

Evaluación del riesgo químico por inhalación de percloroetileno en el sector de lavado en seco: comparación entre evaluación cualitativa y cuantitativa, a propósito de un caso

Risk Assessment of Chemical Inhalation of Perchloroethylene in the Dry-Cleaning Sector: Comparison Between Qualitative and Quantitative Evaluation, a case study

Juan David Acero-Mena¹  0009-0007-0715-1484

Karen Rocío López-Castro¹  0009-0001-6454-9436

Maira Fernanda Zambrano-Carrillo¹  0000-0002-1799-4799

¹Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad, Administración de Riesgos, Seguridad y Salud en el Trabajo. Cajicá. Colombia.

Fechas · Dates

Recibido: 18/03/2025

Aceptado: 14/09/2025

Publicado: 15/10/2025

Correspondencia · Corresponding Author

Juan David Acero Mena

est.juan.acero@unimilitar.edu.co

Resumen

Introducción: El percloroetileno (CAS 127-18-4) es un solvente usado en el lavado en seco. Su toxicidad implica riesgos para el sistema nervioso, hígado y riñones, y es considerado probablemente carcinogénico por la International Agency for Research on Cancer (IARC). En Colombia existen límites de exposición laboral, más no regulaciones específicas. Dado que existe evidencia de niveles inaceptables, el objetivo es contrastar la efectividad de la evaluación cualitativa frente al modelo cuantitativo.

Métodos: Se compararon las evaluaciones cualitativa y cuantitativa del riesgo por inhalación de percloroetileno, aplicando el método COSHH Essentials y la metodología del Anexo D de la Guía Técnica Colombiana GTC-45, respectivamente. Para ello, se utilizaron los datos de un estudio de 2025 que sirvieron como base para aplicar el método cualitativo y contrastar ambas estrategias en el contexto de la exposición laboral al percloroetileno en la industria de la tintorería.

Resultados: El método COSHH Essentials clasificó al percloroetileno en el nivel de riesgo más alto (4), sugiriendo controles y una evaluación cuantitativa. Al contrastar ambos enfoques, se evidenció que la evaluación cuantitativa precisa mejor el nivel de riesgo por medio de valores límite permisibles, confirmando el nivel de exposición y orientando controles adecuados, aunque su aplicación supone un mayor costo.

Conclusiones: Los métodos cualitativos permiten evaluaciones económicas y rápidas, pero su precisión es limitada en sustancias críticas como el percloroetileno. La combinación de métodos cualitativos y cuantitativos es clave para gestionar el riesgo de manera efectiva, aunque su implementación enfrenta desafíos económicos en Colombia.

Palabras clave: Percloroetileno; Tetracloroetileno; COSHH Essentials; Riesgo laboral.

Abstract

Introduction: Perchloroethylene (CAS 127-18-4) is a solvent used in dry cleaning. Its toxicity poses risks to the nervous system, liver, and kidneys, and it is considered carcinogenic by the International Agency for Research on Cancer (IARC). In Colombia, occupational exposure limits exist but no specific regulations. Since there is evidence of unacceptable levels, the objective is to contrast the effectiveness of qualitative versus quantitative evaluation.

Methods: Qualitative and quantitative evaluations of the inhalation risk of perchloroethylene were compared, applying the COSHH Essentials method and the methodology from Annex D of the Colombian Technical Standard GTC-45, respectively. For this purpose, data from a 2025 study were used as the basis to apply the qualitative method and to contrast both strategies in the context of occupational exposure to perchloroethylene in the dry-cleaning industry.

Results: The COSHH Essentials method classified perchloroethylene at the highest risk level (4), suggesting controls and a quantitative evaluation. When comparing both approaches, it was found that the quantitative evaluation more precisely determines the level of risk through permissible exposure limits, confirming the level of exposure and guiding appropriate controls, although its application entails higher costs.

Conclusions: Qualitative methods allow for rapid and cost-effective evaluations, but their accuracy is limited in critical substances such as perchloroethylene. The combination of qualitative and quantitative methods is key to effectively managing risk, although their implementation faces economic challenges in Colombia.

Keywords: Perchloroethylene; Tetrachloroethylene; COSHH Essentials; Occupational risk.

