

# TRABAJO FIN DE GRADO

**Título del trabajo:**

Análisis de la calidad del aire en interiores: algunos casos de estudio en sector residencial

**English tittle:**

Indoor air quality: some case studies in residential sector

Autor

Sabina Aguirán Blasco

Directora

Belén Zalba Nonay

Ingeniería Química



## Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a Belén Zalba por su constante trabajo y dedicación.

También a Miguel García-Monge por sus consejos y tiempo invertido en ayudar en el desarrollo de este trabajo.

A Silvia Guillen y a Peña Ormad por su tiempo, propuestas de mejoras e ideas aportadas.

Al personal de mantenimiento por su disponibilidad y atención.

A mis padres y mi pareja por apoyarme.

## Resumen

En primer lugar se revisaron 23 documentos técnicos, de los cuales 10 eran artículos sobre CAI en el sector residencial. Entre las principales líneas de trabajo en la actualidad se encuentran: el estudio de problemas potenciales asociados al uso de purificadores, la investigación de efectos que pueden causar los distintos contaminantes y la petición de implantación en España del sistema de etiquetado para productos de construcción y decoración (adoptado en Francia), entre otras. Tras esta revisión bibliográfica se procedió a plantear los objetivos del trabajo: tomar mediciones en continuo y realizar experimentos.

El primer paso para poder tomar mediciones en continuo es la elección de medidor (apartado 1 y Anexo 3). En este caso se optó por los medidores de la marca inBiot debido principalmente a la variedad de parámetros que son capaces de medir, su precio asequible, conectividad ofrecida y disponibilidad. Con los dispositivos MICA y MICA Plus se tomaron medidas en continuo en tres viviendas diferentes y se realizaron experimentos para relacionar acciones o productos con sus correspondientes emisiones (apartado 2), ya que en la revisión bibliográfica se detallaron posibles efectos de la materia particulada, los COV'S y el formaldehído, por lo que es necesario controlar los niveles de estos en los hogares e intentar reducir su emisión. La ventilación mecánica supone una reducción en la concentración de los contaminantes indicados. No obstante, es recomendable controlar las emisiones porque aunque son menores que en los casos de viviendas sin ventilación mecánica, no son despreciables. Además se midieron incrementos de los contaminantes durante los 14 experimentos, resultados que ayudan a identificar fuentes de estos y reducirlas.

Con el medidor Aranet (el cual se presenta en el apartado 1) se tomaron mediciones de radón en sótanos de tres viviendas diferentes (apartado 3). En una de ellas se tomaron medidas en diferentes épocas del año y en diferentes plantas. Se concluyó que: la concentración de radón es inversamente proporcional a la temperatura y la presión atmosférica, en invierno la concentración alcanza valores mucho más elevados y que el radón está presente en las zonas bajas de las viviendas, las cuales están en contacto con el suelo (sótanos), mientras que para plantas superiores su concentración es mucho menor. Es de especial importancia estudiar y controlar el comportamiento del radón ya que es un contaminante muy peligroso y nocivo, como se ha documentado en la revisión bibliográfica.

Así mismo, en el apartado de estado del arte se mencionaron problemas asociados al uso de algunos tipos de purificadores, entre ellos, la generación de ozono. Es por ello que en el apartado 4 se realizaron 3 experimentos con diferentes condiciones iniciales haciendo uso del medidor MICA WELL para ver la evolución de los contaminantes durante un periodo de tiempo en el que se puso en funcionamiento un purificador de iones. No se observaron variaciones de ozono significativas pero sí de formaldehído, por lo que se planteó que los COV'S presentes en el aire interior pudieran reaccionar con el posible ozono generado, dando lugar así a la formación de ozono y otros contaminantes secundarios.

Como parte final del trabajo se redactaron de forma conjunta las conclusiones y se plantearon posibles líneas de futuro en las que se puede seguir trabajando en cuanto a calidad del aire interior en el sector residencial.

## Índice

Agradecimientos.....	3
Resumen.....	4
Glosario de términos.....	6
Listado de tablas.....	8
Listado de figuras.....	9
Relación de este trabajo con los ODS.....	12
Introducción y revisión bibliográfica.....	13
1. Medidores de calidad del aire interior.....	19
2. Mediciones en continuo en viviendas.....	24
2.1 Estudio y análisis de las mediciones en continuo obtenidas.....	24
2.2 Experimentos para ver el comportamiento de los diferentes contaminantes ante acciones de los ocupantes.....	31
3. Presencia de radón en las viviendas.....	42
3.1 Mediciones tomadas en diferentes viviendas.....	42
3.2 Comparación de las mediciones tomadas en primavera e invierno.....	47
3.3 Comparación de las mediciones tomadas en distintos pisos de la vivienda.....	48
3.4 ¿Cómo mitigar el radón residencial?.....	48
4. Estudio de posibles subproductos generados con purificador de aire de iones.....	49
Conclusiones.....	57
Líneas de futuro.....	60
Bibliografía.....	61
Anexo 1. Desarrollo e interpretación de los experimentos.....	64
Anexo 2. Complemento de los experimentos realizados con purificador de iones.....	85
Anexo 3. Justificación de la elección de medidores.....	87

