto requiere de etapas para el tratamiento del compuesto orgánico volátil y mayor inversión en el mantenimiento de los sistemas de captura; le segundo grupo busca mediante transformación generar CO_2 y H_2O de la destrucción del compuesto orgánico volátil, este proceso representa una inversión en el consumo de energía, aunque éste se puede minimizar mediante la optimización del proceso o la recuperación de la energía (Cordero-Mora,2013; Muñoz Patiño & Padilla Estrada, 2018; Tan, 2014, pp. 298-304).

Uno de los parámetros más importantes para escoger un método de control es conocer el límite de inflamabilidad, que se puede describir así (límites de inflamabilidad de la mezcla de compuestos orgánicos volátiles/aire), la literatura puede ofrecer información sobre el límite inferior de inflamación (LII) y límite superior de inflamabilidad (LSI) que sirve para conocer si la mezcla puede encenderse o no. Si el valor del LII excede el 25% existe una alta probabilidad de ignición, algunas consideraciones para escoger un método de control dependiendo de los límites de inflamabilidad son:

Tabla 21. Métodos de control y límites de inflamabilidad.

Concentración de compuestos orgánicos volátiles por debajo del LII	Condensación y adsorción de carbono
Concentración de compuestos orgánicos volátiles por encima del LSI	Oxidación

Fuente: Tan, 2014,

Tecnologías destructivas

Incineración u oxidación: también llamada incineración de vapores. Es un proceso en el cual el gas que contiene el contaminante es capturado por un sistema industrial de ventilación, precalentado, mezclado y oxidado a altas temperaturas lo que da como resultado otros compuestos. Los sistemas de oxidación tienen eficiencias de destrucción mayores al 99% y pueden dividirse principalmente en dos tipos: oxidación térmica y oxidación catalítica. La eficiencia de un incinerador puede verse afectada por la concentración de los compuestos orgánicos, la temperatura de ignición y el tiempo de residencia o el volumen del catalizador (Cárdenas *et ál*., 2003).

Los incineradores no se recomiendan para controlar gases que contengan compuestos halógenos o azufre, debido a la formación de cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno gaseoso, bióxido de azufre, y otros gases altamente corrosivos (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal de México, 2012).

Oxidación térmica: básicamente consisten en un sistema que convierte las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y de otros contaminantes peligrosos en agua y dióxido de carbono. En particular, el proceso destruye los compuestos orgánicos volátiles mediante el incremento de la temperatura de las emisiones hasta alcanzar su temperatura de oxidación (aproximadamente 800°C) y manteniendo esta temperatura al menos por medio segundo. Estas unidades tienen una alta eficiencia de remoción, del orden del 99% (Cárdenas *et ál*., 2003; Tan, 2014, pp. 298-304).

Los porcentajes de recuperación de calor pueden llegar hasta un 95%, lo que implica un bajo requerimiento de combustible adicional.

Son recomendables para situaciones en las que los volúmenes de aire son elevados (del orden de 4.7 m^3/s) y las concentraciones de hidrocarburos son bajas (inferior a 1,000 mg/l). Los sistemas de oxidación térmica tienen asociados bajos costos operacionales, buena rentabilidad y prolongada vida útil.

Hay dos sistemas para la recuperación de calor, puede ser regenerativa o recuperativa:

- **Regenerativa:** se lleva a cabo en 2 o 3 torres que están recubiertas por material cerámico, el cual retiene y cede calor durante el proceso, trabaja entre el rango de temperatura de 750 a 1250 °C, se consigue una eficiencia de recuperación térmica superior al 95% y puede tratar un caudal de 1,000-100,000 Nm^3/h. Pueden tratar emisiones con una concentración de compuestos orgánicos volátiles inferior a 1000 ppmv, un ciclo típico es de aproximadamente 30-120 segundos.
- **Recuperativa:** capturan la energía mediante un intercambiador metálico, generalmente es un diseño de tubo y carcasa, se requiere de un periodo corto para que funcione, consiste en una cámara de combustión donde se calienta el aire de entrada y se enfría el aire depurado. Puede tratar una concentración de compuestos orgánicos volátiles inferior a 2000 ppmv. Tiene una eficiencia de recuperación típicamente del 70%.

Oxidación catalítica: los sistemas de oxidación catalítica disponen de una cámara de combustión metálica aislada, equipada con un quemador con control de temperatura y una sección catalítica. Las unidades actualmente comercializadas pueden operar satisfactoriamente con un amplio rango de compuestos orgánicos volátiles.

