



## Compuestos orgánicos volátiles en materiales poliméricos sostenibles de uso arquitectónico e interiores, caso de estudio pontificia universidad javeriana, Bogotá - Colombia

### *Volatile organic compounds in sustainable polymeric materials for architectural and interior use, case study at pontificia universidad javeriana, Bogotá - Colombia*

**Willmar Ricardo Rugeles Joya, MsC Ecodesign**

rugeles-w@javeriana.edu.co

**Angela Margarita Moncaleano Niño, PhD Ciencias del mar**

amoncaleano@javeriana.edu.co

**Lucia Ximena Tello Clavijo, Ingeniera Química**

rugeles-w@javeriana.edu.co

**Henry Alberto Mendez Pinzon, Doctor rerum naturalium**

hmendez@javeriana.edu.co

**Carolina Valbuena, MsC Arquitectura Sostenible**

valbuenas@javeriana.edu.co

**Carlos Devia Castillo, PhD Ingeniería**

cdevia@javeriana.edu.co

#### Resumen

En todo el mundo, existe un creciente interés en el uso y consumo adecuado de materias primas sostenibles que se basen en el reciclaje y reutilización de polímeros derivados del petróleo y otros materiales reciclados, como laminas a partir de colaminados. Estas "alternativas sostenibles" parecen ser una solución atractiva para los problemas ambientales, sin embargo, es importante considerar los posibles impactos ambientales y de salud pública que puedan derivarse de su uso. Por lo tanto, el objetivo de nuestro proyecto de investigación es analizar las emisiones de COVs de materiales poliméricos "sostenibles" generalmente placas y colaminados y evaluar sus posibles impactos ambientales y de salud. Para ello, se ha diseñado y fabricado un prototipo de cámara de medición de compuestos orgánicos acoplado una serie de sensores para COVs. Los resultados han mostrado la presencia de gases como

CO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y material particulado, algunos sobre los límites permitidos de exposición humana concluyendo que las emisiones de algunos COVs pueden representar un riesgo potencial tanto para la salud ambiental como para la salud humana. Es fundamental seguir investigando para encontrar alternativas sostenibles que no comprometan la salud y el bienestar de las personas y el medio ambiente.

**Palabras Clave:** Compuestos orgánicos volátiles, polímeros, materiales construcción, inmobiliario, sostenibilidad

#### Abstract

Throughout the world, there is a growing interest in the proper use and consumption of sustainable raw materials that are based on the recycling and reuse of petroleum-derived polymers and other recycled materials, such as sheets from collaminates. These "sustainable alternatives" appear to be an attractive solution to environmental problems, however it is important to consider the potential environmental and public health impacts that may result from their use. Therefore, the objective of our research project is to analyze the VOC emissions of "sustainable" polymeric materials such boards and colaminateds. To this end, a prototype chamber for measuring organic compounds has been designed and manufactured by coupling a series of sensors for VOCs. The results have shown the presence of gases such as CO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> and particulate matter, some of which are above the permitted limits of human exposure, concluding that the emissions of some VOCs may represent a potential risk for both environmental and human health. It is essential to continue researching to find sustainable alternatives that do not compromise the health and well-being of people and the environment.

**Keywords:** Volatile organic compounds, polymers, construction materials, real estate, sustainability

#### 1. Introducción

Para lograr un impacto real en el medio ambiente, es fundamental realizar un análisis crítico de las diversas estrategias que se aplican actualmente y su efecto real en los ecosistemas. En este sentido, la ciclabilidad de los materiales se presenta como una opción ampliamente aceptada en términos de sostenibilidad, ya sea en ciclos biológicos o tecnológicos. Sin embargo, es importante profundizar en el estudio de los posibles impactos que puedan generar debido a la degradación que sufren estos materiales con el tiempo y su exposición funcional relacionada con el uso al que son sometidos.

Los gases y material particulado clasificado como compuestos orgánicos volátiles (COVs) están relacionados a la composición química de los materiales. Los COVs incluyen dentro de su clasificación compuestos como ácidos, alcoholes, aldehídos, cetonas, éteres, cetonas, e hidrocarburos aromáticos entre otros (Demirel et al., 2014; Adamová et al., 2020), que comparten como característica su baja solubilidad en agua y alta volatilidad a temperatura ambiente debido a la alta presión de vapor (Cicoletta 2008).