## Glosario de términos

### A

AVAD: Años de Vida Ajustados por Discapacidad

### B

Bq: becquerel o bequerelio

### C

CAI: Calidad de Aire Interior

$CH_2O$ : Formaldehído

$CO_2$ : Dióxido de carbono

COV'S: Compuestos Orgánicos volátiles

### E

EPA: Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos

EE.UU: Estados Unidos

### G

GSM: Sistema Global para las Comunicaciones Móviles

### H

HEPA: High Efficiency Particle Arresting

HR: Humedad relativa

### I

IAQ: Indoor Air Quality

IARC: Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer

### L

LED: Light Emitting Diode

LoRaWan: Low Power Wide Area Network

### N

$NO_2$ : dióxido de nitrógeno

### O

OMS: Organización Mundial de la Salud

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

$O_3$ : Ozono

P

PM: materia particulada

Ppb: partes por billón

Ppm: partes por millón

P90: percentil noventa

R

Rd: radón

T

TFG: Trabajo fin de grado

W

Wi-Fi: Wireless Fidelity

## Listado de tablas

Tabla 1. Sensores utilizados para cada parámetro por los dispositivos de inBiot .....	21
Tabla 2. Características medidor Aranet .....	22
Tabla 3. Rango, precisión y sensibilidad para otros parámetros del medidor Aranet .....	23
Tabla 4. Situación de medidores inBiot según fecha.....	24
Tabla 5. Valores recomendados para cada parámetro y valores límite admisibles para la salud establecidos por inBiot. ....	25
Tabla 6. Valores máximos, medios y mínimos de temperatura para cada caso. ....	26
Tabla 7. Valores máximos, medios y mínimos de humedad para cada caso.....	26
Tabla 8. Valores máximos y medios de CO2 para cada caso.. ....	27
Tabla 9. Valores máximos y medios de formaldehído para cada caso. ....	29
Tabla 10. Valores máximos y medios de PM2.5 para cada caso.. ....	31
Tabla 11. Valores máximos y medios de PM1.0 para cada caso.. ....	31
Tabla 12. Valores máximos y medios de PM10 para cada caso.. ....	31
Tabla 13. Gráficas y conclusiones de cada experimento.....	34
Tabla 14. Incrementos de los contaminantes para cada experimento haciendo uso del purificador de iones .....	54
Tabla 15. Calidad del aire indicada según el color del purificador .....	55
Tabla 16. Conclusiones de los experimentos.....	57
Tabla 17. Experimentos ordenados según emisiones .....	58
Tabla 18. Resumen apartado 3.....	59
Tabla 19. Resumen experimentos apartado 4.....	59

## Listado de figuras

Figura 1. ODS con los que está relacionado el trabajo. Fuente: elaboración propia a partir de la web de las Naciones Unidas.....	12
Figura 2. Importancia de ventilar .....	13
Figura 3. Efecto de la concentración de CO <sub>2</sub> .....	14
Figura 4. Fuentes de contaminantes .....	14
Figura 5. Algunas fuentes y efectos de los COV'S.....	15
Figura 6. Algunas fuentes y efectos del formaldehído .....	15
Figura 7. Algunas fuentes y efectos de las partículas en suspensión. ....	15
Figura 8. Nivel de penetración según el tamaño de partícula .....	16
Figura 9. Sistema de etiquetado francés. ....	17
Figura 10. Dimensiones dispositivo inBiot.....	19
Figura 11. Parámetros medidos por dispositivos inBiot .....	19
Figura 12. Necesidad de ventilar, medidores inBiot.....	20
Figura 13. Medidor Aranet .....	22
Figura 14. Aplicación Aranet Home. ....	22
Figura 15. Mediciones en continuo de temperatura.....	25
Figura 16. Mediciones en continuo de humedad.....	26
Figura 17. Mediciones en continuo de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	27
Figura 18. Efectos según la concentración de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	27
Figura 19. Límite de CO <sub>2</sub> como indicador indirecto de riesgo de infección. ....	28
Figura 20. Relación CO <sub>2</sub> y % de aire ya respirado por otra persona .....	28
Figura 21. Mediciones en continuo de formaldehído .....	29
Figura 22. Mediciones en continuo de COV'S.....	30
Figura 23. Mediciones en continuo de PM <sub>2.5</sub> .....	30
Figura 24. Humidificador "Pure Aroma 150 Yin". ....	32
Figura 25. Aumento en la concentración de PM <sub>2.5</sub> al usar agua del grifo en un humidificador ultrasónico. ....	32
Figura 26. Evolución de la concentración de PM <sub>2.5</sub> al usar agua destilada en un humidificador ultrasónico.....	32
Figura 27. Evolución de la concentración de PM <sub>2.5</sub> al usar agua del subsuelo en un humidificador ultrasónico.....	33
Figura 28. Valores obtenidos para la concentración de radón.....	42
Figura 29. Concentración de radón frente a presión atmosférica, para valores tomados cada 10 minutos .....	42
Figura 30. Concentración de radón frente a presión atmosférica, para valores promedio cada hora. ....	43
Figura 31. Concentración de radón frente a presión atmosférica, para valores promedio diarios .....	43
Figura 32. Concentración de radón frente a humedad relativa, para valores promedio diarios .....	44
Figura 33. Concentración de radón frente temperatura, para valores promedio diarios.....	44
Figura 34. Concentración de radón frente temperatura, para valores promedio cada hora.....	45
Figura 35. Concentración de radón a lo largo del día, influencia del uso del extractor .....	45
Figura 36. Extractor sótano Montecanal .....	46
Figura 37. Mapa del Potencial de Radón de España.....	46
Figura 38. Rango de concentraciones medido en las viviendas. ....	47
Figura 39. Radón medido en el sótano de la vivienda de Casablanca durante el verano .....	47
Figura 40. HAVERLAND AIRPURE19 PURIFICADOR.....	49
Figura 41. Filtros purificador. ....	49