Bajo ciertas condiciones, un sistema catalítico con metales preciosos puede oxidar los compuestos orgánicos volátiles, contenidos en las emisiones, a temperaturas significativamente más bajas que una unidad de oxidación térmica, entre 300 °C y 550 °C, lo que redunda en menores requerimientos energéticos. En este sistema la emisión contaminada es precalentada en un intercambiador de calor.

Los equipos de oxidación catalítica también pueden abatir los subproductos de la oxidación, como es el monóxido de carbono. Los sistemas de oxidación térmica emiten importantes concentraciones de monóxido de carbono, en tanto que algunos sistemas de oxidación catalítica pueden destruir hasta un 98% del monóxido contenido en las emisiones.

La desventaja inicial de un equipo de oxidación catalítica es la alta inversión inicial requerida, pero esta puede ser compensada por los bajos costos operacionales.

En situaciones donde el volumen de aire es bajo (inferior a 2,4 m^3/s) y la carga de compuestos orgánicos volátiles es alta, el sistema de oxidación catalítica es usualmente la mejor elección. En situaciones donde el volumen de aire es mayor, cuaquiera de los sistemas (catalítico o térmico) es satisfactorio.

Oxidación avanzada de la fase gas: consta de 4 etapas, en la primera etapa se pasa el aire por una solución de agua y ozono, donde se oxidan los gases solubles, en la segunda etapa se añade ozono a los gases provenientes de la primera etapa y se irradia la solución con luz ultravioleta, de esta etapa se produce un aerosol de partículas, el cual es separado en la etapa tres por un precipitador electroestático; se recomienda para caudales bajos.

Tecnologías recuperativas

Adsorción: la adsorción con carbón activado ha sido utilizada por varias décadas para la recuperación de solvente en fase vapor y ha probado ser una técnica relativamente simple, rentable y económica para la prevención de la contaminación atmosférica.

La mayor parte de los solventes industriales pueden recuperarse con carbón activado (Cárdenas *et ál.,* 2003). La adsorción con carbón se utiliza cuando la condensación no es posible debido a la presencia de compuestos no condensables (por ejemplo, tolueno). Existen tres tipos comunes de

carbón activado: granular activado, polvo activado y fibra de carbono. También la silica gel, zeolita, alúmina y polímeros pueden emplearse como adsorbentes. La eficiencia de remoción de contaminantes empleando carbón activado es del 95% y 98%. En casos en los que no se considere la regeneración del adsorbente, se deberá disponer del mismo de acuerdo con la legislación, y en la mayoría de los casos como residuo peligroso.

La tecnología de regeneración de carbón más usada es la de regeneración con vapor de agua. El vapor de agua, dada su elevada temperatura, des adsorbe el solvente desde el carbón y lo conduce fuera de la zona de adsorción a un intercambiador de calor donde la mezcla es condensada y enfriada.

Absorción: los procesos de absorción son métodos de transferencia de masa desde la corriente del aire que contiene la carga de compuestos orgánicos volátiles hasta un líquido absorbente, impulsados por un gradiente de concentración. Las soluciones absorbentes incluyen agua, sosa cáustica, aminas y algunos hidrocarburos. El absorbente empleado dependerá de las características de solubilidad de los compuestos orgánicos volátiles a remover.

Todos los sistemas de absorción buscan mejorar la transferencia de masa, forzando el contacto de la fase líquida con la fase gaseosa, ya sea en paralelo o a contracorriente. Estos sistemas están diseñados para operar en un amplio rango de eficiencias de remoción entre 70% y 99%. El factor más importante que afecta la eficiencia de remoción es la solubilidad del contaminante en el líquido, seguido por la temperatura y el pH. Algunos sistemas que operan bajo este principio incluyen configuraciones tales como las torres de aspersión, torres empacadas o lavadores húmedos (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal de México, 2012) .

Condensación: en este proceso, los contaminantes gaseosos son removidos de la corriente gaseosa mediante el cambio de fase a líquido. Esto se logra incrementando la presión o reduciendo la temperatura o la combinación de ambas, sin embargo, considerando los costos de operación y mantenimiento de los equipos de compresión, la gran parte de los sistemas de condensación para tratamiento de aire operan bajo el principio de reducción de temperatura. La eficiencia de remoción de un condensador es generalmente del 90% y radica principalmente en el punto de rocío y en la temperatura de operación, existen tres tipos de condensadores: los convencionales, los criogénicos y los de refrigeración.