Actualmente existe una preocupación relacionada con las emisiones de los COVs, en la medida que autores señalan que la mayoría de los COVs, en especial los compuestos aromáticos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), además de producir malos olores pueden llegar a ser altamente tóxicos, generando afectaciones al sistema respiratorio como asma, así como a los sistemas inmunológico y reproductivo, incluso llegando a ser carcinógenos en concentraciones bajas ( $>0.2\text{mg m}^{-3}$ ) para las personas que están expuestas a estos de manera prolongada (Sax et al., 2006; Sousa et al., 2011; Castro-Hurtado et al., 2013; Du et al., 2014; Zhu et al., 2020; Zhang et al., 2020)

El objetivo de este proyecto es el de comprender los beneficios y afectaciones de la reciclabilidad de los materiales en aspectos como la salud humana, los ciclos de vida, los cambios estructurales y el uso al que están expuestos. Para ello se realizó el estudio sobre los siguientes COVs: CO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y material particulado de (1ppm, 2.5ppm, 10ppm), identificando el posible impacto sobre el ambiente y la salud humana que tienen estos materiales por su manipulación y exposición.

Los resultados han evidenciado la presencia de gases como CO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y material particulado, algunos sobrepasan los límites permitidos de exposición, según los datos proporcionados por la OMS, los cuales resaltan la importancia de tener como criterio la selección de dichos materiales el riesgo que representa sobre la salud humana. Así mismo, cuando estos materiales son utilizados en interiores o exteriores, es necesario realizar el debido seguimiento para evitar la saturación del aire por riesgos en los niveles de contaminación.

## 2. Metodología

El desarrollo de este proyecto se ha dividido en 2 etapas centradas en el desarrollo de las pruebas según los materiales identificados en la región. Con esto se procede a la identificación de ambientes y a la fabricación y funcionalidad del prototipo que cumpla con las condiciones para dichas pruebas.

### 2.2 Selección de los polímeros.

A partir de una revisión de fuentes secundarias sobre el uso, la degradación y el reciclaje de polímeros, así como de entrevistas semiestructuradas a actores clave (anexo 1) y análisis de laboratorio detallados de productos utilizados catalogados como "materiales sostenibles". Las fuentes secundarias incluyeron:

- Fichas de características técnicas de los materiales, que cubren aspectos estructurales, biológicos, ambientales y de salud.
- Entrevistas para validar el conocimiento previo y posterior al estudio para validar el conocimiento por parte de los constructores y usuarios de los materiales seleccionados.

Los materiales seleccionados para el estudio se eligieron en base a la oferta existente de materiales sostenibles, y se aseguró que cumplieran con las siguientes características: i) que estuvieran disponibles a nivel comercial localmente en Colombia, y ii) que se utilizaran en el

campus de la Pontificia Universidad Javeriana- sede Bogotá. Esto garantizó que fueran fácilmente accesibles para el desarrollo del estudio y que fueran identificables por el sector del diseño y la construcción en el entorno local. La tabla 2 muestra los materiales seleccionados y sus características.

Tabla 2 Composición de materiales de estudio

Producto - material	Composición Química
Polialuminio	Variaciones de las siguientes proporciones: Papel 75% Polietileno 20% Aluminio 5%
Reciclados de grifería y computadores	ABS, PVC, Acabados galvanoplásticos
Textil de poliéster	PET, Metales pesados
Textil de Vinilo	PVA, PVC, Polietileno, polipropileno, PET
Madera Ecológica	50 % termoplástico con reforzante mineral 50 % fibras vegetales.

Fuente: Autores

### 2.3 Pruebas de flexión y tensión

Las pruebas de tensión realizadas se llevaron a cabo sobre los materiales laminados y todos los materiales se dispusieron en medidas similares para mantener la similitud en su rigidez y resistencia. Para ello, se utilizó una máquina de ensayo universal que aplica una carga gradual a los materiales laminados. Se midió la deformación de las muestras y la carga aplicada, y a partir de estos datos se obtuvieron las curvas de esfuerzo-deformación. Estas curvas permitieron el cálculo del módulo de Young, la resistencia a la tracción y el límite elástico de los materiales laminados sostenibles.