Figura 42. Purificador indicador de la calidad del aire .....	50
Figura 43. Evolución de la concentración de partículas al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S.....	50
Figura 44. Evolución de la concentración de ozono al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S.....	51
Figura 45. Evolución de la concentración de COV'S al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S.....	51
Figura 46. Evolución de la concentración de formaldehído al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S .....	52
Figura 47. Tabla balance global purificadores .....	52
Figura 48. Evolución de la concentración de partículas al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S.....	53
Figura 49. Evolución de la concentración de ozono al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración alta de COV'S .....	53
Figura 50. Evolución de la concentración de COV'S al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración alta de COV'S .....	54
Figura 51. Evolución de la concentración de formaldehído al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración alta de COV'S.....	54
Figura 52. Colores indicadores de la CAI del purificador .....	55
Figura 53. Calidad del aire indicada vs concentración de COV'S presente .....	55
Figura 54. Calidad del aire indicada vs concentración de formaldehído presente.....	56
Figura 55. Desodorante deliplus.....	64
Figura 56. Aumento de COV'S al aplicar desodorante en spray .....	64
Figura 57. Aumento de formaldehído al aplicar desodorante en spray .....	65
Figura 58. Aumento de PM2.5 al aplicar desodorante en spray .....	65
Figura 59. Aumento de PM2.5 al cocinar sin hacer uso de la campana extractora. ....	66
Figura 60. Aumento de PM2.5 al cocinar haciendo uso de la campana extractora .....	66
Figura 61. Aumento de COV'S debido al esmalte de uñas .....	66
Figura 62. Aumento de formaldehído al pasar el aspirador.....	67
Figura 63. Situación 1 experimento salón por la noche. ....	68
Figura 64. Situación 2 experimento salón por la noche. ....	68
Figura 65. Situación 3 experimento salón por la noche .....	68
Figura 66. Ambientador en spray fragancia floral .....	69
Figura 67. Componentes ambientador en spray fragancia floral.....	70
Figura 68. Aumento de COV'S al rociar ambientador en spray fragancia floral .....	70
Figura 69. Aumento de formaldehído al rociar ambientador en spray fragancia floral .....	70
Figura 70. Aumento de partículas en suspensión al rociar ambientador en spray fragancia floral .....	71
Figura 71. Incienso con olor a rosa.....	71
Figura 72. Aumento de partículas en suspensión al encender incienso.....	72
Figura 73. Aumento de COV'S al encender incienso .....	72
Figura 74. Aumento de formaldehído al encender incienso .....	72
Figura 75. Aumento de formaldehído al poner una bolsa de palomitas en el microondas .....	73
Figura 76. Aumento de COV'S al poner una bolsa de palomitas en el microondas .....	73
Figura 77. Aumento de partículas en suspensión al poner una bolsa de palomitas en el microondas.....	74
Figura 78. Rotulador 1 .....	74
Figura 79. Aumento de formaldehído al hacer uso del rotulador 1 .....	75
Figura 80. Aumento de COV'S al hacer uso del rotulador 1 .....	75
Figura 81. Rotulador 2 .....	75
Figura 82. Aumento de formaldehído al hacer uso del rotulador 2 .....	76
Figura 83. Aumento de COV'S al hacer uso del rotulador 2 .....	76

Figura 84. Pack de velas olor lavanda.....	77
Figura 85. 10 velas olor lavanda encendidas.....	77
Figura 86. Aumento de COV'S al encender 10 velas aromáticas.....	77
Figura 87. Aumento de formaldehído al encender 10 velas aromáticas.....	78
Figura 88. Consumo de ozono con los COV'S emitidos por velas aromáticas.....	78
Figura 89. Aumento de partículas en suspensión al encender 10 velas aromáticas.....	79
Figura 90. Varitas difusoras de aroma olor lavanda.....	79
Figura 91. Varitas introducidas en bote en dejados en la sala.....	79
Figura 92. Aumento de COV'S al hacer uso de varitas difusoras de aroma olor lavanda.....	80
Figura 93. Aumento de formaldehído al hacer uso de varitas difusoras de aroma olor lavanda.....	80
Figura 94. Emisiones de COV'S debidas al uso de ambientador en spray comparadas con las debidas al uso de varitas difusoras de aroma.....	81
Figura 95. Emisiones de formaldehído debidas al uso de ambientador en spray comparadas con las debidas al uso de varitas difusoras de aroma.....	81
Figura 96. Aceite esencial con olor a pino.....	82
Figura 97. Aumento de COV'S al hacer uso de aceites esenciales en humidificador.....	82
Figura 98. Aumento de formaldehído al hacer uso de aceites esenciales en humidificador.....	82
Figura 99. Despreciable aumento de partículas en suspensión al hacer uso de aceites esenciales en humidificador.....	83
Figura 100. Aumento de COV'S al rociar insecticida.....	83
Figura 101. Aumento de partículas en suspensión al rociar insecticida.....	84
Figura 102. Formaldehído no varía al rociar insecticida.....	84
Figura 103. Evolución de la concentración de partículas al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S.....	85
Figura 104. Evolución de la concentración de ozono al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S.....	85
Figura 105. Evolución de la concentración de COV'S al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S.....	86
Figura 106 Evolución de la concentración de formaldehído al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S.....	86
Figura 107. Parámetros medidos por medidores comparados.....	87
Figura 108. Rango y precisión para cada variable de los medidores comparados.....	87
Figura 109. Sensores de los medidores comparados.....	88
Figura 110. Conectividad de los medidores comparados.....	88

## Relación de este trabajo con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron aprobados en 2015 por todos los Estados Miembros de la Naciones Unidas. Consisten en 17 Objetivos los cuales forman parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en el cual se establece un plan para alcanzar los objetivos en 15 años. Entre otros propósitos de estos Objetivos se encuentran la protección de planeta y la mejora de las vidas y perspectivas de las personas a nivel global [1].