La condensación a temperaturas bajas puede ser factible cuando las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles son altas y solo un tipo de solvente está involucrado. En la mayoría de los casos el costo de refrigeración puede desbalancear los beneficios debido al gran volumen de aire que debe enfriarse. En general para flujos de 3,000 m3/h y concentraciones de compuestos orgánicos volátiles de 5,000 mg/l o mayores, esta técnica es la más recomendada (Cárdenas *et ál*., 2003).

Condensación criogénica: este proceso se basa en el enfriamiento a temperaturas extremadamente bajas del aire por tratar, mediante nitrógeno líquido u otro fluido criogénico, es un proceso de intercambio de calor directo, las ventajas de usar el nitrógeno como refrigerante es que éste no es tóxico, no es corrosivo y no es inflamable. El aire contaminado se enfría progresivamente en los condensadores, por debajo de su punto de rocío, produciéndose la condensación de los compuestos orgánicos volátiles y su separación de la fase gas. Este tipo de tecnología tiene una eficiencia del 99% debido a que la condensación se realiza a bajas temperatura. Trata concentraciones elevadas de compuestos orgánicos volátiles de aproximadamente 5000 ppmv.

Sistemas biológicos

Son una alternativa eficaz y versátil que se basa en la capacidad de los microorganismos para transformar contaminantes de origen orgánico e inorgánico, este proceso consta de varias etapas, el contaminante debe transferirse desde la fase gaseosa a la fase acuosa, para posteriormente

difundirse a través de la biopelícula (asociación de microorganismos embebidos en una matriz), donde ocurre el proceso de degradación de los compuestos orgánicos volátiles. En este proceso se producen principalmente CO_2 y H_2O (Muñoz *et ál*., 2012; Pérez Gil, 2015).

Biofiltración: se define como todo proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos presentes en la fase gaseosa. En la biofiltración, los microorganismos son los responsables de la degradación biológica de los contaminantes volátiles contenidos en corrientes de aire residual.

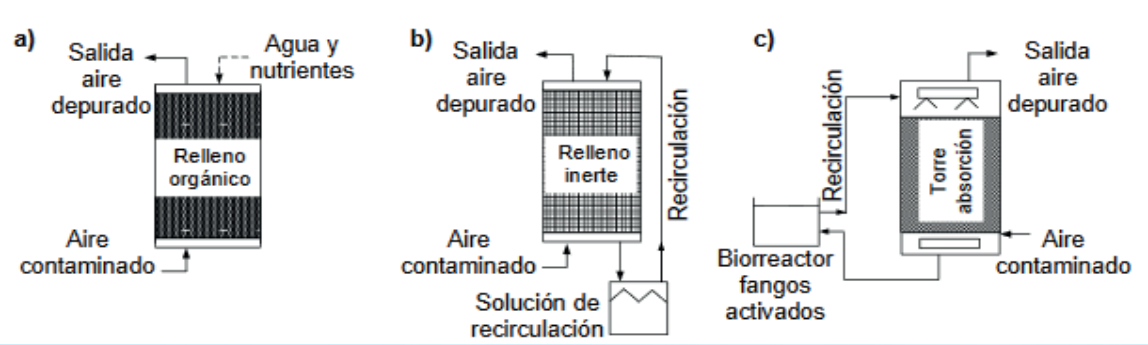
Durante el proceso de biofiltración, el aire contaminado pasa a través de los macroporos del material filtrante. La degradación de los contaminantes ocurre previa transferencia del aire a un medio líquido en donde es utilizado como fuente de carbono y energía (compuestos orgánicos) o como fuente de energía (compuestos inorgánicos). La utilización implica producción de biomasa y la oxidación parcial o total del contaminante. A su vez, la biomasa sufre una oxidación por respiración endógena bajo ciertas condiciones. De esta manera, los procesos de biofiltración dan lugar a una descomposición completa de los contaminantes, creando productos no peligrosos. Existen tres tipos de biofiltros: biolavadores (BL), biofiltro de lecho escurrido (BLE) y biofiltro de lecho fijo (BLF).

Biofiltros percoladores: el material de relleno suele ser inerte (espuma de poliuretano, perlita, material cerámico o anillos de polipropileno) y en la fase líquida se utiliza la recirculación para permitir el control de parámetros de operación. Requieren de menor superficie de operación puesto que pueden diseñarse con mayores alturas. Una desventaja es el crecimiento excesivo de la biomasa (*clogging)*. Dependiendo de la especie de compuestos orgánicos volátiles la carga volumétrica CV varía y está comprendida entre 0-420 g m^{-3} h^{-1} y el tiempo de residencia a volumen vacío (TRW) entre 10-200 segundos, la eficiencia también está en función del compuesto y del material de relleno, por lo que hay eficiencias entre el 20 y el 99%.