Además de la prueba de tensión, se realizaron pruebas de flexión de 3 puntos en los mismos materiales laminados sostenibles. Estas pruebas también tienen como objetivo analizar las características estructurales de los materiales para su uso en construcción y mobiliarios. En la prueba de flexión, se aplica una carga en el centro de la muestra y se miden la deformación y la carga aplicada.

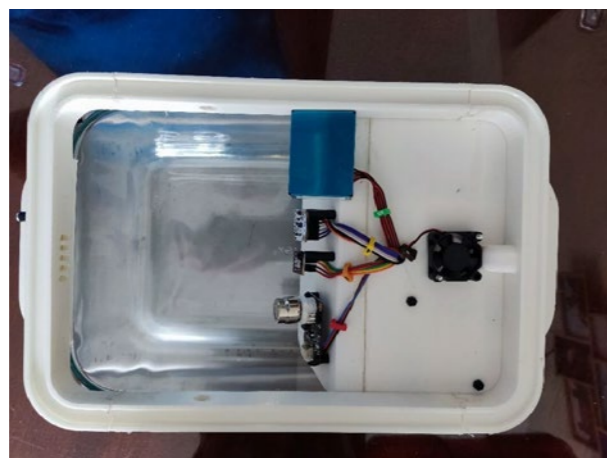
### 2.4 Elaboración del prototipo.

Se construyó un prototipo de cámara cerrada para la medición de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) utilizando materiales como vidrio y nylon (filamento nylon white para impresora 3D MARK 2). La cámara tiene dimensiones totales de 205mmx300mmx110mm y cuenta con un área de medición de 160mmx160mmx95mm.

El prototipo cuenta con una lista de sensores de la tabla 1 que fueron acoplados en el soporte para los sensores. Estos sensores fueron elegidos específicamente para medir los COVs y garantizar una mayor precisión en la medición, además de medir las concentraciones de los compuestos volátiles y del material particulado en tiempo real. La cámara cerrada

permite la medición de los COVs de forma controlada y reproducible, minimizando la interferencia de otros factores externos y asegurando la precisión de las mediciones.

Figura 1. Fotografía ángulo superior de la cámara para la medición de COVs, a la izquierda el área de medición, a la derecha el soporte para sensores.



Autor: Ricardo Rugeles.

Para medir los VOC, se usaron sensores digitales específicos que permiten la medición de diversos compuestos, los cuales se enlistan en la Tabla 1. y medidos en períodos de 1 segundo.

Tabla 1 Sensores utilizados para la medición de los COVs

Elementos	Sensor
CO	CJMCU811V
CO2	SEN0159
NH3	MICS-6814
NO2	MICS-6814
PM 2,5	PMS5003
PM 5	PMS5003
PM 10	PMS5003

Fuente: Autores

### 2.5 Medición de los COVs.

El equipo de trabajo ha establecido protocolos de medición para llevar a cabo las validaciones de los materiales. En conjunto, se han identificado los parámetros necesarios para realizar las pruebas, así como las herramientas e indicadores que se utilizarán durante su respectiva ejecución. Estos protocolos permitirán identificar los posibles cambios estructurales y de composición que los materiales puedan sufrir, así como la emisión potencial de compuestos orgánicos volátiles (VOC), como resultado de su exposición a diferentes pruebas comunes

para ambientes interiores y exteriores. En la Tabla 3 se muestran todas las pruebas que se llevarán a cabo para diferentes tipos de ambientes y estados de los materiales.

Tabla 3 Pruebas a realizar sobre los diferentes tipos de materiales objeto del estudio

Ambientes	Variables	Número de pruebas
Luz Natural directa	Exposición directa	9
	Raspado	9
	Húmedo	9
Sombra interior	Exposición directa	9
	Raspado	9
	Húmedo	9
Sombra exterior	Exposición directa	9
	Raspado	9
	Húmedo	9
Noche	Exposición directa	9
	Raspado	9
	Húmedo	9
Luz artificial directa	Exposición directa	9
	Raspado	9
	Húmedo	9
<b>Total pruebas por material</b>		15
<b>Control cámara</b>		15
<b>Total pruebas</b>		150

Fuente: Autores

El protocolo de medición de compuestos orgánicos volátiles (VOC) se establece a partir de la metodología CFR 40, que es utilizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010). Esta metodología plantea los protocolos de validación de pruebas para cada uno de los compuestos volátiles y el material particulado, para diferentes ambientes de exposición y estados (IDEAM, 2010)