Este trabajo está relacionado con varios de esos Objetivos, siendo los más representativos los mostrados en la tabla adjunta en la figura 1:



Figura 1. ODS con los que está relacionado el trabajo. Fuente: elaboración propia a partir de la web de las Naciones Unidas

Dentro de cada Objetivo se encuentran diferentes metas. Las metas a las que está ligado el trabajo son las siguientes:

3.9 Reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire.

3.4 Promover el bienestar.

11.6 Reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades prestando especial atención a la calidad del aire.

13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.

## Introducción y revisión bibliográfica

### Importancia de mantener una buena calidad del aire interior en los hogares

La población de los países industrializados pasa entre un 80% y un 90% de su tiempo en interiores, incluyendo especialmente a la población más vulnerable, como niños, ancianos y enfermos [2]. Concretamente en la vivienda se suele pasar el 50% del tiempo, porcentaje más que significativo [5]. De no existir una ventilación adecuada, se producirá una degradación del ambiente interior, lo que puede conllevar sintomatologías y problemas de salud; pérdida de rendimiento cognitivo, es decir, disminución de la capacidad de realizar tareas que requieran pensamiento o concentración, y generación de condiciones de alta transmisión de enfermedades respiratorias [2].

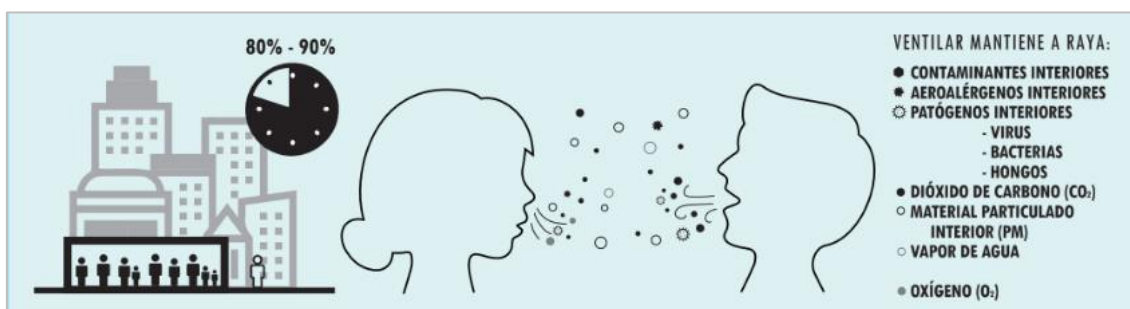


Figura 2. Importancia de ventilar. Fuente: Campano, M.Á., Fernández-Agüera, J., Sendra, J.J. (2023). "Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica". Octaedro.

En general las personas cuidan lo que comen y beben, pero no existe esa preocupación y ese cuidado cuando se trata del aire respirado. Esto es algo que urge cambiar, ya que una persona al día come alrededor de 1 kg de comida y bebe aproximadamente unos 2 kg de líquidos, sin embargo, la cantidad de aire respirado es de unos 15 kg, cifra significativamente mayor [4].

La generación de contaminantes en los ambientes cerrados debida a la mera presencia de personas y sus actividades es consecuencia del uso de los edificios, por tanto la renovación del aire interior con aire nuevo de mejor calidad para diluir dichos contaminantes es absolutamente básica [3].

Aunque existen más tipos de ventilación, las más comunes son la natural y la mecánica controlada [2].

Dado que el CO<sub>2</sub> es exhalado durante la respiración, es posible utilizar, en espacios libres de procesos de combustión y con ocupación humana, su nivel relativo como indicador indirecto para caracterizar el proceso de la ventilación, así como representación de los niveles de otros parámetros que se comentarán posteriormente, además del posible riesgo relativo existente de transmisión de enfermedades aéreas. La inhalación de dióxido de carbono en ambientes con niveles moderados y elevados puede generar efectos respiratorios y cardiovasculares, así como cambios fisiológicos en la química de la sangre (presión sanguínea, tasa cardíaca, solubilidad, etc.). A niveles muy elevados, se han documentado incluso respuestas similares a ataques de pánico y experiencias de estrés fisiológico. Para el caso de niveles de concentración de dióxido de carbono relevantes en edificios (por debajo de 5.000 ppm), se ha encontrado una correlación entre el valor absoluto de CO<sub>2</sub> y la aparición de síntomas tales como dolor de cabeza, fatiga o dolor de garganta, observándose también una serie de efectos cognitivos negativos con concentraciones menores [2].

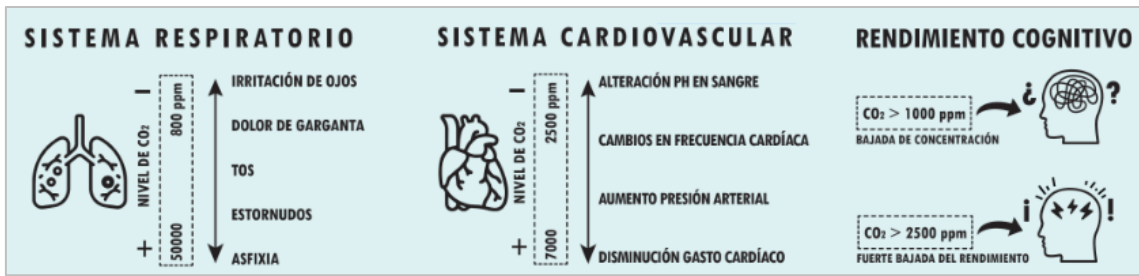


Figura 3. Efecto de la concentración de CO<sub>2</sub>. Fuente: Campano, M.Á., Fernández-Agüera, J., Sendra, J.J. (2023). "Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica". Octaedro.