Biolavadores: la biomasa se encuentra suspendida en una fase acuosa móvil, el gas es trasferido a la fase acuosa en una torre de absorción que puede contener un soporte inerte, el agua con el contaminante disuelto se trata posteriormente en un biorreactor de fangos activos. Permiten control de las condiciones de operación del sistema, sin embargo, el área de intercambio gas/líquido

es baja, restringiendo su uso a compuestos altamente solubles, además, genera un exceso de fangos.

Figura 17 Representación de biorreactores a) biofiltro, b) biofiltro percolador, c) biolavador.

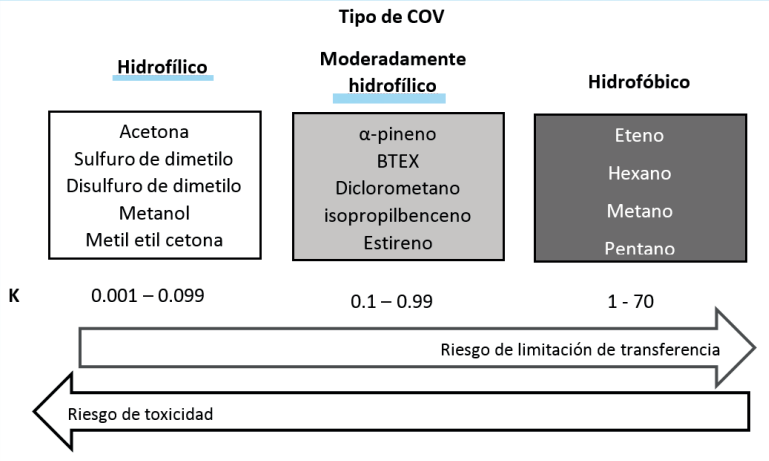


Fuente: Pérez Gil, 2015, p. 44.

Sistemas multifásicos o biorreactores de partición: son reactores utilizados para eliminar compuestos orgánicos volátiles hidrofóbicos, se basan en la adición de una fase no acuosa conocida

como NAP (non-aqueos phase), esta fase favorece la llegada de los contaminantes a la comunidad microbiana responsable de la degradación, especialmente de compuestos como tolueno, hexano o α-pineno. La transferencia de masa está limitada si el compuesto es hidrofóbico, la constante de Henry (K) es única para cada gas y permite clasificar un compuesto en función de la solubilidad, con la Figura 18 se pueden identificar algunos de estos compuestos:

Figura 18 Clasificación de compuestos orgánicos volátiles de acuerdo con la constante de Henry



Adaptado de Muñoz et ál., 2012.

Reactores de tiro o corriente de aire: poseen la biomasa dispersa y adherida a un soporte que también está disperso en un medio líquido, tienen tres zonas; la primera zona de aireación de flujo ascendente, la segunda zona sin aireación o descendente y la tercera zona para la separación de las fases y la salida del efluente gaseoso. Este sistema puede presentar sistemas de presión.

Anexo 5

A-5 Factor de emisión de compuestos orgánicos volátiles

Tabla 22. Factor de emisión de compuestos orgánicos volátiles

Tipo de actividad	Factor de emisión (kg compuestos orgánicos volátiles/kg plástico)
PVC	7.77 E-03
Polietileno	3.18 E-04
Polietileno de alta densidad	
Extrusión	5.00 E-03
Transporte	2.09 E-04
Almacenamiento	4.55 E-06
Polietileno de baja densidad	
Total	4.86 E-03
Recuperación de solventes	1.45 E-03
Extrusión, peletizado, transporte	1.36 E-04
Almacenamiento	
Resinas de urea y formaldehído	6.68 E-03
Resinas de melanina	2.27 E-02
Resinas epóxicas	2.32 E-03
Resina ABS	2.77 E-02
Resinas de poliéter	2.27 E-02
Poliuretano	2.36 E-02
Procesos de separación	9.09 E-04
Manufactura artículos	
Producción de adhesivos	5.68 E-03
Extrusión	3.21 E-05
Producción de películas o cintas	1.29 E-05
Producción de láminas por polimerización	1.59 E-03
Producción de espumas	2.73 E-02
Laminación con secado	9.09 E-03
Moldeo en general	1.43 E-05

Fuente: adaptado de "*Emission Calculation Fact Sheet*", (Michigan Department of Environmental Quality, s.f)