### 2.5 Plataforma de divulgación de resultados.

Una vez finalizados los análisis de los compuestos orgánicos volátiles y material particulado presentes en los diferentes ambientes de exposición, se procedió a la construcción de una plataforma digital para la divulgación de los resultados obtenidos. Esta plataforma fue diseñada para informar sobre las características y recomendaciones en el uso a nivel arquitectónico y de productos para interiores y exteriores.

los resultados del estudio sobre VOC y materiales sostenibles han sido publicados en el sitio web <https://designfactorypuj.wixsite.com/materiales-sostenibl>. La publicación de los resultados en línea permite que estudiantes, investigadores, empresas y otros interesados en el tema tengan acceso a la información y puedan utilizarla en la selección y compra de materiales más sostenibles. Además, la disponibilidad en línea permite que los resultados del estudio se difundan ampliamente y que se promueva la conciencia y educación ambiental en la industria y la sociedad en general.

### 3. Resultados

Después de analizar los datos obtenidos en el estudio de VOC de materiales sostenibles, se ha encontrado información significativa que pueden ser de gran utilidad para la selección de materiales en la fabricación de mobiliario y construcción. Los resultados se han clasificado según el ambiente evaluado y el tipo de material analizado, lo que nos ha permitido identificar patrones y tendencias en la emisión de compuestos orgánicos volátiles.

#### 3.1 Pruebas de flexión y tensión

Los resultados de la presente investigación indican que los módulos de Young de los materiales poliméricos analizados son considerablemente bajos en comparación con los polímeros laminados tradicionalmente utilizados. Aquellos materiales con una estructura más homogénea, como la madera plástica, los laminados de ABS y PVC, presentan una mayor adherencia y, por ende, un mayor índice en las pruebas realizadas. Por otro lado, los materiales colaminados uno a cuatro, que incluyen diversos materiales en su composición y que no usan aglomerantes sino se someten a altas temperaturas y presiones durante su proceso de laminación, obtienen resultados más bajos en la prueba.

Tabla 4 Composición química de materiales experimentales

Producto - material	Test Tensión	Test Flexión
PLACA PVC	Y = 9588 ± 11 kPa	Y = 5293 ± 8 kPa
PLACA ABS	Y = 9028 ± 19 kPa	Y = 5092 ± 13 kPa
MADERA PLASTICA	Y = 6562 ± 33 kPa	
POLIALUMINIO 3	Y = 6241 ± 11 kPa	Y = 1363 ± 7 kPa
POLIALUMINIO 2	Y = 4369 ± 6 kPa	Y = 983 ± 9 kPa
POLIALUMINIO 1	Y = 3962 ± 11 kPa	Y = 1378 ± 3 kPa
POLIALUMINIO 4	Y1 = 2439 ± 9 kPa Y2 = 6304 ± 12 kPa	Y = 1378 ± 3 kPa

Fuente: Datos del presente estudio.

Los resultados de la tabla 4 indican que los termoplásticos, como el polietileno de baja densidad y algunas espumas de poliuretano, se encuentran en un nivel similar al de los materiales analizados en este estudio. Estos resultados sugieren que, en aplicaciones laminares sometidas a grandes esfuerzos, podría producirse un desgaste acelerado del material, lo que

reduciría su vida útil. Sin embargo, en acabados superficiales de pared, por ejemplo, el desgaste generado por el contacto podría no ser tan significativo, pero debe tenerse en cuenta la exposición directa a diversos factores ambientales como lluvia o radiación solar.

#### 3.2 Resultados por ambiente de exposición

**Luz artificial directa**, se evidencia la presencia de NO<sub>2</sub> en la mayoría de los materiales manipulados, así como la presencia de material particulado (pm<sub>10</sub>, pm<sub>5</sub>), por lo tanto, es importante aplicar medidas de precaución para evitar impactos en la salud, debido a que estas sustancias se encuentran sobre los límites recomendados de exposición.

**Sombra interior**, en términos generales se evidencia la presencia de gases como CO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, con la mayoría de los materiales manipulados, así como la presencia de material particulado, estas sustancias se encuentran por encima de los límites recomendados de exposición.

