

Clasificación del riesgo químico de solventes orgánicos mediante la aplicación del método “CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents”

Chemical risk classification of organic solvents by using the “CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents”

Jose Carlos Mora-Barrantes¹, Leticia Morera-Ramos²,
Melany Ulate-Salas³, Valery Núñez-Agüero⁴, Edwin Acuña-Salazar⁵,
Mariel Cordero-Carvajal⁶

Fecha de recepción: 24 de octubre de 2020
Fecha de aprobación: 19 de enero de 2021

Mora-Barrantes, J.C; Morera-Ramos, L; Ulate-Salas, M; Núñez-Agüero, V; Acuña-Salazar, E; Cordero-Carvajal, M. Clasificación del riesgo químico de solventes orgánicos mediante la aplicación del método “chem21 selection guide of classical- and less classical-solvents”. Un caso de estudio en cursos de docencia universitaria de química orgánica y bioquímica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-1. Enero-Marzo 2022. Pág 28-43.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5370>

- 1 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 2 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: leticia.morera.ramos@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8346-7754>
- 3 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: melany.ulate.salas@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2230-2176>
- 4 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: valery.nunez.aguero@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6851-3118>
- 5 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: edwin.acuna.salazar@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5366-7218>
- 6 Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: mariel.cordero.carvajal@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5416-7776>



Palabras clave

CHEM21; solvente orgánico; riesgo; seguridad; salud; medio ambiente; laboratorio; universidad.

Resumen

Un solvente orgánico (SO) es un compuesto, generalmente líquido, que contiene carbono y que posee la característica de disolver otras sustancias. A nivel industrial, son utilizados en operaciones de disolución de reactivos, extracción, lavado y separación de mezclas, además son empleados en laboratorios de docencia universitaria. A pesar de sus múltiples aplicaciones, la mayor parte de los solventes orgánicos son altamente volátiles, influyendo en la contaminación del aire y agua, así como en la salud de las personas. El objetivo de la presente investigación es evaluar el impacto en la seguridad, la salud y en el ambiente por el uso de solventes orgánicos en cursos de laboratorio de bioquímica, química orgánica I y II, mediante la aplicación de la guía denominada "CHEM21 Selection Guide of Classical-and Less Classical Solvents".

Se recopilaron las características fisicoquímicas y toxicológicas de los solventes en estudio para clasificarlos de acuerdo con la guía CHEM21. Los resultados clasifican la mayoría de los solventes como "problemáticos" con un porcentaje de 41, un 28% se categorizan como "recomendadas" y 31% como "peligrosos". Dentro de las características de los SO peligrosos se destacan su bajo punto de ebullición, fusión y los significativos daños a la salud y medio ambiente. De acuerdo con los resultados obtenidos se considera al curso de orgánica I como el de mayor riesgo, debido a su mayor porcentaje de solventes "peligrosos" y "problemáticos". Se considera el curso de bioquímica como de menor riesgo, principalmente debido al menor uso de solventes orgánicos.

Keywords

CHEM21; organic solvent; risk; safety; health; environment; laboratory; university.

Abstract

An organic solvent (OS) is a compound, typically liquid, that contains carbon and the characteristic of dissolving other substances. At industrial level, organic solvents are used in reagent dissolution operations, extraction, washing and separation of mixtures, they are also used in university teaching laboratories. Despite its multiple applications, most organic solvents are highly volatile and influence air and water pollution, as well as in people's health. The objective of this research is to assess the impact on safety, health and the environment from the use of organic solvents in organic chemistry and biochemistry teaching courses, by applying the specific guide "CHEM21 Selection Guide of Classical-and Less Classical Solvents".

The physicochemical and toxicological characteristics of the solvents under study were compiled to classify them according to the CHEM21 guideline. The results classify most solvents as "problematic" with a percentage of 41, the 28% are categorized as "recommended" and 31% as "hazard". Among the characteristics of dangerous OS highlights its low boiling, melting point and the significant damage to health and environment. According to the obtained results, organic I course is considered the most dangerous, due to its higher percentage of "hazardous" and "problematic" solvents. Biochemistry course has the lower risk, mainly due to the less use of solvents.

Introducción

Un solvente orgánico es un compuesto químico que contiene carbono y se utiliza para disolver otras sustancias como pinturas, barnices, grasa y aceite. Estos se caracterizan por ser volátiles lo cual significa que son disolventes que se evaporan a temperatura y presión ambiental generando vapores. [1] De manera simple se puede definir un solvente como un material (generalmente es líquido) que tiene la capacidad de disolver a otro formando una solución. El más común en la vida diaria es el agua, pero existen también solventes orgánicos (SO) que tienen en su estructura enlaces carbono-hidrógeno [2].

Una característica importante de los SO es su volatilidad, los compuestos orgánicos volátiles (COV's) son hidrocarburos de 2 a 20 átomos de carbono, estos se pueden clasificar en ligeros (2-11 átomos de C) y pesados (12-20 átomos de C) [3]. Además, poseen un punto de ebullición inferior a 250°C, cuánto mayor sea la volatilidad (menor el punto de ebullición), con mayor facilidad será emitido desde un producto o superficie hacia el aire. [4].

A nivel industrial, los solventes orgánicos son ampliamente utilizados en operaciones de disolución de reactivos, extracción, lavado y separación de mezclas [5]. Los SO forman parte de una amplia variedad de productos [6]. Según el Instituto Francés de Seguridad e Higiene (INRS) constituyen lacas y barnices (46%), productos farmacéuticos (9%), colas y pegamentos (6%), tintas de impresión (6%), productos cosméticos (6%), desengrasantes (4%), plaguicidas (2%) y productos de limpieza en seco (1%). Los disolventes más producidos a nivel mundial son ciclohexano, cloruro de metileno, cloroformo, acetona, tolueno, alcohol etílico y otros [7].

Los solventes se clasifican, de forma general, en suaves o fuertes para referirse a su poder disolvente en función del material que se desea disolver, y también de forma específica en familias (Hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos alicíclicos, hidrocarburos halogenados, alcoholes, glicoles, cetonas, ésteres, ésteres de ácidos grasos, éteres, éteres de glicol, terpenos, ácidos orgánicos y mezclas complejas de composición variable) , según el grupo químico al que pertenecen [7].