### Principales contaminantes de la calidad del aire interior residencial y sus fuentes

Si bien es cierto que una fuente de contaminantes son las acciones humanas, esta no es la única. Además de estas se debe tener en cuenta que existen otros factores que son determinantes en CAI residencial, como el propio edificio en sí (por ejemplo, al sellar o aislar las viviendas, existe la posibilidad de introducir sustancias químicas en el aire interior como resultado de la liberación de gases de los materiales utilizados [8]), los muebles de la vivienda y los procesos químicos que ocurren entre compuestos presentes en un espacio interior [4].

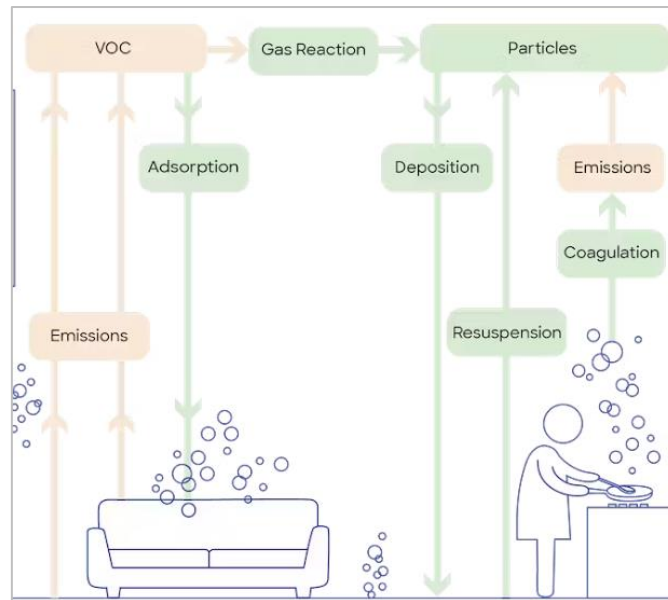


Figura 4. Fuentes de contaminantes. Fuente: Healthy Materials Lab blog

A continuación se procede a hacer un breve resumen sobre los principales contaminantes de CAI residencial.

#### Compuestos orgánicos volátiles (COV'S)

Los COV'S son todos aquellos hidrocarburos presentes en estado gaseoso a temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura. Un compuesto orgánico se considera COV si a 20 °C presenta una presión de vapor de 0,01 kPa o más, o una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso, y un punto de ebullición entre 50 y 260 °C [11].

Algunas fuentes	Efectos
Productos de limpieza y mantenimiento. Productos con los que se construyen o decoran los edificios. Productos de control de plagas. Humo del tabaco.	Algunos efectos son prácticamente inocuos para la salud. Otros promueven efectos ligeros como irritaciones nasales, oculares y de garganta. En algunos casos pueden ser más agudos causando dolores de cabeza o náuseas.

Figura 5. Algunas fuentes y efectos de los COV'S. Fuente: elaboración propia a partir de DTIE 2.02, Atecyr.

En concentraciones más altas, lo cual no suele ser usual en hogares, ya que basta con abrir la ventana un intervalo de tiempo pequeño para se reduzca dicha concentración, podrían producir efectos más graves como daños en el hígado, en el riñón o en el sistema central, además de conjuntivitis, reacciones cutáneas alérgicas, sensación de fatiga, hemorragia nasal, mareo o incluso pérdida de coordinación motora. Algunos de los más dañinos son cancerígenos para las personas [3].

Formaldehído:

El formaldehído es el compuesto orgánico más simple de la familia de los aldehídos, estando constituido por un carbono unido a dos átomos de hidrógeno y un oxígeno. Es incoloro y posee un olor acre muy fuerte [3].

Algunas fuentes	Efectos
Diversos materiales de construcción, desde aislantes hasta aglomerantes para madera. Productos de uso en los ambientes interiores (como por ejemplo mobiliario y textiles).	Irritación de las vías respiratorias y de la piel. Posibles problemas de tipo neurológico. Posible cancerígeno.

Figura 6. Algunas fuentes y efectos del formaldehído. Fuente: elaboración propia a partir de DTIE 2.02, Atecyr.

Partículas en suspensión:

Las partículas en suspensión (aerosoles) son elementos sólidos o líquidos dispersos en el aire de origen natural (polvo de tierra, sal marina y emisiones naturales, entre otros) o artificial [3].

Las partículas pequeñas tienen mayor capacidad de penetración y permanencia en el interior del sistema respiratorio, por lo que el factor crítico que determina un mayor o menor efecto sobre la salud es el tamaño. El efecto final de las partículas depositadas en el sistema respiratorio depende de su composición química, que puede dar lugar a efectos toxicológicos diversos, irritaciones, fibrosis, alveolitis, bronquiolitis, etc. [3].

La contaminación por partículas en ambientes interiores se debe controlar actuando a nivel de filtración y de limpieza [3].

Algunas fuentes	Efectos
Cocinar. Empleo de aerosoles. Limpiar. Combustiones. Garajes. Humo del tabaco.	Irritaciones de vías respiratorias. Mayor incidencia y agravamiento de episodios asmáticos y de enfermedades cardiovasculares. A largo plazo, aumento de la morbilidad y de la frecuencia de cáncer pulmonar.

Figura 7. Algunas fuentes y efectos de las partículas en suspensión. Fuente: elaboración propia a partir de DTIE 2.02, Atecyr.