**Luz natural directa**, se detecta la presencia de gases como CO, NO<sub>2</sub>, con la mayoría de los materiales manipulados, así como la presencia de material particulado, por lo tanto, es importante aplicar medidas de precaución para evitar impactos en la salud, debido a que estas sustancias se encuentran por encima de los límites recomendados de exposición.

**Sombra exterior**, en términos generales se reporta la presencia de gases como CO, NO<sub>2</sub>, con la mayoría de los materiales manipulados, así como la presencia de material particulado, por lo tanto, es importante aplicar medidas de precaución para evitar impactos en la salud, debido a que estas sustancias se encuentran por encima de los límites recomendados de exposición.

**Noche**, se identifica la presencia de gases como NO<sub>2</sub>, con la mayoría de los materiales manipulados, así como la presencia de material particulado, por lo tanto, es importante aplicar medidas de precaución para evitar impactos en la salud, debido a que estas sustancias se encuentran por encima de los límites recomendados de exposición.

#### 3.3 Resultados por material

**PLACAS ABS**, en espacios con Luz Artificial Directa, sombra interna, Luz Natural Directa, Sombra exterior y Noche, se detectan sustancias como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, por encima de los límites permitidos de exposición directa, lo cual representa un riesgo significativo para la salud.

**LAMINA GRIFERIA PVC**, en general se recomienda tomar las medidas de precaución al utilizarla en espacios con Luz Artificial Directa, debido a que sustancias como CO, NO<sub>2</sub>, están por encima de los límites permitidos en exposición directa. Así mismo los resultados



obtenidos en Sombra interior, Sombra exterior y Luz Natural directa, presentan gases como CO, NO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>, con medidas superiores a las recomendadas para exposición humana.

**MADERA PLÁSTICA**, en espacios con Luz Artificial Directa, y Luz Natural Directa, sustancias como NO<sub>2</sub>, están por encima de los límites permitidos en exposición directa a estas sustancias sin afectar la salud. Así mismo se identifica material particulado por encima de los rangos establecidos, lo cual representa un riesgo potencial para la salud. En espacios con Sombra Interior, y Sombra exterior se detectan sustancias como CO, NO<sub>2</sub>, muy por encima de los límites recomendados.

**VINILO DELGADO**, en espacios con Luz Artificial Directa y Noche se reporta que sustancias como NO<sub>2</sub>, están por encima de los límites permitidos en exposición. Así mismo se identifica material particulado por encima de los rangos establecidos. Se recomienda tomar medidas de precaución debido a que sustancias como CO, NO<sub>2</sub>, están por encima de los límites permitidos.

**VINILO GRUESO**, en espacios con Luz Artificial Directa, y Sombra Interior, se identifica la presencia de sustancias como CO, NO<sub>2</sub>, las cuales están por encima de los límites permitidos en exposición directa. Así mismo se identifica material particulado por encima de los rangos establecidos, lo cual representa un riesgo significativo para la salud.

**COLAMINADO DE POLIALUMINIO 1**, en espacios con Luz Artificial Directa se detectó la presencia de sustancias como NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> las cuales están por encima de los límites. Así mismo se identifica material particulado por encima de los rangos establecidos, lo cual representa un riesgo significativo para la salud.

**COLAMINADO DE POLIALUMINIO 2**, en espacios con Luz Artificial Directa y Noche se reporta que sustancias como NO<sub>2</sub>, están por encima de los límites permitidos. Así mismo se identifica material particulado justo en el límite de los rangos establecidos, lo cual podría representar un riesgo significativo para la salud si no se tiene algún tipo de control.

**COLAMINADO DE POLIALUMINIO 3**, en espacios con Luz Artificial Directa, se reporta sustancias como CO, NO<sub>2</sub>, las cuales están por encima de los límites permitidos. Así mismo se identifica material particulado justo en el límite de los rangos establecidos y sustancias como NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> están por encima de los límites permitidos.

**COLAMINADO DE POLIALUMINIO 4**, en espacios con Luz Artificial Directa y Sombra Interior Noche, sustancias como CO, NO<sub>2</sub>, están por encima de los límites permitidos. Así mismo se identifica material particulado justo en el límite de los rangos establecidos, lo cual podría representar un riesgo para la salud.