A pesar de sus útiles y múltiples aplicaciones, la mayor parte de los solventes orgánicos son altamente volátiles, influyendo en la contaminación del aire y agua [8]. Los SO ingresan al aire por evaporación, para luego fotodegradarse o bien reaccionar con radicales gaseosos que promueven su oxidación [9]. A diferencia de los compuestos polares que se degradan con facilidad, algunos son persistentes en el ambiente, como los componentes volátiles clorados, que poseen una vida media de décadas en el medio acuático. La permanencia de los solventes orgánicos en el medio ambiente contribuye al calentamiento global y a la disminución de la capa de ozono [10]. Además, los COV's debido a su reactividad, producen la formación de compuestos secundarios en la atmósfera como el ozono troposférico (O_3), principal componente del smog fotoquímico [3].

Otra implicación relacionada al uso de solventes orgánicos es su nivel de inflamabilidad, explosividad y toxicidad para los seres humanos, animales y plantas [5]; en especial los compuestos clorados e hidrocarburos, los cuales poseen efectos crónicos negativos en la salud como cáncer y mutaciones [10]. Además, la exposición a mezclas de solventes, de estireno o tolueno, se ha relacionado con la degeneración auditiva y de balance [11].

En su mayoría, los SO son peligrosos y existen características que intensifican dicha peligrosidad, poniendo en riesgo la salud y el medio ambiente, dichas características son: volatilidad, liposolubilidad, toxicidad, inflamabilidad, explosividad y bioacumulación [12]. Como resultado de estos efectos adversos, existen regulaciones para evitar la exposición a los COVs, principalmente aquellos con clasificación de problemáticos. La legislación del gobierno Español indica que en una instalación donde se usen COVs con peligros carcinogénicos, mutagénicos

o que afecten la fertilidad, se tendrán límites de 2 mg/Nm^3 para las frases H340, H350, H350i, H360D o H360, las cuales deberán ser sustituidos en la medida de lo posible. Además, los COVs halogenados con frase H341 o H351 deberán tener un límite de emisión de 20 mg/Nm^3 [13].

El uso de solventes orgánicos no se limita únicamente al sector industrial, en laboratorios de docencia universitaria de cursos de química orgánica y bioquímica, también se utilizan SO, entre los más destacados se mencionan: hidrocarburos alifáticos, cíclicos, aromáticos, halogenados, cetonas, aminas, ésteres, alcoholes, aldehídos y éteres [14]. Estos compuestos se caracterizan por disolver de manera eficiente los compuestos orgánicos, además, son insolubles en agua, facilitando su separación de este medio [10]. Desde cada recinto educativo se promueve la prevención y la reducción del uso de solventes y se implementan metodologías para la evaluación del riesgo de exposición [12].

Debido a los peligros y riesgos asociados de los SO, tanto para el medio ambiente como hacia la salud del ser humano, surgen esfuerzos de organizaciones protectoras del medio ambiente, sistemas de salud y gobiernos por controlar el consumo y producción de estos [10]. Los esfuerzos incluyen la reducción del uso de solventes y la aplicación de metodologías para la evaluación del riesgo de exposición, así como para la selección de solventes orgánicos con un menor impacto hacia la salud y los ecosistemas naturales [15].

Existen metodologías simples para evaluar el riesgo químico de los reactivos, tanto por inhalación como por vía dérmica y para evaluar su seguridad; estas poseen la cualidad de no necesitar la toma de muestras y el posterior análisis de estas, además, son aplicables a sustancias que no tienen establecido un valor límite ambiental [16]. Algunos de estos métodos, que consideran los factores de riesgo de los SO son: Método basado en el COSHH Essentials del Health and Safety Executive (HSE) como la evaluación simplificada del riesgo por inhalación (I) y (II) [17], [18]; método basado en lo propuesto por Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), también aplicado para exposición vía inhalación y con objetivos más complejos [16], [19], [20], NTP 897-Exposición dérmica a sustancias químicas evaluación y gestión del riesgo del INSHT [21], NTP 135: Seguridad en el laboratorio. "Cuestionario de Seguridad", del INSHT [22] y NTP 934 Agentes químicos: metodología cualitativa y simplificada de evaluación del riesgo de accidente, del INSHT [23].

Una metodología de evaluación de exposición a solventes, de aplicación simple y rápida, que permite clasificarlos según su nivel de riesgo, y que es de carácter descriptiva, facilitando por lo tanto la escogencia segura de los SO para cursos de docencia, o en flujos industriales y empresas farmacéuticas es la *CHEM21 selection guide of classical-and less classical-solvent*, la cual evalúa un solvente orgánico en función a criterios de seguridad, salud y ambiente (SH&E) [12]. Esta metodología fue desarrollada por la asociación europea, Innovative Medicines Initiative (IMI)-CHEM21, compuesta por seis compañías farmacéuticas europeas de la Federación de Industrias y Asociaciones Farmacéuticas (EFPIA), diez universidades y cinco pequeñas y medianas empresas. IMI-CHEM21 promueve metodologías biológicas y químicas sostenibles, además apoya financieramente proyectos de investigación y proporciona un paquete de capacitación que garantiza que los principios de sostenibilidad se apliquen y enseñen a los estudiantes [12].

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el impacto en la seguridad, la salud y en el medio ambiente por el uso de solventes orgánicos en cursos de docencia de química orgánica y bioquímica, mediante la aplicación de la guía denominada "CHEM21 Selection Guide of Classical-and Less Clasical Solvents".

Metodología

La evaluación del impacto en la seguridad, la salud y en el ambiente por el uso de solventes orgánicos en cursos de docencia de química orgánica y bioquímica se realizó mediante la aplicación de la guía denominada “CHEM21 Selection Guide of Classical-and Less Classical Solvents” [12]. Los SO evaluados son los incluidos en los manuales experimentales de los diferentes cursos que se imparten para la carrera de Química Industrial y cursos de servicios de otras carreras en la Universidad Nacional de Costa Rica. [24], [25], [26].

Para cada solvente orgánico utilizado en los diferentes experimentos, se recopiló información relativa a constantes fisicoquímicas, toxicológicas, riesgos asociados; a la salud humana, a sistemas medio ambientales como los acuáticos, a la atmósfera; así como medidas de seguridad relacionadas a la gestión de productos orgánicos. La principal fuente de información para la obtención de los datos fueron las fichas de seguridad de reactivos, extraídas de páginas web de la UNA, MSDSonline y labchem.com (27,28,29). Recopilados todos los datos anteriores, se obtuvieron los valores de las variables de la salud, seguridad y ambiente (SHE) utilizados por el método. Finalmente, cada solvente se categorizó como “recomendado”, “problemático” y “peligroso” según los criterios de la guía CHEM21 (Cuadro 1). La escala utilizada por el método aplicado para los tres criterios (salud, seguridad y ambiente) oscila entre 1 y 10, representando el valor de 1 el menor riesgo y el valor de 10 el mayor riesgo (cuadros 2, 3 y 4).