Antecedentes

El percloroetileno, también conocido como tetracloroetileno o PERC (C_2Cl_4), es un organohalogenado líquido e incoloro ampliamente utilizado para el lavado en seco debido a sus características fisicoquímicas que le permiten diluir manchas de las prendas. Adicionalmente, se evapora antes de alcanzar el punto de ebullición ($121^\circ C$), logrando ser más eficiente que otros solventes para el lavado en seco.⁽¹⁾

A pesar de su uso frecuente en la industria de lavado en seco, el percloroetileno presenta características toxicológicas relevantes, entre las cuales se destacan efectos por exposición crónica como daños a nivel del sistema nervioso central, deterioro renal, daño hepático⁽²⁾ y riesgo de cáncer de vejiga,⁽³⁾ por lo que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, en sus siglas en inglés) lo clasifica en el grupo 2A como probablemente carcinogénico.⁽⁴⁾

En Colombia, los valores límite permisibles de contaminantes químicos en el aire de ambientes laborales se adoptaron por medio de la resolución 2400 de 1979,⁽⁵⁾ en la cual se adoptan los *Threshold Limit Values* (TLVs) de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH, en sus siglas en inglés). Para el percloroetileno, se establece un *TLV-time weighted average* (TLV-TWA) de 25 ppm en un rango de 8 horas por día o 40 horas a la semana según sea el caso. También, un *TLV-short term exposure limit* (TLV-STEL) de 100 ppm para un lapso de 15 minutos.⁽⁶⁾ Por su parte, la Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH, en sus siglas en inglés) de los Estados Unidos establece un valor *Immediately Dangerous to Life and Health* (IDLH) de 150 ppm.⁽⁷⁾

En Colombia, el uso del percloroetileno es común en la industria de lavado en seco, con aproximadamente ocho mil empresas en esta actividad, de las cuales se estima que solo tres mil están registradas, y 450 de ellas se encuentran en Bogotá.⁽⁸⁾ Además, no existe una regulación específica que restrinja su uso.

Un estudio, sin publicar, realizado en Bogotá evidenció niveles de exposición de hasta 78,17 ppm en tareas breves como la recarga de percloroetileno en las máquinas, acercándose al TLV-STEL de 100 ppm,⁽⁹⁾ lo cual es preocupante teniendo en cuenta el riesgo para la salud derivado de estas exposiciones y especialmente el riesgo de desarrollar cáncer.

Dada la exposición al percloroetileno en los establecimientos de lavado en seco, es fundamental evaluar el riesgo para establecer estrategias de control y proteger la salud laboral. Esta evaluación puede realizarse mediante métodos cualitativos y cuantitativos. Entre los primeros, el COSHH Essentials (Control of Substances Hazardous to Health) es una herramienta británica, cualitativa, que ayuda a pequeñas y medianas empresas a gestionar riesgos químicos, determinando la aceptabilidad del riesgo y emitiendo controles para reducirlo.⁽¹⁰⁾ Por otro lado, se utiliza el análisis cuantitativo, como el sugerido por la Guía Técnica Colombiana GTC-45,⁽¹¹⁾ que mide la concentración del agente químico en el ambiente laboral y la compara con límites permisibles.

El objetivo de esta investigación es realizar la evaluación cualitativa del riesgo químico del percloroetileno en una planta de lavado en seco utilizando el método COSHH Essentials y comparar sus resultados frente a la evaluación cuantitativa realizada en el estudio de Zambrano, López y Basílico (2025)⁽¹²⁾ basado en la metodología GTC-45.

Métodos

Evaluación cualitativa del riesgo químico “Agentes químicos: evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (II). Modelo COSHH Essentials”

Para determinar el riesgo potencial por inhalación con el método COSHH Essentials, se debe iniciar un proceso secuencial de 3 etapas (peligrosidad, volatilidad y cantidad utilizada) para obtener un nivel de riesgo potencial y finalmente unas recomendaciones (Figura 1).