#### 4. Discusión

##### PLACAS ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIERENO)

El ABS es un copolímero de tres componentes diferentes, butadieno, estireno y acrilonitrilo. Los copolímeros de butadieno-estireno aumentan la resistencia al impacto y el acrilonitrilo tiene tendencia a formar enlaces químicos con componentes externos. (FS Kamelian, 2017)

En general, este material a pesar de sus propiedades mecánicas las cuales generan beneficios desde el punto de vista de resistencia y estabilidad, las placas ABS desprenden gases que pueden ser riesgosos para la salud Humana, los resultados demuestran que para diferentes ambientes se producen COVs y material particulado por encima de los rangos establecidos para su uso.

##### LAMINA GRIFERÍA PVC

Este material se destaca por sus propiedades de Tensión y Flexión, lo cual implica que es un material con resistencia significativa, estabilidad y durabilidad, por lo tanto, esto facilita su aplicación en distintos mobiliarios. Sin embargo, con la manipulación de este material se identifican gases nocivos para la salud humana, especialmente en ambientes interiores. Así mismo, por la naturaleza del material se detecta material particulado (pm2.5 y pm 10) sobrepasando los rangos permitidos.

##### MADERA PLÁSTICA

El compuesto de madera y plástico (WPC) es un material compuesto hecho de plástico como matriz y madera como relleno ( Gardner et al., 2015 ). Su estructura homogénea le otorga propiedades de estabilidad en la utilización como mobiliario, comparado con los demás materiales. Los resultados de las pruebas mecánicas confirman que al someter este material a condiciones de presión (Tensión y Flexión), la resistencia del material es apta para la fabricación de muebles y otros espacios, se evidencia la presencia de gases especialmente NO<sub>2</sub>, y material particulado, es por ello que se recomienda mantener buena ventilación para evitar la saturación en el aire de estos compuestos.

##### VINILO

Para este material tanto delgado como grueso, reporta resultados similares. Según las mediciones realizadas para los distintos ambientes, se observa una mayor incidencia de gases y COVs, en ambientes externos especialmente cuando se ven expuestos a la luz solar. Lo anterior se ve reflejado en los índices reportados por los sensores, los cuales están por encima de los límites permitidos.

##### POLIALUMINIO

El polialuminio es un material producto del reciclaje de envases de material colaminado (comercialmente Tetrapak). Estos materiales presentan pruebas no satisfactorias con respecto a sus propiedades mecánicas, debido a que sus índices de Flexión y Tensión son bajos y por lo tanto, estos materiales no tendrían la suficiente estabilidad y su estructura puede afectarse con la manipulación constante. Así mismo, por su naturaleza, estos materiales contienen derivados del petróleo con residuos de aluminio y cartón, por lo tanto, en las mediciones realizadas se detectan gases como NH<sub>3</sub>, CO y NO<sub>2</sub>, para los distintos ambientes experimentales. Es por ello que para su aplicación, desde el punto de vista estructural y de contaminación, se recomienda hacer seguimiento del mismo, debido a inestabilidad.

## 5. Conclusiones

La investigación sobre VOCs y materiales sostenibles sigue siendo un reto importante a nivel mundial y en especial en Latinoamérica. Por un lado, debido a la complejidad de la medición de las emisiones de VOCs, ya que esta requiere de una metodología precisa y estandarizada, ya que se debe considerar que los niveles de emisión de VOCs pueden variar según el ambiente y las condiciones específicas de uso, por otro lado, la falta de información sobre los efectos a largo plazo de los compuestos orgánicos volátiles en la salud humana y el medio ambiente es otro reto que hace necesario realizar estudios que permitan evaluar los efectos a largo plazo de la exposición a VOC en diferentes poblaciones y contextos. La selección de materiales más sostenibles o que en el mercado se conocen con este calificativo, puede tener un impacto en el costo y la disponibilidad de los materiales, lo que puede generar desafíos en la implementación de prácticas más sostenibles y en la promoción de la innovación en la industria.