El tamaño de las partículas es un aspecto muy importante a tener en cuenta, ya que cuanto menor sea, mayor capacidad de penetración poseerán las partículas y, por tanto, el posible efecto sobre la salud sería más grave. En la figura 8 se muestran algunos efectos según el alcance de las partículas:

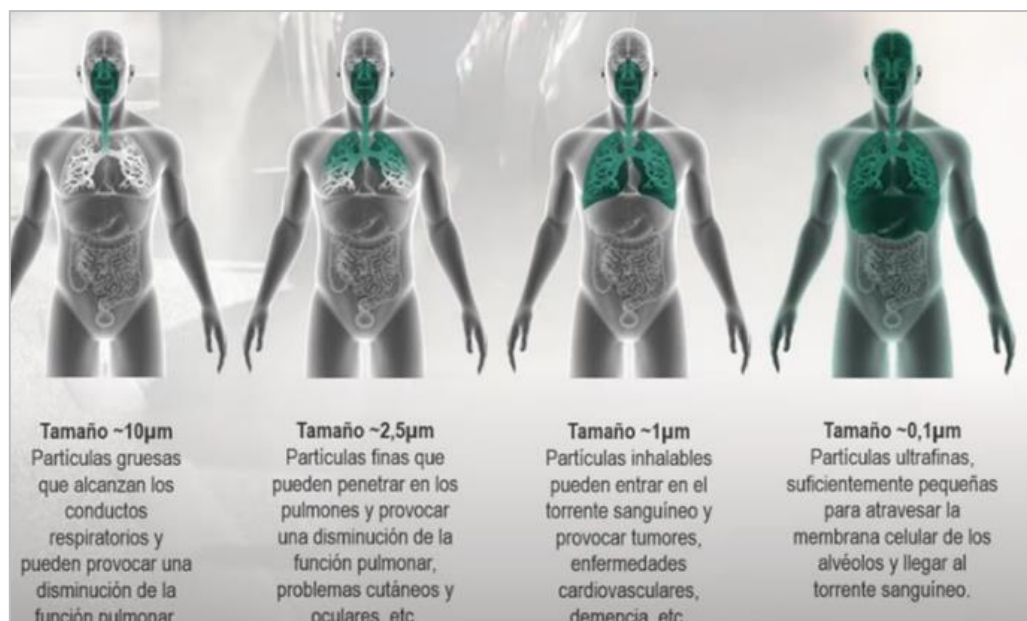


Figura 8. Nivel de penetración según el tamaño de partícula. Fuente: adaptación de KEYTER a partir de publicación de Camfil UK

### **Peligrosidad del radón**

El radón es un gas radioactivo de origen natural que se produce en la desintegración del radio. Se produce principalmente en la capa basáltica del subsuelo y accede al interior de los edificios al permear hasta la superficie y entrar en los garajes, sótanos y en general las estancias en contacto con el suelo, a través de cualquier grieta, desagües, etc. Los materiales de construcción son la segunda fuente en importancia de radón en interiores [3].

El radón está catalogado como cancerígeno por la OMS, de acuerdo con la IARC y la EPA de EE.UU, que lo clasifican cancerígeno del Grupo 1 y del Grupo A. Es la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en EE.UU. Aunque la radiación de baja energía producida en el proceso de desintegración del gas no afecta cuando impacta sobre la piel, sí que produce efectos cancerígenos una vez es inhalado al nivel alveolar [3].

En un estudio publica en el British Medical Journal se concluyó que el riesgo de cáncer de pulmón debido a la exposición a radón aumenta de manera lineal y estadísticamente significativa en un 16% por cada 100 Bq/m<sup>3</sup> de concentración de radón [12].

Debido al riesgo que supone el radón residencial se ha realizado un análisis en diferentes viviendas en el apartado 3 del trabajo para estudiar los niveles de radón presente en hogares y ver su comportamiento ante diversos factores como temperatura o presión atmosférica, entre otros.

### **Revisión bibliográfica**

Se ha realizado una revisión técnica sobre CAI residencial. A continuación se muestran los aspectos más destacables:

1. En Francia se emplea un sistema de etiquetado para productos de construcción y decoración (por ejemplo para pinturas y barnices) el cual indica el nivel de emisión que posee el producto

comercializado, clasificándose de A+ a C (no pudiéndose comercializar productos con emisiones superiores a las indicadas para los productos de clase C) [20,21]. La regulación fundamental fue establecida en el Decreto nº 2011- 321 de 23 de marzo de 2011, siendo completada por su correspondiente orden de 19 de abril de 2011. Se establecen los siguientes intervalos de valores emitidos para cada una de las sustancias [4]]:

CAS	ÉMISSIONS DANS L'AIR INTÉRIEUR			
	 C	 B	 A	 A+
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
TVOC	> 2.000	< 2.000	< 1.500	< 1.000
Formaldehído 50-00-0	> 120	< 120	< 60	< 10
Acetaldehído 75-07-0	> 400	< 400	< 300	< 200
Tolueno 108-88-3	> 600	< 600	< 450	< 300
Tetracloroetileno 127-18-4	> 500	< 500	< 350	< 250
Etilbenceno 100-41-4	> 1500	< 1500	< 1000	< 750
Xileno 1330-20-7	> 400	< 400	< 300	< 200
Estireno 100-42-5	> 500	< 500	< 350	< 250
2-Butoxietanol 111-76-2	> 2.000	< 2.000	< 1.500	< 1.000
1,2,4-Trimetilbenceno 95-63-6	> 2.000	< 2.000	< 1.500	< 1.000
1,4-Diclorobenceno 106-46-7	> 120	< 120	< 90	< 60