Cuadro 1. Clasificación para los criterios seguridad, salud y ambiente (SHE)-Guía CHEM21.

Valor	Color	Significado
1, 2, 3		Recomendado
4, 5, 6		Problemático
7-10		Peligroso

La escala utilizada por el método aplicado para los tres criterios (salud, seguridad y ambiente) oscila entre 1 y 10, representando el valor de 1 el menor riesgo y el valor de 10 el mayor riesgo (cuadros 2, 3 y 4).

De acuerdo con la guía CHEM21, para definir el criterio de seguridad del solvente orgánico evaluado se considera el punto de inflamabilidad (FP) y las frases H de cada solvente (Cuadro 2). Con el fin de tomar en cuenta otros peligros, se debe añadir un punto adicional al valor total, en caso de que el solvente; posee una temperatura de autoignición menor a 200°C, disponga de una resistividad mayor a 10 Ω metro y forme peróxidos con facilidad (EUH019 en CLP) [12].

Cuadro 2. Criterios de seguridad.

Puntaje básico de seguridad	1	3	4	5	7
Punto de inflamación (° C)	> 60	24 a 60	23 a 0	- 1 a - 20	< - 20
GHS	-	H226		H225 0 H224	

Se agrega un valor de 1 a la puntuación de seguridad para cada una de las siguientes propiedades: - AIT <200 ° C, - Resistividad > 10 8 Ω metro, Capacidad para formar peróxidos (EUH019) Cualquier disolvente con una alta energía de descomposición (> 500 J g - 1) como el nitrometano, se puntuaría 10. Fuente: [12].

La asignación del valor para el criterio relacionado a la salud se muestra en el cuadro 3. El criterio de salud refleja el riesgo laboral asociado a los solventes. La guía CHEM21 se basa en los sistemas de declaración de peligro Clasificación, Etiquetado y Envasado de sustancias y

mezclas (CLP) y los pictogramas del GHS. Se debe agregar un punto adicional para el caso de solventes orgánicos con un punto de ebullición menor a 85 °C. En este sistema el agua por sus características posee un valor de “1”, el cual se puede asignar a otros solventes con un punto de ebullición (BP) mayor a 85°C y sin declaraciones H3XX [12].

Cuadro 3. Criterios de salud.

Puntaje	2	4	6	7	9
CMR			H341 , 351 ,H361		H340 , H350 ,H360
STOT	H304, H371 ,H373	H334	H370 , H372		
Toxicidad aguda	H302, H312 ,H332 , H336 ,EUH070		H301 , H311 , H331		H300,
H310 ,H330					
Irritación	H31 H317 , H319, H335, HUH066	H318 (ojos)		H314 (piel/ojos)	

CMR: carcinógeno, mutágeno o reprotóxico. STOT: toxicidad en un solo órgano objetivo. 1 se agrega a la puntuación de salud si BP <85 ° C. Fuente: [12].

Finalmente, el valor al criterio de ambiente se realizó mediante la información contenida en el cuadro 4, que considera el punto de ebullición y las frases H de cada solvente.

Cuadro 4. Criterios de medio ambiente.

Puntuación	3	5	7
BP (°C)	70-139	50-69 , 140-200	<50 , > 200
GHS	No H4xx	H412 H413	H412 , H413 , H400, H410 ,H411

Agua: puntaje = 1.H420 (peligro de la capa de ozono): puntaje = 10. Fuente: [12].

Recopiladas todas las variables que permiten obtener los diferentes valores de los criterios de seguridad, salud y ambiente, se clasificó cada solvente orgánico de acuerdo con la información contenida en el cuadro 5.

Cuadro 5. Sistema de clasificación de solventes según la guía CHEM-21.

Combinación de puntuación de los criterios	Calificación
Una puntuación 8 o dos criterios rojos	Peligroso
Una puntuación = 7 o dos criterios amarillos	Problemático
Otras combinaciones	Recomendado

Fuente: [12].

Se generaron bases de datos y patrones de distribución de los solventes orgánicos utilizados en las prácticas de docencia en función a su impacto en la salud, seguridad y el medio ambiente. Además, con el fin de realizar una comparación entre el nivel de riesgo de los tres cursos de docencia evaluados, se utilizó la ecuación (1).

$$\text{Nivel de riesgo} = (\%HS + \%PS) \times \%P \quad (1)$$

Donde: %HS = Porcentaje de solventes peligrosos del curso evaluado, %PS = Porcentaje de solventes problemáticos del curso evaluado y %P = Porcentaje de prácticas evaluadas

Resultados y discusión

Se realizó una revisión de los solventes respectivos a cada practica de los laboratorios de Bioquímica, Química Orgánica I y II, los experimentos evaluados se indican en el Cuadro 6. Se evaluó un inventario total de 24 reactivos químicos (cuadro 7), de los cuales 14, 11, y 7 corresponden a los cursos de Química Orgánica I, Química Orgánica 2 y Bioquímica, respectivamente. Los solventes orgánicos evaluados desde el punto de vista químico, se categorizan en función a su grupo funcional como; alcoholes (metanol), éteres (éter de petróleo), hidrocarburos principalmente los aromáticos (benceno y azobenceno), halogenados (tetracloruro de carbono, diclorometano y cloroformo) y ciertos ácidos orgánicos como el acético y tricloroacético, los cuales, por su naturaleza, tienen alta toxicidad y generalmente estos compuestos afectan el sistema nervioso central generando problemas neurológicos, una exposición más prolongada genera daños hepáticos, renales y respiratorios en los seres humanos, algunas sustancias son compuestos cancerígenos [30].

Cuadro 6. Prácticas de los cursos experimentales de Bioquímica, Química Orgánica I y II.