Figura 1. Etapas del modelo COSHH. Elaboración propia basada en las etapas del modelo COSHH Essentials.⁽¹⁰⁾

Etapas 1: Determinación del nivel de peligrosidad

Para determinar la peligrosidad con el método COSHH, se identifican las frases ‘H’ de la sustancia en la sección 2 de la Ficha de Datos de Seguridad (FDS) del agente, la cual debe estar alineada con el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA).⁽¹³⁾ Luego, cada frase ‘H’ se clasifica en una tabla para asignarle un nivel de peligrosidad que va desde ‘A’ hasta ‘E’, siendo ‘A’ el nivel más alto y ‘E’ el más bajo, en donde siempre se tomará como referencia la frase con el nivel más alto para la aplicación del método.

Etapas 2: Determinación de la volatilidad

La volatilidad del agente químico se determina según su punto de ebullición (sección 9 de la Hoja de Datos de Seguridad) y la temperatura de trabajo, como se observa en la Figura 2.

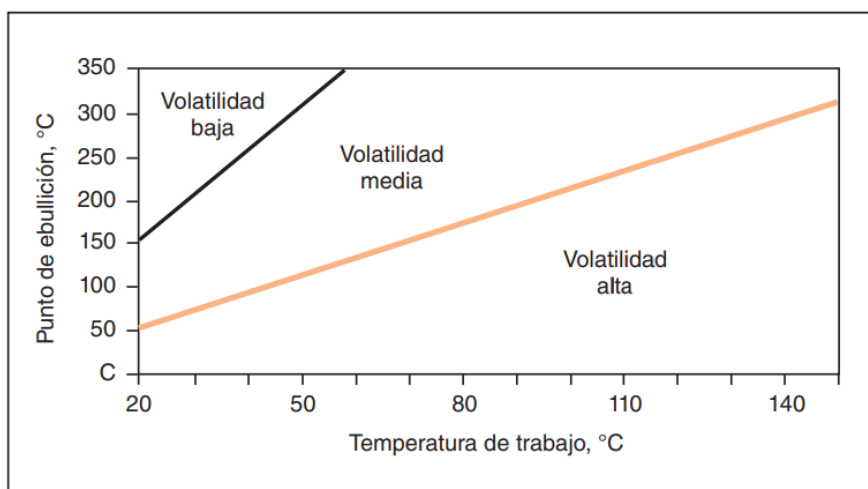


Figura 2. Determinación del nivel de volatilidad Elaboración propia basada en las etapas del modelo COSHH Essentials.⁽¹⁰⁾

Etapas 3: Cantidad utilizada

Se debe evaluar la cantidad de sustancia utilizada en el proceso para clasificarla en una de las tres magnitudes que son: pequeña (g o ml), mediana (kg o L) o grande (t o m³).

Resultado al aplicar el método COSHH Essentials: Riesgo potencial

Al obtener las tres variables (peligrosidad, volatilidad y cantidad utilizada) utilizando la tabla 5 del método (Determinación del nivel de riesgo potencial por exposición a agentes químicos), se llega a una clasificación del riesgo potencial en una escala del 1 al 4, donde nivel 1 requiere controles como ventilación general y buenas prácticas de higiene. El nivel 2 añade ventilación localizada y procedimientos seguros. El nivel 3 exige contención parcial, vigilancia médica y equipos de protección individual (EPI) especializados. Por último, el nivel 4, exige la intervención de un experto en el campo que aplique los controles necesarios.

Evaluación cuantitativa del riesgo químico Metodología GTC-45

La evaluación cuantitativa del riesgo, establecida en el anexo 'D' de la norma GTC-45, requiere conocimientos técnicos y la intervención de un profesional especializado. Este proceso incluye el reconocimiento de instalaciones y puestos de trabajo, la identificación de zonas críticas y tiempos de muestreo, la selección de la metodología de medición, equipos y técnicas adecuadas, y el cálculo del nivel de riesgo ajustado. A continuación, se describen las cuatro etapas de este método.

Etapa 1: Análisis de los puestos de trabajo

Implica observaciones directas en el puesto de trabajo, donde se determinan los cargos y trabajadores que se encuentran expuestos al agente, ya sea de forma directa o indirecta, dependiendo del agente y sus características determinadas en la Ficha de Datos de Seguridad.