Figura 9. Sistema de etiquetado francés. Fuente: adaptación de KEYTER a partir de los documentos oficiales

- Algunos ejemplos de nuevas tecnologías que se están adoptando en entornos residenciales son: dispositivos de limpieza de aire (que varían ampliamente en su tecnología, incluyendo filtración mecánica y electrónica), sistemas de adsorción, irradiadores UV, oxidación fotocatalítica y técnicas de limpieza de plasma frío / plasma térmico frío. Además, aunque el uso de purificadores de aire está muy extendido hoy en día, se han documentado problemas potenciales asociados a ellos, principalmente relacionados con la generación de ozono [6].
- Estudios epidemiológicos recientes demuestran riesgos elevados de cáncer incluso en concentraciones de radón tan bajas como  $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$  [7]. La OMS establece unos límites para la concentración de radón en interiores de  $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$  (valores inferiores a esta cifra no son preocupantes) y de  $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , de forma que si la concentración de radón existe está entre los valores citados es preocupante y si se supera el segundo se deben toma acción para reducirla [8].
- Más del 70 % de los estudios mostraron un efecto positivo en la calidad del aire interior con el uso de la ventilación inteligente [9]. Sin embargo, generalmente se establecen las tasas de ventilación basándose en consideraciones de confort y no en criterios de salud, como se sugiere en el proyecto Health-vent [10].
- Entre los efectos adversos más frecuentes identificados en un estudio residencial se encontraban la humedad interior y el contenido de moho, que provocan importantes problemas de salud, como enfermedades respiratorias, enfermedades cardiovasculares, cáncer de pulmón, asma, bronquitis e infecciones de las vías respiratorias [8].
- El formaldehído y las  $\text{PM}_{2,5}$  se identificaron entre los cinco contaminantes con las estimaciones de pérdida de AVAD (años de vida ajustados por discapacidad) más alta [13].
- Numerosos estudios epidemiológicos indican una correlación positiva entre la exposición a material particulado con un diámetro inferior a  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y mayores riesgos para la salud, como alergias infantiles, variabilidad de la frecuencia cardíaca en ancianos, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, enfermedad coronaria y asma. Además, las  $\text{PM}_{2.5}$  se agregaron al grupo de carcinógenos de primer nivel en 2013 [14].
- Se ha demostrado que los niveles de  $\text{CO}_2$  superiores a 1100 ppm tienen efectos negativos en la calidad del sueño y que dormir a niveles  $> 2600$  ppm es probable que reduzca el rendimiento cognitivo al día siguiente [15].

9. El aumento de la esperanza de vida humana asociado con una reducción de la contaminación por PM subraya la importancia de implementar estrategias para mantener los niveles de exposición por debajo de los límites recomendados para la salud [16].
10. Las partículas en suspensión son el contaminante del aire que causa los problemas de salud más significativos, contribuyendo a aproximadamente 307.000 muertes prematuras en 2019 [17].
11. En ciertos casos los niveles de COV'S en interiores pueden alcanzar hasta 1000 veces los niveles de fondo típicos en exteriores [18].
12. Las consecuencias para la salud asociadas con la exposición residencial a los COV'S son complejas y aún se investigan, pero abarcan múltiples trastornos cardiometabólicos, incluyendo, entre otros, lesiones hepáticas, enfermedades cardiovasculares, diabetes y resistencia a la insulina [19].
13. Las concentraciones de microbios (bacterias y hongos) están estrechamente relacionadas con la calidad de la ventilación y el nivel de ocupación [23].
14. En la cocina, un solo evento de cocción de 6 minutos con altas emisiones provoca un aumento del 21 % al 25 % en las concentraciones de materia particulada en interiores [24].
15. El estudio "Carga Mundial de Enfermedades" estimó que las muertes prematuras a nivel mundial relacionadas con PM2.5 aumentaron de 3,5 millones en 1990 a 4,2 millones en 2015, representando aproximadamente el 7,6 % de las muertes mundiales en 2015 [25].
16. El uso de formaldehído en materiales de construcción data de la década de 1940 y continúa hoy en día sin disminuir, a pesar de su clasificación internacional en 2004 como carcinógeno humano [26].
17. A mayor temperatura del aire, más rápido se libera el formaldehído en interiores y mayor es la concentración instantánea de formaldehído [27].
18. Los COV'S son precursores importantes del ozono troposférico ( $O_3$ ) y la formación de aerosoles orgánicos secundarios [28].
19. Ciertas reacciones harán que los COV se descompongan para convertirse en dos moléculas más pequeñas; un compuesto común formado es el formaldehído [33].

### **Objetivos del trabajo**

Tras realizar esta revisión bibliográfica en la que se ha puesto de manifiesto la importancia de medir en continuo en los hogares, se plantean los siguientes objetivos para este trabajo:

1. Escoger medidores adecuados para el caso que permitan tomar mediciones en continuo.
2. Con esas mediciones en continua se pretende analizar las diferentes evoluciones de los principales contaminantes del aire interior residencial, vistos en este apartado junto a los efectos que pueden causar.
3. Así mismo también se busca realizar experimentos con el fin de medir los diferentes valores de incrementos en las concentraciones de los contaminantes para diferentes actividades humanas que tienen lugar en el hogar, con el fin de identificar aumentos significativos y así poder tomar medidas para intentar reducir dichas emisiones.
4. Dado que el radón es un gas muy nocivo, se pretende realizar un análisis de la presencia de este en diferentes viviendas y diferentes situaciones.
5. Se hace uso de un purificador de iones, tipo de purificador que en varios artículos ha sido dicho de generar ozono entre otros contaminantes secundarios, para poder analizar así la evolución de los diferentes contaminantes.