Laboratorios		
Prácticas de Orgánica I	Prácticas de Orgánica II	Prácticas de Bioquímica
Análisis orgánico cualitativo (AOC), Destilación y puntos de ebullición (D&BP), Destilación de vino y determinación grado alcohol (DV), Recristalización y puntos de fusión (R&FP), Extracción y cromatografía de componentes activos de un fármaco (E&C), Hidrocarburos (H), Isomería (I), Síntesis del 2-bromopentano y 2-cloro-2-metilpropano (2BP-2Cl2MP), Síntesis del ciclohexano a partir de ciclohexeno en medio ácido (SCH) y Propiedades de los alcoholes (PA).	Oxidación de alcoholes, reconocimiento de aldehídos y cetonas. (ORAC), Síntesis del éter β-naftilmetílico (SEBN), Síntesis del Ácido Fenoxiacético (SAF), Sustitución Electrofílica Aromática (SEA), Síntesis del ácido benzoico (oxidación de cadenas laterales) (SAB), Síntesis y aplicación de un colorante (SAC), Síntesis de Paracetamol (SP), Esterificación: síntesis del acetato n-amilo (SANA), Síntesis de dibenzalacetona (SD), La leche y su química (LQ), Análisis Cualitativo de Carbohidratos (ACLC).	Análisis cuantitativo de carbohidratos (ACNC), Determinación cuantitativa del contenido de almidón en tejido vegetal (DCATV), Análisis cuantitativo de proteínas (ACP), Extracción, cuantificación y cromatografía de lípidos del huevo (ECCH), Extracción de ADN (ADN), Purificación y cuantificación de la α-amilasa (PCAA), Fotosíntesis (F), Análisis de la composición de la leche (ACL), Estudio de la actividad enzimática de la catalasa (AEC).

Cuadro 7. Solventes de las prácticas de laboratorio de bioquímica, química orgánica I y II impartidos en la Universidad Nacional, UNA.

Familia	Solvente
AGUA	Agua
ALCOHOLES	Etanol, 1-Propanol, metanol, octanol, p-aminofenol
CETONAS	Acetona
ÉSTERES	Acetato de etilo, éter de petróleo, éter etílico
HIDROCARBUROS	Hexano, tolueno, b-naftol, nitrobenzono, ciclohexano, benzono, azobenzono, hexeno
HALOGENADOS	Tetracloruro de carbono, cloroformo, diclorometano,
ÁCIDOS	Acido tricloroacético, ácido acético, ácido maleico, ácido fumárico.

Curso de Bioquímica

El cuadro 8 muestra la clasificación de cada solvente orgánico utilizado en el curso de bioquímica. Los valores del criterio de seguridad oscilan entre 1 y 7. Entre los reactivos químicos que presentan un mayor valor están; éter de petróleo, metanol y etanol. El primer SO presenta toxicidad acuática crónica con frase de peligro H411 según el SGA, por su parte el metanol provoca daños en los órganos (H370) y el etanol presenta la generación de vapores inflamables (H225). Por su parte los valores del criterio de salud oscilan entre 3 y 7. Entre los reactivos químicos que presentan mayor valor están; éter de petróleo que se sospecha perjudica la fertilidad o daña al feto (H361) y presenta toxicidad acuática crónica (H411), diclorometano, del cual, se sospecha que provoca cáncer (H351) y el ácido tricloroacético que provoca quemaduras graves en la piel, lesiones oculares graves (H314) y es muy tóxico para los organismos acuáticos (H400).

Un total de 5 son compuestos orgánicos altamente volátiles, con puntos de ebullición mayor a 60 °C, la única excepción es el ácido tricloroacético (temperatura de ebullición de 40) y el éter de petróleo que tiene un BP en un amplio intervalo (40-60 °C). Los valores de los puntos de ebullición le confieren al solvente la capacidad de difundirse en el ambiente afectando la salud de manera inminente [31]. Los valores del criterio de ambiente oscilan entre 3 y 7.

Cuadro 8. Clasificación de solventes orgánicos según la guía CHEM21.

Familia	Solvente	CAS	BP (°C)	FP (°C)	H3XX	H4XX	Seguridad	Salud	Ambiente	Clasificación
Alcoholes	Etanol	64-17-5	79	12	H319	N/A	4	3	3	Recomendado
	Metanol	67-56-1	64,7	12	H370	N/A	5	6	5	Problemático
Éteres	Éter de Petróleo	8032-32-4	40-60	-40	H361	H411	7	7	7	Peligroso
Halógenos	Diclorometano	75-09-2	40	-95	H351	N/A	1	7	7	Peligroso
	Cloroformo	67-66-3	61	-64	H351	N/A	2	7	5	Problemático
Ácidos	Ácido acético	64-19-7	118	16,6	H314	N/A	3	7	3	Problemático
	Ácido tricloroacético	76-03-9	100	113	H314	H400	1	7	7	Peligroso

La figura 1 indica que, del total de los 7 SO evaluados, un 14 % son clasificados como “recomendado”, 43 % como “problemático” y 43 % como “peligroso”. Entre los SO clasificados como peligrosos se encuentran éter de petróleo, diclorometano con un BP de 40 °C que favorece su difusión al ambiente y el ácido tricloroacético utilizado en la práctica de “ACL” que provoca quemaduras graves en la piel, lesiones oculares y es considerado tóxico para los organismos acuáticos. Por su parte el ácido acético, cloroformo y metanol son identificados como problemáticos debido al potencial de causar quemaduras graves en la piel y daño ocular, además son sospechosos de causar cáncer y daños en órganos diana. Finalmente, el etanol es categorizado como “recomendado” debido principalmente a que su BP es de 79 °C.

Cuadro 9. Categorías de peligro de la CHEM21 de solventes orgánicos.

Recomendados	Problemáticos	Peligrosos
Etanol	Ácido acético, cloroformo, metanol	Ácido tricloroacético, diclorometano, éter de petróleo
1	3	3
14%	43%	43%

Las figuras 2, 3 y 4 ilustran la proximidad de cada criterio obtenido experimentalmente con respecto al valor teórico (10) máximo posible para cada criterio (salud, seguridad y ambiente). Se observa en la figura 2 que la mayoría de los valores para el criterio de seguridad están lejos del valor de 10. Esto obedece a que el criterio fundamental de esta evaluación es el punto de ebullición, y la mayoría de los solventes sobrepasan los 60 °C, asignándose por ende un valor de 1 (menor valor) para el criterio de seguridad.