Glosario

- **Calentamiento directo:** es la transferencia de calor por flama o gases de combustión al entrar en contacto directo con los materiales del proceso.
- **Combustión interna:** es aquella en la cual el calor se libera al interior del equipo debido a la reacción de oxidación de los carburantes que se emplean en los motores de explosión.
- **Combustión externa:** es el proceso en el cual el combustible es utilizado para formar vapor fuera del equipo y parte de la energía interna del vapor se emplea para realizar trabajo en el interior del equipo.
- **Compuestos orgánicos volátiles:** son compuestos químicos orgánicos que en condiciones normales son gaseosos o pueden vaporizarse y llegar a la atmósfera. Dentro de los compuestos orgánicos volátiles se incluyen compuestos como el metano, benceno, xilenos, propano y butano. El metano es emitido principalmente por actividades agrícolas, mientras los compuestos orgánicos volátiles no metánicos son emitidos principalmente por el transporte, procesos industriales y el uso de solventes industriales.
- **Concentración de una sustancia en el aire:** es la cantidad de masa de una sustancia por unidad de volumen de aire, u otro gas, en la cual está contenida.
- **Condiciones de referencia:** son los valores de temperatura y de presión con base en los cuales se fijan estándares de calidad del aire y de las emisiones, que equivalen a 298 K y 0.10132 MPa.
- **Contaminación:** es la alteración nociva del estado natural de un medio como consecuencia de la introducción de un agente totalmente ajeno a él, causando inestabilidad, desorden, daño o malestar en un ecosistema, en un medio físico o al ser vivo.
- **Contaminación atmosférica:** es el fenómeno de acumulación o concentración de contaminantes en el aire. Se define también como la presencia de sustancias en el ambiente que, en concentraciones o patrones de exposición científicamente estudiados y catalogados, generan un efecto adverso para la vida, la salud, el bienestar, el paisaje o el equilibrio ecológico de nuestro planeta.
- **Emisión:** es la descarga de una sustancia o elemento al aire, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, proveniente de una fuente fija o móvil.
- **Emisión Fugitiva**: es la emisión ocasional de material contaminante.
- **Emisión molesta:** es aquella generada por sustancias o actividades industriales, comerciales o de servicio, que produce fastidio, aunque no cause daño a la salud humana.
- **Fuente de emisión:** es toda actividad, proceso u operación realizado por los seres humanos de manera directa o indirecta, susceptible de emitir contaminantes al aire.
- **Fuente fija:** es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.
- **Fuente fija dispersa o difusa**: es aquella en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área como consecuencia del desplazamiento de la acción causante de la emisión, por ejemplo, en el caso de las zonas rurales en las que se realizan quemas abiertas controladas.
- **Fuente fija puntual:** es la fuente fija que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas.
- **Incinerador:** equipo destinado a la quema de residuos mediante procesos térmicos, constituido principalmente por dos cámaras instaladas de tal manera que los gases generados por la combustión parcial de los residuos en la primera cámara pasan a una segunda cámara de postcombustión dentro de regímenes de tiempo y temperatura controlados, permitiendo una combustión total. Cada cámara debe contar con sus respectivos quemadores y dispositivos de control de temperatura.
- **Método alternativo:** es el procedimiento de medición y análisis que puede producir resultados similares a los del "método de referencia" en la determinación de la concentración de una sustancia contaminante; puede reemplazar al "método de referencia".

- **Método de referencia**: es el procedimiento de medición y análisis probado exhaustivamente, y realizado bajo estrictos parámetros técnicos, que debe utilizarse para determinar la concentración de una sustancia contaminante.
- **Norma de emisión:** es el valor de descarga permisible de sustancias contaminantes, establecido por la autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad del aire.
- **Residuo peligroso:** es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se consideran residuos o desechos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.
- **Sistema de control de emisiones:** conjunto ordenado de equipos, elementos o maquinaria que se emplean para el desarrollo de acciones destinadas al logro de resultados medibles y verificables de reducción o mejoramiento de las emisiones atmosféricas generadas en un proceso productivo.
- **Sistema de extracción localizada:** toda obra metalmecánica que comprende la instalación de una campana de extracción que opera bajo presión negativa, pero lo suficientemente alta como para capturar sustancias contaminantes en los puestos de trabajo o en el proceso de producción. Luego, las sustancias atrapadas son conducidas a otros sistemas de control de emisiones o ductos o colectores finales de descarga hacia la atmósfera.

Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de **emisiones de compuestos orgánicos volátiles**

El ambiente es de todos

Minambiente

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana

BOGOTÁ D.C. 2021