La investigación sobre VOCs y materiales sostenibles también enfrenta desafíos en la comunicación y la divulgación de los resultados, ya que es importante traducir los hallazgos técnicos en términos comprensibles para diferentes audiencias, incluyendo a los tomadores de decisiones y al público en general. En general, la investigación sobre VOCs y materiales sostenibles presenta desafíos importantes, pero también ofrece oportunidades valiosas para promover la sostenibilidad y la salud humana en la industria y la sociedad en general. Este tipo de investigación puede ser utilizado como base para la toma de decisiones en la planificación urbana y el diseño de edificios más saludables y sostenibles, ya que los resultados pueden ayudar a los arquitectos y urbanistas a diseñar edificios y espacios que minimicen la emisión de VOCs y otros contaminantes, promoviendo así el bienestar de las personas y el medio ambiente. En general, la investigación sobre VOCs y materiales sostenibles puede generar importantes contribuciones en la promoción del desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida de las personas.

## 6. Agradecimientos

A la Pontificia Universidad Javeriana- PUJ, a su Vicerrectoría de Investigación por la financiación del proyecto (Convocatoria 2020 de proyectos interdisciplinarios). A la facultad de Ciencias por el préstamo del laboratorio de Materiales. Al Design Factory de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la PUJ por los espacios utilizados para el desarrollo del prototipo y la pruebas. A la oficina de suministros de la PUJ, a su director Carlos Alberto Sánchez, por

facilitar la información de procedencia de los materiales utilizados en el campus de la Universidad.

## 7. Bibliografía

CASTRO-HURTADO, I.; MANDAYO, G. G.; CASTAÑO, E. J. T. S. F. Conductometric formaldehyde gas sensors. A review: From conventional films to nanostructured materials. **Thin Solid Films**, v. 548, p. 665-676, 2013.

ZHU, L.; SHEN, D.; LUO, K. H. A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods. **Journal of hazardous materials**, v. 389, p. 122102, 2020.

DEMIREL, G. et al. Personal exposure of primary school children to BTEX, NO<sub>2</sub> and ozone in Eskişehir, Turkey: Relationship with indoor/outdoor concentrations and risk assessment. **Science of the total environment**, v. 473, p. 537-548, 2014.

ADAMOVIĆ, T.; HRADECKÝ, J.; PÁNEK, M. Volatile organic compounds (VOCs) from wood and wood-based panels: Methods for evaluation, potential health risks, and mitigation. **Polymers**, v. 12, n. 10, p. 2289, 2020.

CICOLELLA, A. Volatile Organic Compounds (VOC): definition, classification and properties. **Revue des maladies respiratoires**, v. 25, n. 2, p. 155-163, 2008.

ISO, I. 16000-5: **Indoor Air—Part 5: Sampling Strategy for Volatile Organic Compounds (VOCs)**. ISO: Geneva, Switzerland, 2007.

GMINSKI, R. et al. Chemosensory irritations and pulmonary effects of acute exposure to emissions from oriented strand board. **Human & experimental toxicology**, v. 30, n. 9, p. 1204-1221, 2011.

KIM, S. et al. TVOC and formaldehyde emission behaviors from flooring materials bonded with environmental-friendly MF/PVAc hybrid resins. **Indoor Air**, v. 17, n. 5, p. 404, 2007.

BROWN, S. K. Occurrence of volatile organic compounds in indoor air. In: **ORGANIC INDOOR AIR POLLUTANTS: OCCURRENCE—MEASUREMENT—EVALUATION**. Springer, p. 170-184, 1999.

VAN DER WAL, J. F.; HOOGEVEEN, A. W.; WOUDA, P. The influence of temperature on the emission of volatile organic compounds from PVC flooring, carpet, and paint. **Indoor air**, v. 7, n. 3, p. 215-221, 1997.

KIRKESKOV, L. et al. Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emission from exotic wood products. **Indoor air**, v. 19, n. 1, p. 45, 2009.



WIGLUSZ, R. et al. Volatile organic compounds emissions from particleboard veneered with decorative paper foil. **Polimery**, v. 47, n. 4, p. 283-289, 2002.