En el caso de la figura 3 (criterio de salud) se observa un comportamiento distinto al explicado al anteriormente, la mayoría de los solventes orgánicos tiende al máximo valor teórico permitido por el método, esto se debe principalmente a las frases H314, H351, H361, H400 y H411. Finalmente, la figura 4 ilustra los valores experimentales obtenidos para el criterio ambiente, se observa una distribución no homogénea, es decir, 3 solventes (éter de petróleo, diclorometano y ácido tricloroacético) con un valor cercano a 10, 2 solventes con un valor de 5 (metanol y cloroformo) y 2 solventes (ácido acético y etanol) con un valor de 3.

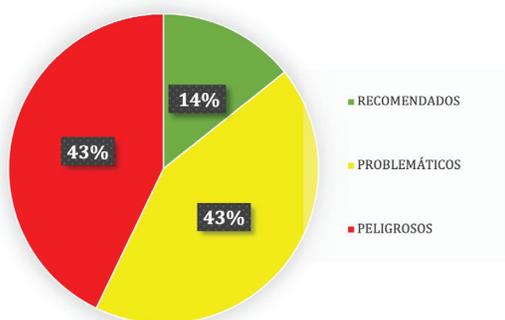


Figura 1. Clasificación de SO según categorías de peligro de la CHEM21.



Figura 2. Proximidad de los valores de riesgo experimental con el valor teórico máximo posible para el criterio de seguridad.

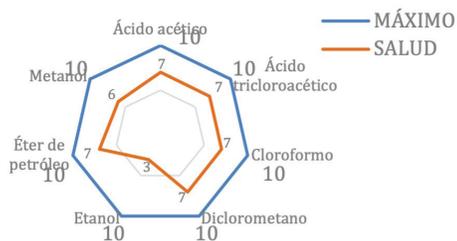


Figura 3. Proximidad de los valores de riesgo experimental con el valor teórico máximo posible para para el criterio de salud.

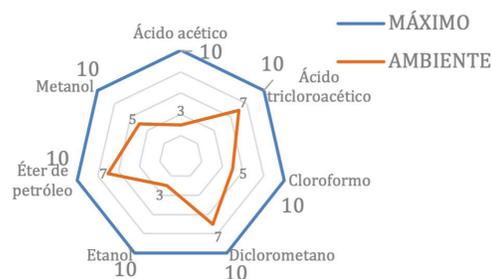


Figura 4. Proximidad de los valores de riesgo experimental con el valor teórico máximo posible para el criterio de ambiente.

Curso de Química Orgánica I

La clasificación de los SO empleados en el curso de Química Orgánica I según los criterios de salud, seguridad y ambiente se muestra en el cuadro 10, en total se evaluaron 14 solventes. Se incluyen las variables de campo obtenidas y los valores de criterio de salud, seguridad y ambiente.

Los valores del criterio de seguridad oscilan entre 1 y 9. Entre los SO que presentan un mayor peligro para la seguridad se están el éter etílico, hexano, hexeno y tetracloruro de carbono, lo cual se debe principalmente a su bajo punto de inflamación. De acuerdo con el sistema SGA estos SO poseen un código de indicación de peligro H225 (líquido y vapor muy inflamable). Para el caso del hexeno la frase de peligro asignada es de H224 (vapores y líquidos extremadamente inflamables) [32].

Por su parte los valores obtenidos para el criterio de salud oscilan entre 2 y 10, según este criterio 5 SO son clasificados como “peligrosos”, estos solventes son éter etílico, hexano, benceno, azobenceno y tetracloruro de carbono. El hexano posee una declaración de peligro CLP H362, lo cual indica que posee efectos sobre o a través de la lactancia; el benceno y el azobenceno son carcinogénicos (H350); el tetracloruro es susceptible a provocar cáncer (H351), por su parte, el ácido acético presenta la frase H314, lo que implica que es un solvente que produce graves quemaduras en la piel y lesiones oculares [32].

Con respecto al criterio de ambiente, 4 solventes orgánicos son clasificados como peligrosos, estos son hexano, ciclohexano, azobenceno y tetracloruro de carbono. El punto de ebullición es la principal variable que influye en el criterio ambiental, debido a que esta propiedad fisicoquímica desempeña un papel importante en la contaminación ambiental, valores bajos (valores menores o cercanos a la temperatura ambiente), implican mayor generación de COV's. Por el contrario, un solvente con un alto punto de ebullición (valores mayores a 60 °C) como el azobenceno, no pueden reciclarse con facilidad y complica operaciones como el secado del producto, lo cual implica que el solvente sea clasificado como peligroso. En general, los solventes éter etílico, ciclohexano, azobenceno, hexano, octanol y tetracloruro de carbono son dañinos para el medio acuático y los seres vivos que lo habitan, provocando efectos nocivos duraderos (H410, H411, H412) [32].

En la figura 5, se muestra la distribución porcentual de los SO utilizados en las prácticas de laboratorio de Química Orgánica I. Un 28% de los solventes orgánicos son clasificados como “recomendados” y 36% son categorizados como “problemáticos”.

Cuadro 10. Clasificación de solventes orgánicos según la guía CHEM21.

Familia	Solvente	BP (°C)	FP (°C)	H3XX	H4XX	Seguridad	Salud	Ambiente	Clasificación
Alcoholes	Etanol	79	12	H319	N/A	4	3	3	Recomendado
	Octanol	194,5	81,1	H319	H412	1	2	5	Recomendado
Cetonas	Acetona	56,2	-20	H319	N/A	5	2	5	Problemático
Éteres	Éter etílico	34,6	-45	H336	H410	9	3	5	Peligroso
Hidrocarburos	Hexano	68,5	-22	H361	H411	7	7	7	Peligroso
	Tolueno	110,6	4,44	H351	N/A	5	6	3	Problemático
	Ciclohexano	81	-18	H304	H410	6	3	7	Problemático
	Benceno	80,1	-11	H350	N/A	6	10	3	Peligroso
	Hexeno	62	-26	H304	N/A	7	2	5	Problemático
	Azobenceno	291	100	H350	H410	1	9	7	Peligroso
Halógenos	Tetracloruro de carbono	76	-23	H351	H412	7	7	10	Peligroso
Ácidos	Ácido acético	118	16,6	H314	N/A	3	7	3	Problemático
	Ácido maléico	157,8	131-139	H318	N/A	1	2	5	Recomendado
	Ácido fumárico	290	273	H319	N/A	1	2	5	Recomendado

El 36% de los SO son clasificados como peligrosos (cuadro 11), entre los cuales se encuentran el éter etílico, hexano, benceno, azobenceno y tetracloruro de carbono, lo cual se debe a su alta inflamabilidad y a su bajo BP, a excepción del azobenceno, su clasificación obedece principalmente a su capacidad de generar cáncer. Las sustancias “problemáticas” son tolueno, ciclohexano, hexeno y ácido acético, esto debido a su volatilidad, inflamabilidad y en el caso de benceno, por su efecto cancerígeno. Finalmente, son categorizados como “recomendados” el etanol, octanol, ácido maleico y ácido fumárico.