Etapa 2: Selección de la técnica de medición

El/la profesional encargado/a de las mediciones deberá contar con una licencia vigente en Seguridad y Salud en el Trabajo para aplicar un método avalado que permita realizar la medición con la técnica adecuada la cual debe ser sensible y específica, para este fin las técnicas de mayor reconocimiento son las del NIOSH y la Occupational Safety and Health Administration (OSHA), USA.

Para seleccionar de forma adecuada la técnica de medición que se debe emplear, la NIOSH implementó un documento denominado *Manual of Analytical Methods*, en el que se recopilan los métodos avalados por la institución para la medición de los agentes químicos y las herramientas requeridas, partiendo de las características de la exposición, ya sean gases, vapores, humos metálicos o material particulado.⁽¹⁴⁾

Posteriormente, las muestras recolectadas deben guardarse en contenedores herméticos y ser enviadas hasta el laboratorio, manejando una cadena de custodia. Es importante asegurarse que el embalaje de las muestras sea el adecuado para evitar contaminación durante el trayecto al laboratorio.

Etapa 3: Cálculo del nivel de riesgo

Una vez se tienen los resultados de concentración, se procede a compararlas con el valor del TLV-TWA. Sin embargo, dado que en algunos casos la jornada laboral es superior a 40 horas semanales, se debe realizar un ajuste de este valor utilizando un modelo que permite establecer el factor de corrección semanal que adapta el TLV a las horas reales trabajadas. Así, se calcula bajo la siguiente ecuación, donde "HS" son las horas trabajadas realmente y las demás variables corresponden al modelo de corrección semanal establecido por Brief y Scala.⁽¹⁵⁾

$$FC = \frac{40}{HS} \times \frac{168 - 48}{128}$$

Etapa 4: Interpretación del nivel de riesgo

La GTC-45 recomienda acciones según el nivel de riesgo encontrado tras realizar una evaluación cuantitativa. En el anexo D de la GTC-45 se presentan los rangos de exposición, la cual se considera mínima cuando los valores de las mediciones personales del agente químico en estudio son inferiores al 10% del límite permisible y no representan peligro. La exposición es baja si se encuentra por debajo del 50% del TLV y en tal caso no requeriría intervención. Una concentración entre el 50-

100% del TLV se conoce como el margen de seguridad, siendo el límite de acción una concentración superior al 50% y finalmente una concentración igual al 100% del TLV representa el límite máximo de exposición (Figura 3).

En la zona marcada por el límite de acción y el límite de exposición se encuentra la zona de exposición moderada y alta, en la cual los puestos de trabajo deben tener un muestreo determinado por cierta frecuencia según la necesidad y el porcentaje obtenido para que dichos límites no sobrepasen el umbral de exposición. En este punto, se recomienda aplicar métodos de vigilancia médica como el monitoreo mediante un biomarcador de exposición al agente en cuestión, ya sea medición en sangre, orina o el específico para cada agente⁽⁶⁾, y también el monitoreo ambiental en las zonas afectadas, preferiblemente mediante muestreos personales.⁽¹¹⁾ Por último, si se supera el valor límite de exposición, se deben aplicar las intervenciones ambientales y sanitarias mencionadas, así como antener un monitoreo constante de la sustancia para determinar su evolución en el ambiente.⁽¹¹⁾

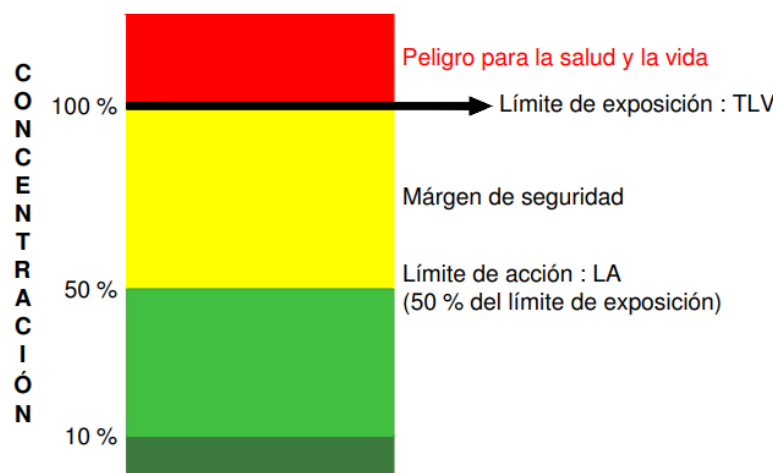


Figura 3. Rangos de exposición de la GTC-45 Anexo D (11).