DU, Z. et al. Benzene, toluene and xylenes in newly renovated homes and associated health risk in Guangzhou, China. **Building and Environment**, v. 72, p. 75-81, 2014

Adamová, T., Hradecký, J., & Pánek, M. (2020). Volatile organic compounds (VOCs) from wood and wood-based panels: Methods for evaluation, potential health risks, and mitigation. **Polymers**, 12(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/polym12102289>

Akins, E. E., Giddens, E., Glassmeyer, D., Gruss, A., Hedden, M. K., Slinger-Friedman, V., & Weand, M. (2019). Sustainability education and organizational change: A critical case study of barriers and change drivers at a higher education institution. **Sustainability (Switzerland)**, 11(2). <https://doi.org/10.3390/su11020501>

ANAZIFA, R. D., & DJUKRI. (2017). Project-based learning and problem-based learning: Are they effective to improve student's thinking skills? **Jurnal Pendidikan IPA Indonesia**, 6(2), 346–355. <https://doi.org/10.15294/jpii.v6i2.11100>

AUSÍN, V., ABELLA, V., DELGADO, V., & HORTIGÜELA, D. (2016). Aprendizaje basado en proyectos a través de las TIC. Una experiencia de innovación docente desde las aulas universitarias. **Formacion Universitaria**, 9(3), 31–38. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062016000300005>

BALDASSARRE, B., KESKIN, D., DIEHL, J. C., BOCKEN, N., & CALABRETTA, G. (2020, November 10). Implementing sustainable design theory in business practice: A call to action. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123113>

BARNETT, H. L., & HUNTER, B. B. (1998). **Illustrated genera of imperfect fungi**. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA, 218.

BELUCIO, M., RODRIGUES, C., ANTUNES, C. H., FREIRE, F., & DIAS, L. C. (2021). Eco-efficiency in early design decisions: A multimethodology approach. **Journal of Cleaner Production**, 283, 124630. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124630>

BOORSMA, N., BALKENENDE, R., BAKKER, C., TSUI, T., & PECK, D. (2021). Incorporating design for remanufacturing in the early design stage: a design management perspective. **Journal of Remanufacturing**, 11(1), 25–48. <https://doi.org/10.1007/s13243-020-00090-y>

Ramli, N. A., & Yunus, R. M. (2020). Awareness and attitudes towards sustainable development in higher education institutions in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, 266, 121994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994>

Rojas-Andrade, A., & Velásquez-Parra, J. D. (2018). Project-based learning and innovation. A bibliometric analysis in the Web of Science database. **Journal of Technology Management & Innovation**, 13(2), 22–29. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242018000200022>

Romano, M., Giaccone, R., & Zanetti, M. C. (2020). Eco-design practices: A systematic review and bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123001>

Rosero-Montalvo, P. J., Albán-Buitrago, J. A., & Torres-Sánchez, J. (2019). Influence of biomimicry in the development of innovative and sustainable products. **Sustainability (Switzerland)**, 11(4). <https://doi.org/10.3390/su11040986>

Sánchez-Lozano, J. M., López-Gamero, M. D., & Molina-García, A. (2020). Barriers and drivers of eco-innovation in the hospitality sector: Perspectives from Spanish hotels. **Journal of Cleaner Production**, 247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119171>

Savoldelli, A., Tartaglia, A., Di Persio, F., Ferraro, V., Piga, D., & Maffei, S. (2019). Environmental performances of wood-based construction systems: A comparative life cycle assessment of three Italian case studies. **Sustainability (Switzerland)**, 11(1). <https://doi.org/10.3390/su11010177>

Scrucca, F., Fattore, G., & Parente, R. (2020). Circular economy and sustainability: A bibliometric analysis and future research directions. **Journal of Cleaner Production**, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121582>

Smit, N., & Bey, N. (2020). Critical success factors in the implementation of eco-innovation in South African firms. **Journal of Cleaner Production**, 243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118307>

Tang, X., & Tang, Y. (2021). The effects of project-based learning on critical thinking and academic achievement: A meta-analysis. **Educational Research Review**, 34. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.100392>

Uche, C. O., & Ogbonna, O. E. (2019). Design and implementation of a microcontroller-based smart solar-powered irrigation system. **International Journal of Engineering Research & Technology**, 8(5), 1245–1250. <https://doi.org/10.17577/IJERTV8IS050100>

van der Voordt, T., & Knoepfel, P. (2018). Planning sustainable buildings: An update on recent progress. **Journal of Cleaner Production**, 172, 2339–2345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.031>

Zhang, R., Wang, H., Tan, Y., Zhang, M., Zhang, X., Wang, K., ... Xiong, J. (2021). Using a machine learning approach to predict the emission characteristics of VOCs from furniture. **Building and Environment**, 196(February), 107786. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107786>. Acesso em: 19 mar. 2023.