Las figuras 6, 7 y 8 ilustran la proximidad de cada criterio obtenido experimentalmente con respecto al valor teórico (10) máximo posible para cada criterio (SHE). Se observa en la figura 6 que la mayoría de los valores para el criterio de seguridad están lejos del valor de 10, de estos hay 4 con valor de 1 (octanol, azobenceno, ácido fumárico y ácido maleico), ya que poseen FP superiores a -20 °C.

Cuadro 11. Categorías de peligro de solventes orgánicos según la CHEM21.

Recomendados	Problemáticos	Peligrosos
Etanol, octanol, ácido maleico, ácido fumárico	Acetona, tolueno, ciclohexano, hexeno, ácido acético	Éter etílico, hexano, benceno, azobenceno, tetracloruro de carbono
4	5	5
29%	36%	36%

En el caso de la figura 7 (criterio de salud) se observan 5 SO con valores de 7 y/o mayores, la distribución es no homogénea, destacan SO con valores de 2, 3 y 7, entre ellos; acetona, ciclohexano y tetracloruro de carbono, respectivamente. Finalmente la figura 8 ilustra los valores experimentales obtenidos para el criterio ambiente, se observa una distribución que tiende a la media, es decir; 6 solventes (octanol, acetona, éter etílico, hexeno, ácido fumárico y ácido

maleico) con un valor de 5, 4 solventes con un valor de 3 (etanol, tolueno, benceno y ácido acético), 3 solventes (hexano, ciclohexano y azobenceno) con un valor de 7, por último 1 con valor de 10, el tetracloruro de carbono, debido a su bajo punto de inflamación.

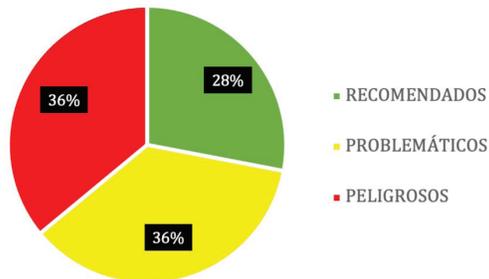


Figura 5. Clasificación de solventes orgánicos utilizados en las prácticas de laboratorio de Química Orgánica I, según las categorías de peligro de la guía CHEM21.

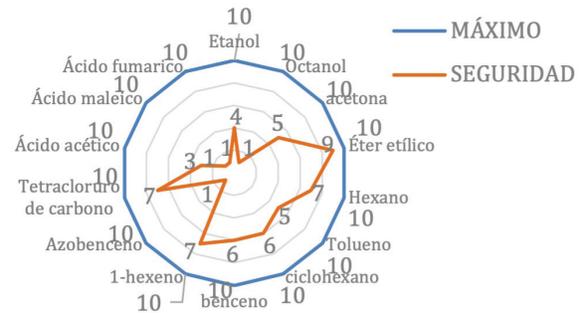


Figura 6. Proximidad de los valores de riesgo experimental con el valor teórico máximo posible para el criterio de seguridad.

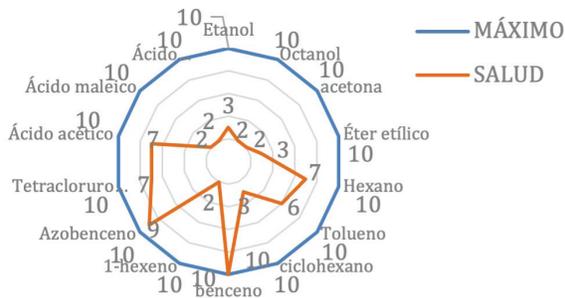


Figura 7. Proximidad de los valores de riesgo experimental con el valor teórico máximo posible para el criterio de salud.

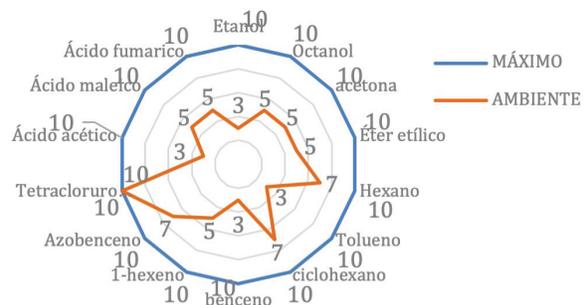


Figura 8. Proximidad de los valores de riesgo experimental con el valor teórico máximo posible para el criterio de ambiente.

Curso de química orgánica II

La clasificación de los solventes orgánicos utilizados en el curso de Química Orgánica II según los criterios SHE, se muestra en el cuadro 12, en total se evaluaron 11 solventes. Los valores del criterio de seguridad oscilan entre 1 y 7. Solamente el éter de petróleo representa un elevado peligro para la seguridad, lo cual se debe a su FP de -40°C (H225).

Los valores obtenidos para el criterio de salud oscilan entre 2 y 10, los SO que presentan mayor valor son; éter de petróleo, ácido acético y benceno. El primer solvente se sospecha que perjudica la fertilidad o al feto (H361), por su parte el ácido acético provoca quemaduras en la piel y lesiones oculares (H314), por último, el benceno es cancerígeno (H350) y catalogadas por el decreto real español como peligroso, por lo que se recomienda sustituirlo o disminuir su uso [34]. De acuerdo con al criterio de ambiente, 1 solvente orgánicos es clasificado como "peligroso", el cual, corresponde al éter de petróleo y se debe principalmente a que presenta toxicidad acuática crónica (H411).

Cuadro 12. Clasificación de solventes orgánicos según la guía CHEM21.