Resultados y Discusión

Para el presente estudio se utilizaron los datos publicados por Zambrano, López y Basilio 2025⁽¹²⁾, quienes realizaron una evaluación cuantitativa del riesgo químico por inhalación de percloroetileno en una planta de lavado en seco, aplicando la metodología establecida en la GTC-45, en su anexo D. A partir de estos mismos datos, se desarrolló un análisis cualitativo empleando el método COSHH Essentials, descrito en la guía técnica oficial emitida por el Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido.⁽¹⁰⁾

Evaluación cualitativa del riesgo químico “Agentes químicos: evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (II). Modelo COSHH Essentials”

Etapas 1: Determinación del nivel de peligrosidad

En el caso del percloroetileno, sus frases ‘H’ tomadas de la Ficha de Datos de Seguridad, (13) lo ubican en el nivel de peligrosidad más alto, es decir en nivel “E” (Tabla 1), donde se listan las frases ‘H’ de la FDS y se asocian con el nivel de peligrosidad que les corresponde según el método.⁽¹⁰⁾

Tabla 1. Frases de peligro del percloroetileno, asociadas al nivel de peligrosidad del método COSHH. Elaboración propia basada en las etapas del modelo COSHH Essentials.⁽¹⁰⁾

	Niveles de peligrosidad				
	Nivel A	Nivel B	Nivel C	Nivel D	Nivel E
Frases H asociadas	H315 – Provoca irritación cutánea	Sin frases clasificadas	H336 – Puede provocar somnolencia o vértigo	Sin frases clasificadas	H350 – Sospechoso de causar cáncer
	H317 – Provoca reacción alérgica en la piel	Sin frases clasificadas	Sin frases clasificadas	Sin frases clasificadas	Sin frases clasificadas
	H319 – Provoca irritación ocular grave	Sin frases clasificadas	Sin frases clasificadas	Sin frases clasificadas	Sin frases clasificadas

Etapas 2: Determinación de la volatilidad

Para el percloroetileno, con un punto de ebullición de 121,4 °C y una temperatura de uso en lavanderías de 70-80 °C, su volatilidad se clasifica como "alta" utilizando la gráfica de volatilidad provista en el método COSHH (Figura 4).

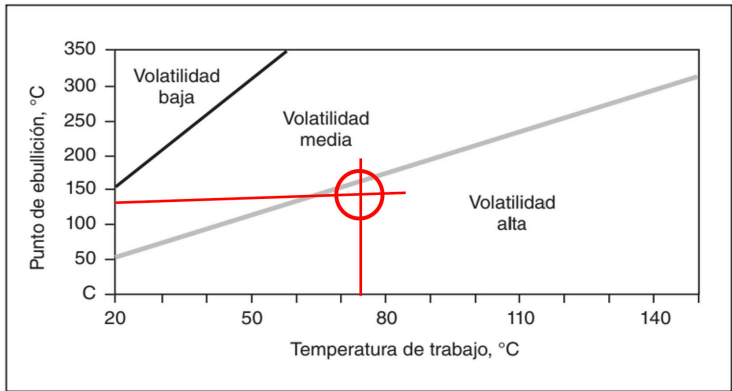


Figura 4. Determinación del nivel de volatilidad Elaboración propia basada en las etapas del modelo COSHH Essentials.⁽¹⁰⁾

Etapas 3: Cantidad utilizada

En este caso, se partió de un volumen de 15 gal (56,7 L) utilizados en la máquina de lavado en seco de dicha lavandería, donde se lavan aproximadamente 1.500 prendas en una semana.⁽¹²⁾ De acuerdo con lo anterior, la cantidad de sustancia utilizada, según el método COSHH, en este caso, sería una cantidad “mediana”.