Familia	Solvente	BP (°C)	FP (°C)	H3XX	H4XX	Seguridad	Salud	Ambiente	Clasificación
Alcoholes	Etanol	79	12	H319	N/A	4	3	3	Recomendado
	1-Propanol	97	15	H318	N/A	5	4	3	Problemático
	p-aminofenol	284	195	H341	N/A	1	6	5	Recomendado
	Metanol	64,7	12	H370	N/A	5	6	5	Problemático
Ésteres	Acetato de etilo	77	-4	H319	N/A	5	3	3	Recomendado
Éteres	Éter de petróleo	40-60	-40	H361	H411	7	7	7	Peligroso
Hidrocarburos	Tolueno	110,6	4,44	H351	N/A	5	6	3	Problemático
	b-naftol	294,8	153	H332	N/A	3	2	5	Recomendado
	Nitrobenceno	211	88	H351	H412	1	6	5	Problemático
	Benceno	80,1	-11	H350	N/A	6	10	3	Peligroso
Ácidos	Ácido acético	118	16,6	H314	N/A	3	7	3	Problemático

En la figura 9, se muestra la distribución porcentual de los SO utilizados en el curso de Química Orgánica II, en donde un 36% son clasificados como “recomendados”, 45% son categorizados como “problemáticos” y un 18% son “peligrosos”. El mayor porcentaje es representado por solventes “problemáticos” (Cuadro 13), tales como ácido acético, 1-propanol, metanol, tolueno y nitrobenceno. Además, el éter de petróleo y el benceno son “peligrosos”, el primero de ellos debido a su peligrosidad en los tres criterios evaluados (SHE) y el segundo por sus características carcinogénicas.

Cuadro 13. Categorías de peligro solventes orgánicos según la guía CHEM21.

Recomendados	Problemáticos	Peligrosos
Etanol, p-aminofenol, acetato de etilo, b-naftol.	Ácido acético, 1-propanol, metanol, tolueno, nitrobenceno.	Éter de petróleo, benceno.
4	5	2
36%	45%	18%

En las figuras 10, 11 y 12 se muestra la proximidad del valor para cada criterio obtenido experimentalmente con respecto al valor teórico máximo (10). Se observa en la figura 10 que, la mayoría de los SO se alejan del valor teórico, dos solventes se califican con 1 (p-aminofenol, nitrobenceno), dos constan de un valor de 3 (ácido acético, b-naftol), uno se evalúa con un 4 (etanol) y cuatro tienen un valor de 5 (1-propanol, metanol, acetato de etilo, tolueno). Lo anterior se debe a que gran parte de los SO constan de un FP superior a los 0°C.

Para el criterio de salud (figura 11) se observa que, en su mayoría, los valores experimentales son cercanos al valor teórico, se destaca que el benceno alcanza el valor máximo de 10, esto debido efecto cancerígeno. Finalmente, la figura 12 ilustra una distribución de valores homogénea, debido a que la mayor parte de los SO se alejan del valor máximo, seis solventes tienen un valor de 3, cuatro poseen una calificación de 5 y solamente uno tiene un valor de 7 (éter de petróleo).

Conclusiones y recomendaciones

La mayoría de los solventes orgánicos analizados para el curso de bioquímica pueden provocar problemas en la salud como cáncer, graves quemaduras en la piel y lesiones oculares, tal es el caso del tetracloruro de carbono, azobenceno, benceno y éter etílico. Para el caso de los laboratorios de química orgánica I y II, la mayoría de sus SO poseen valores elevados en el criterio de seguridad, esto debido a sus bajos puntos de inflamación y ebullición.

El curso de química orgánica II presenta el menor porcentaje de SO peligrosos, en comparación con los otros dos cursos analizados, sin embargo, son utilizados en este curso productos químicos como benceno y éter petróleo que son clasificados como cancerígenos y tienen efectos agudos sobre el medio ambiente respectivamente.

De acuerdo con el nivel de riesgo calculado según la ecuación 1, se considera el curso de orgánica I como el de mayor peligro (valor de 14), el curso bioquímico como el de menor riesgo con un valor de 4.

La metodología “CHEM21 Selection Guide of Classical-and Less Classical Solvents”, se considera efectiva para la evaluación del impacto en la seguridad, la salud y en el medio ambiente, esta permite escoger de manera efectiva y rápida de determinado solvente orgánico en cursos de docencia, que implica un menor riesgo hacia la salud y seguridad del usuario y hacia el medio ambiente.

Entre las debilidades de la metodología aplicada se indica que esta solamente se basa en las propiedades fisicoquímicas de los solventes y su nivel toxicidad, no considera variables importantes, como concentración del agente químico, tiempo de exposición del usuario, medidas de seguridad ejecutadas durante su manipulación, entre otras. Incluir estas variables en la evaluación del riesgo químico permite generar una visión más amplia para la asignación del nivel de riesgo de una práctica y curso de docencia experimental.

Referencias

- [1] Costas, G. (2014). “Compuestos orgánicos volátiles (COVs o VOCs)”. Ciencia y Biología. [Online]. Disponible: <https://cienciaybiologia.com/>.
- [2] Blount, E. (n.d.). “Uso de disolventes orgánicos en la industria. Disolventes orgánicos en la limpieza y desengrase de piezas”. [Online]. Disponible: <http://istas.net/descargas/escorial/taller/taller01.pdf>.
- [3] L. Cordero. (2013). “Propuesta del sistema de tratamiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV’s), en el plantel de RECOPE ubicado en El Alto de Ochomogo.” Instituto Tecnológico de Costa Rica. [Online]. Disponible: <https://docplayer.es/28879862-Propuesta-del-sistema-de-tratamiento-de-emisiones-de-compuestos-organicos-volatiles-cov-s-en-el-plantel-de-recope-ubicado-en-el-alto-de-ochomogo.html>.
- [4] J. Calvo. (2014). “Pinturas y barnices: Tecnología básica”. Diaz de Santos. pp 193. [Online]. Disponible: <https://books.google.co.cr/books?id=jmkWBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=J.+Calvo.+%E2%80%9CPinturas+y+barnices:+Tecnolog%C3%ADa+b%C3%A1sica&hl=es&sa=X&ved=2ahUKFwjNtbPV-fqAhXtguAKHws6CuAQ6AEwAHoECAIQAg#v=onepage&q=J.%20Calvo.%20%E2%80%9CPinturas%20y%20barnices%3A%20Tecnolog%C3%ADa%20b%C3%A1sica&f=false>.
- [5] S. Khandelwal, Y. K. Tailor, and M. Kumar, “Deep eutectic solvents (DESs) as eco-friendly and sustainable solvent/catalyst systems in organic transformation”, *J. Mol. Liq.*, vol. 215, pp. 345–386. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.12.015>.
- [6] Proyecto: “Prevención y control de sustancias disolventes peligrosas”. (n.d). Disponible: <http://istas.net/descargas/Proyecto%20Disolventes%20Descripci%c3%b3n.pdf>.
- [7] Gadea, R. (2007). “Sustitución de sustancias disolventes peligrosas. Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud” (ISTAS). [Online]. Disponible: <http://istas.net/descargas/guia%20disolventes.pdf>.



- [8] K. R. Echols, J. C. Meadows, and C. E. Orazio, "Pollution of Aquatic Ecosystems II: Hydrocarbons, Synthetic Organics, Radionuclides, Heavy Metals, Acids, and Thermal Pollution", *Elsevier*, pp. 120–128, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00223-4>.
- [9] L. Cseri, M. Razali, P. Pogany, and G. Szekely, "Organic Solvents in Sustainable Synthesis and Engineering," en *Green Chemistry*, Elsevier, 2018, pp. 513–553. <https://doi.org/10.1016/978-0-12-809270-5.00020-0>.
- [10] F. Pena-Pereira and M. Tobiszewski, "Initial Considerations," in *The Application of Green Solvents in Separation Processes*, Elsevier, pp. 3–16, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805297-6.00001-2>.
- [11] M. Sliwinska-Kowalska, "Combined Exposures to Noise and Chemicals at Work," in *Encyclopedia of Environmental Health*, Elsevier, pp. 755–763, 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63951-6.00255-2>.
- [12] D. Prat et al., "CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents," *Green Chem.*, vol. 18, no. 1, pp. 288–296, 2015. <https://doi.org/10.1039/c5gc01008j>.
- [13] Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 117/2003, de 31 de enero, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades. España, 2003. Disponible: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-2515>.
- [14] J. A. Firestone and S. M. Gospe, "Organic Solvents," in *Clinical Neurotoxicology*, M. Dobbs, Elsevier, pp. 401–414, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-032305260-3.50041-1>.
- [15] O. M. Morales-Gonzalez, C. Zhang, S. Li, and V. Hessel, "Solvent impact assessment for the 'One-Flow Functional Solvent Factory,'" *Chem. Eng. Sci. X*, vol. 3, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2019.100024>.
- [16] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (INSHT) Seguridad y Salud en el Trabajo. (2010). [Online]. Disponible: http://bdlep.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/PUBLICACIONES%20PERIODICAS/Rev_INSHT/2010/56a60pdfcompleto/SST_58_enlaces.pdf.
- [17] Health and Safety Executive. The technical basis for COSHH Essentials: Easy steps to control chemicals. Control. (2009). [Online]. Disponible: <http://www.coshh-essentials.org.uk/assets/live/CETB.pdf>.
- [18] Books, H. S. E. (2013). Control of substances hazardous to health: Approved code of practice & guidance. [Online]. Disponible: <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l5.pdf>
- [19] Vincent, R.; Bonthoux, F.; Mallet, G.; Iparraguire, J.-F.; Rio, S. (2015). Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique. Hygiène sécurité du Trav. [Online]. Disponible: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/nd2233.pdf>.
- [20] Instituto de Prevencion, Salud y Medio Ambiente-. Seguridad y Medio Ambiente. (2013). [Online]. Disponible: <https://app.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n129/docs/Seguridad-y-Medio-Ambiente-129-es.pdf>.
- [21] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 897: Exposición dérmica a sustancias químicas: evaluación y gestión del riesgo. [Online]. Disponible: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/897w.pdf>.
- [22] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 135: Seguridad en el laboratorio. «Cuestionario de Seguridad». [Online]. Disponible: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_135.pdf.
- [23] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 934 Agentes químicos: metodología cualitativa y simplificada de evaluación del riesgo de accidente. [Online]. Disponible: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/926a937/934w.pdf>
- [24] Calvo Pineda, M.; Carballo Arce, F.; Villegas, L; Vargas Gonzales, X.; Borbón Alpizar, H.; Soto Fallas, R.; Mora Aparico, C.; Vega Guzmán, I.; Jiménez Bonilla, P. Carvajal Miranda, Y. (2013) Manual de laboratorio de Química Orgánica II, Universidad Nacional.
- [25] Calvo Pineda, M.; Carballo Arce, F.; Villegas, L; Vargas Gonzales, X.; Borbón Alpizar, H.; Soto Fallas, R. (2012) Manual de laboratorio de Química Orgánica I, Universidad Nacional.
- [26] Escuela de Química (2016). Manual de laboratorio de Bioquímica, Universidad Nacional.
- [27] UNA. (n.d). Hojas de seguridad - Escuela de Química. [Online]. <http://www.quimica.una.ac.cr/index.php/documentos-electronicos/category/13-hojas-de-seguridad>.
- [28] MSDSonline. (n.d). Manage Material Safety Data Sheets (SDS) with MSDSonline. [Online]. <https://www.msds-online.com/sds-search/>.
- [29] Labchem. (n.d). All MSDS | Material Safety Data Sheets (MSDS) – LabChem. [Online]. <http://www.labchem.com/tools/msds/index.php?all=true>.

- [30] R. Reveros, "Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en la industria de pinturas y sus disolventes en Perú- Análisis de caso y estrategias de gestión ambiental y salud ocupacional," Pontificia Universidad Autónoma del Perú, 2017. [Online]. Disponible: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/8838>.
- [31] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 878: Regulación UE sobre productos químicos (II). Reglamento CLP: aspectos básicos. (2010). [Online]. Disponible: <https://www.insst.es/documents/94886/328681/878w.pdf/7dbc6e10-0052-463e-a04a-5fa4e5d2b580>.
- [32] SGA, "Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de productos químicos," 2013. [Online]. Disponible: <http://ghs-sga.com/etiquetado-de-productos-quimicos-y-fds/etiquetas-y-pictogramas/>.
- [33] Merck KGaA. (n.d.). Frases de peligro y consejos de prudencia. [Online]. Disponible: <https://www.merckmillipore.com/GT/es/support/safety/h-and-statements/5m2b.qB.aKQAAFF4yYcWdw7,nav>.
- [34] Merck KGaA, "Éter de petróleo SDS", MERCK, (2020). [Online]. Disponible: https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM101769Origin=SERP.