Resultado al aplicar el método COSHH Essentials: Recomendaciones

El percloroetileno, debido al nivel de peligrosidad otorgado por la frase H350 (sospechoso de causar cáncer) es clasificado en el nivel de riesgo potencial 4 según el modelo COSHH, requiere una evaluación cuantitativa y la intervención de un experto debido a su toxicidad y posible relación con el cáncer. Las medidas generales del método para niveles de riesgo potencial menores (1, 2 o 3) no son suficientes para estas sustancias. Esto también aplica a los compuestos etiquetados con frases H de riesgo grave, independientemente de su volatilidad o cantidad utilizada, por lo que es fundamental aplicar controles adecuados, quedando corto en efectividad frente a estos agentes.⁽¹³⁾

Evaluación cuantitativa del riesgo químico Metodología GTC-45

A continuación, se describen las etapas de la evaluación de riesgo por exposición a percloroetileno en la planta de lavado en seco.

Etapas 1: Análisis de los puestos de trabajo

En el caso del percloroetileno, estudios previos indican que las plantas de lavado en Colombia usualmente carecen de sistemas de extracción de aire localizados o exhaustivos.⁽¹²⁾

Respecto a los puestos de trabajo, en las plantas de lavado en seco, suelen identificarse cuatro puestos de trabajo principales con jornadas de 8 o más horas diarias, en las que, en ocasiones, los empleados toman su hora de almuerzo dentro de las instalaciones. Estos puestos son: operario de lavado en seco, operario de lavado en frío, prensista y recepcionista

El percloroetileno es manipulado directamente por el operario de lavado en seco, quien realiza las tareas de: 1) recarga de percloroetileno en una máquina de lavado que usualmente es de quinta generación (de forma manual cada 3-6 meses con una duración de la tarea de aproximadamente 15 minutos), 2) Cargue y descargue de prendas en el tambor de lavado (tarea que tarda aproximadamente 10 minutos y se realiza entre 2- 45 veces por semana) y 3) remoción de lodos y destilado del percloroetileno (tarea que se realiza cada 2 semanas y tiene una duración de aproximadamente 2 horas).

Las observaciones en el escenario laboral en cuestión permiten ver que el operario de lavado en seco podría tener una alta exposición al percloroetileno debido a la naturaleza y frecuencia de sus tareas. Otros trabajadores también estarían en riesgo por la inhalación de vapores emitidos por la máquina o la ropa durante el

planchado. Por ello, es fundamental que el profesional encargado de la medición analice previamente los puestos de trabajo para identificar las tareas con mayor riesgo de exposición y seleccionar adecuadamente los puestos a muestrear, garantizando datos confiables sobre el nivel de exposición.

Etapa 2: Selección de la técnica de medición

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, en sus siglas en inglés) afirma que el percloroetileno se dispersa en el ambiente en forma de vapor, por lo que para su medición se requiere de un medio de captación que permita capturar las moléculas dispersas en el aire.⁽¹⁵⁾ Para ello, el método NIOSH 1003, para la determinación de hidrocarburos halogenados, especifica que se deben utilizar tubos absorbentes de carbón activo, conectados a una bomba de succión continua (un ejemplo de bomba de succión, puede ser la bomba Gilair3) calibrada previamente, que permita el paso del flujo de aire y capture de esta forma las moléculas de la sustancia.⁽¹⁴⁾ Una vez el equipo de medición se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento, se debe determinar el medio y el caudal de la recolección.

Para poder tener más información de este proceso, se consultó el estudio de Zambrano, López y Basilico (2025) en el que se realizó la evaluación cuantitativa de percloroetileno en varias plantas de lavado en seco, y en el que el muestreo se realizó cerca de la zona de respiración (medición personal) utilizando un caudal de 0,15 L/min, un volumen máximo de 40 L y tiempos de muestreo representativos de la jornada laboral de al menos 6 h.⁽¹²⁾

Posteriormente, las muestras son analizadas utilizando la técnica de la cromatografía de gases FID (Flame Ionization Detection) para finalmente ser comparadas con el valor límite de exposición vigente de la ACGIH.⁽⁶⁾

Etapa 3: Cálculo del nivel de riesgo

Dado que en Colombia el trabajo semanal tiene una duración límite de 48 horas semanales para 2023,⁽¹⁸⁾ se debe ajustar la ecuación del modelo Brief y Scala⁽¹⁵⁾ para obtener el factor de corrección, que en este caso es de 0.774. Por otro lado, el TLV para el percloroetileno, según la ACGIH es de 25 ppm (6), lo que, multiplicado por el factor de corrección, da como resultado un TLV corregido de 19,35 ppm.

$$FC = \frac{40}{48} \times \frac{168-48}{128} = 0,83 \times 0,93$$

$$FC = 0,774$$

$$\text{TLV corregido} = 25 \text{ ppm} \times 0,774 = 19,35 \text{ ppm}$$

Etapa 4: Interpretación del nivel de riesgo

En el estudio realizado por Zambrano, López y Basílico, se calcularon los niveles de exposición de percloroetileno en un rango de 0,001-7,22 ppm (0,009-49 mg/m³), dando como resultado una concentración del 37% comparando el TLV ajustado de 19,35 ppm con el nivel de exposición más alto evaluado de 7,22ppm. A pesar de que este margen se encuentra dentro del límite de acción, el percloroetileno, al ser posiblemente carcinogénico, se recomienda mantener en un nivel de exposición por debajo del 10% del TLV, lo que implicaría en este caso particular, la intervención de un experto, que determine los controles necesarios para cada caso y puesto de trabajo.⁽¹²⁾

Adicionalmente a las mediciones ambientales, una de las ventajas del método cuantitativo es que permite integrar biomarcadores a la evaluación para medir la exposición biológica y sus efectos en el organismo. En el caso del percloroetileno, su medición en aire exhalado o en sangre, junto con controles ambientales, facilita un monitoreo más preciso del riesgo. Sin embargo, en la práctica, en países como Colombia en donde existe alta informalidad laboral en el sector de lavado en seco, el alto costo del método cuantitativo genera una limitación importante para su aplicación, pues el costo monetario de una sola medición personal se encuentra en un rango entre 134-278 USD, lo que lo hace inaccesible para pequeñas industrias como las lavanderías en seco que suelen tener recursos limitados. Por ejemplo, el salario mensual de un trabajador ronda el 1.032.245 COP, equivalente a 241 USD en promedio.⁽¹⁹⁾

Resultado al aplicar el método GTC-45

Dado que el método GTC-45 compara directamente la exposición al agente con sus valores límite permisibles, su rigurosidad al emitir controles ofrece un margen de acción más preciso y representativo de la realidad⁽¹¹⁾, lo que evidencia una efectividad superior en contraste con el método cualitativo.

Conclusiones

Los métodos cualitativos (como el modelo COSHH Essentials) permiten una evaluación inicial rápida y económica, ideal para contextos con recursos limitados (pequeñas empresas o sectores informales). Sin embargo, su eficacia se reduce frente a agentes críticos como el percloroetileno (clasificado en peligrosidad E), donde se requiere transitar a métodos cuantitativos que integren comparaciones de valores de percloroetileno de monitoreos personales versus los límites de exposición ajustados (TLV) para garantizar precisión. Esta interdependencia resalta la necesidad de usar ambos enfoques secuencialmente: cualitativo para priorización y cuantitativo para validación en escenarios de alto riesgo.

Mientras el método cuantitativo ofrece claridad mediante parámetros como tiempo de exposición, concentraciones ambientales y umbrales toxicológicos, su alto costo lo hace inaccesible en economías emergentes, como Colombia, don-

de predominan lavanderías informales. En contraste, herramientas cualitativas como COSHH Essentials son viables para estas realidades, aunque su simplificación puede subestimar riesgos en sustancias carcinogénicas, exigiendo protocolos adaptativos que combinen escalas cualitativas con muestreos puntuales cuantitativos.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Militar Nueva Granada por su apoyo con el desarrollo de la investigación, materializado a través del financiamiento otorgado mediante el proyecto INVEES 3781.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización de este estudio, ni en la elaboración, análisis o publicación del presente artículo.

Bibliografía

1. Letrado C, Gonzales A. Desarrollo de un biosustituto del Percloroetileno a base de etanol y lecitina [Tesis de pregrado]. Bogotá: Universidad de los Andes; 2018.
2. Habib S, Ahmed HO, Al-Muhairi N, Ziad R. Preliminary Study: Environmental Assessment of Perchloroethylene in Dry-Cleaning Facilities in the UAE. *J Environ Public Health*. 2018;2018:1732906. doi: 10.1155/2018/1732906.
3. Callahan CL, Stewart PA, Blair A, Purdue MP. Extended Mortality Follow-up of a Cohort of Dry Cleaners. *Epidemiology*. 2019;30(2):285-290. doi: 10.1097/EDE.0000000000000951.
4. (IARC) AlplIdC. Agents Classified by the IARC Monographs Volume 1-137 Lyon (Fr): IARC; 2025. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc>
5. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (Colombia). Resolución 2400 de 1979, 22 mayo 1979. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2400%20-%201979.pdf>
6. (ACGIH) ACoGIH. 2025 TLVs and BEIs Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. 2025th ed. Cincinnati: ACGIH; 2025. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines>
7. Barsan M. NIOSH pocket guide to chemical hazards Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); 2005. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/pdfs/2005-149.pdf>
8. Zamora A, Narvaez D, Sánchez A, Trujillo L, García L. Análisis del sector de lavanderías y tintorerías de la ciudad de Bogotá, Colombia. [Online]. Bogotá; 2019 [citado 22 Ene 2025]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/333660138>.

- 9.** Barreto S, Cervantes Y. Evaluación del Riesgo por el uso de percloroetileno en el proceso de lavado en seco en una lavandería de la localidad de Suba en la ciudad de Bogotá.[tesis de pregrado]. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada; 2018.
- 10.** Health and Safety Executive. COSHH essentials: Easy steps to control chemicals. Control of Substances Hazardous to Health Regulations. Sudbury; 2003. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: https://www.aber.ac.uk/en/media/departamental/healthsafetyenvironment/coshh_essentials_hsg193.pdf
- 11.** (ICONTEC) ICdNTyC. Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional. Bogotá: Icontec; 2012. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: http://132.255.23.82/sipnvo/normatividad/GTC_45_DE_2012.pdf
- 12.** Zambrano Carrillo MF, López Castro K, Basilico S. Personal air monitoring and biological assessment of perchloroethylene exposure in workers in the dry-cleaning industry in Bogotá, Colombia. *Ann Work Expo Health*. 2025 24;69(4):453-457. doi: 10.1093/annweh/wxaf009. .
- 13.** (ONU) OdNU. Sistema Globalmente Armonizado De Clasificación Y Etiquetado De Productos Químicos (SGA/GHS). 10th ed. Europa CEp, editor. Ginebra; 2023. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://unece.org/sites/default/files/2023-07/GHS%20Rev10e.pdf>
- 14.** (NIOSH) NifOSaH. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM). 5th ed. Cincinnati, Ohio.: U.S. Department of Health and Human Services, CDC, NIOSH; 2023. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/NMAM_5thEd_EBook-508-final.pdf
- 15.** Brief RS, Scala RA. Occupational exposure limits for novel work schedules. *Am Ind Hyg Assoc J*. 1975;36(6):467-9. doi: 10.1080/0002889758507272..
- 16.** INSHT. Agentes químicos: evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (II). Modelo COSHH Essentials. 2012. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/214929/2.COSHH%20ESSENTIALS.pdf>
- 17.** ATSDR. Resumen de salud pública Tetracloroetileno. Atlanta.; División de Toxicología y Medicina Ambiental; 1997. [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp18-c1-b.pdf>
- 18.** La República. Con 48 horas semanales, Colombia es el país de la OCDE con la jornada laboral más larga. [Online]; 2023 [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/con-48-horas-semanales-colombia-es-el-pais-de-la-ocde-con-la-jornada-laboral-mas-larga-3546129>.
- 19.** Computrabajo. Salario promedio puesto Lavandería en Colombia. [Online]; 2023 [citado 22 Jul 2025]. Disponible en: <https://co.computrabajo.com/salarios/lavanderia>.