## 1. Medidores de CAI

En la actualidad se pueden encontrar diferentes medidores de calidad de aire interior, los cuales poseen sus respectivas características y ayudan a controlar y mejorar la calidad del aire de los hogares. Entre las propiedades que los caracterizan se encuentran su conectividad, precisión y los parámetros que son capaces de medir, entre otras.

Debido a que en otros trabajos realizados por alumnos de Unizar ya se han estudiado diversos medidores de la CAI, se parte de la base de que los medidores de la marca inBiot son una buena opción para realizar el estudio de la calidad de aire interior, en este caso, del sector residencial. Los argumentos expuestos en trabajos anteriores se han recogido en el Anexo 3, pero cabe mencionar la disponibilidad de estos durante el periodo de realización del trabajo.

### Medidores de inBiot

Aunque existen numerosas marcas que comercializan medidores de la calidad del aire interior, se ha optado por focalizar la atención en una marca concreta, inBiot, ya que los tres medidores empleados en este trabajo para tomar mediciones en continuo son de dicha marca. Esta cuenta con cuatro medidores en el mercado actualmente: MICA mini, MICA, MICA Plus y MICA WELL. Sus dimensiones se corresponden con las mostradas en la figura 10:

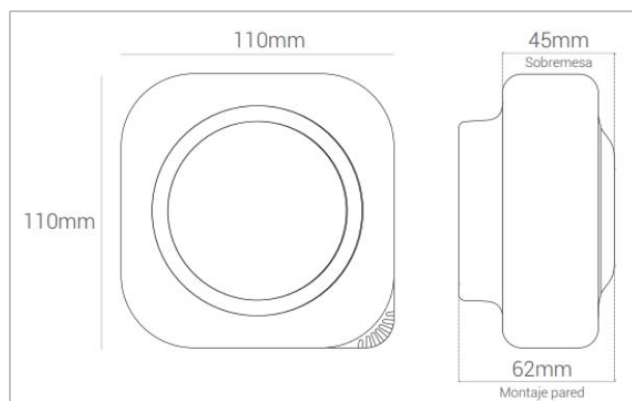


Figura 10. Dimensiones dispositivo inBiot. Fuente: inBiot

Los parámetros medidos por cada uno de ellos se muestran en la figura 11:

	Mediciones			
	MICA mini	MICA	MICA Plus	MICA WELL
Temperatura	✓	✓	✓	✓
Humedad relativa	✓	✓	✓	✓
CO <sub>2</sub>	✓	✓	✓	✓
TVOC	✗	✓	✓	✓
PM1.0	✗	✗	✓	✓
PM2.5	✗	✓	✓	✓
PM4.0	✗	✗	✓	✓
PM10	✗	✓	✓	✓
Formaldehído	✗	✗	✓	✓
Ozono	✗	✗	✗	✓
NO <sub>2</sub>	✗	✗	✗	✓
CO	✗	✗	✗	✓

Figura 11. Parámetros medidos por dispositivos inBiot. Fuente: elaboración propia a partir de datos de inBiot

Todos ellos se consideran indicadores del confort termohigrométrico y de la eficacia de ventilación. Sin embargo, el MICA mini no sirve como indicador de la calidad del aire interior ni como indicador de la resistencia a virus, debido a que no mide los parámetros necesarios para ello, mientras que los tres restantes sí.

Estos dispositivos poseen valores límite para la salud humana para cada parámetro y el usuario es capaz de visualizar el estado de cada uno de ellos entrando en la web del dispositivo. Los valores límite se encuentran detallados en el apartado 2 del trabajo. Un aspecto positivo que presentan estos dispositivos es que son muy visuales. Con solo observar el color del propio medidor, sin necesidad de consultar nada más, se puede saber si es necesario ventilar, tal y como se muestra en la figura 12:



**Figura 12. Necesidad de ventilar, medidores inBiot. Fuente: in Biot**

Para este trabajo se ha contado con tres dispositivos inBiot: un MICA, un MICA Plus y un MICA WELL. Los dos primeros han sido utilizados para realizar mediciones en continuo en varias viviendas, cuyo análisis se muestra posteriormente en el apartado 2 del trabajo. El MICA WELL ha sido fundamental para poder realizar experimentos relacionados con el uso de un purificador de iones, donde era imprescindible poder medir el ozono.

En cuanto a sus conectividades, las posibilidades ofrecidas por la marca son varias. En concreto, para los medidores utilizados en el trabajo las conectividades usadas han sido GSM (para los medidores MICA y MICA Plus) y WiFi (para el MICA WELL). A nivel práctico la instalación de los medidores que funcionan con GSM ha sido más sencilla ya que ha bastado con conectarlos al enchufe, sin embargo, para el MICA WELL se ha tenido que instalar la aplicación “inBiot Setup” en el teléfono móvil para su configuración por Wifi. Esto tampoco ha sido un impedimento ya que la configuración es sencilla y está claramente indicada paso a paso en la propia aplicación.

A continuación se muestra el tipo de sensor utilizado para cada parámetro junto a su unidad de medida, rango y precisión en la tabla 1:

**Tabla 1. Sensores utilizados para cada parámetro por los dispositivos de inBiot. Fuente:elaboración propia**

Parámetro	Tipo de sensor	Unidad de medida	Rango	Precisión
Temperatura	Silicon Bandgap	°C	(-40) - 145	± 0,5
Humedad relativa	Capacitivo	% HR	0 - 100	± 2
CO2	NDIR	ppm	400 - 10000	±(30 + 3% m.v.)
COV'S	MOx	Index points	0 - 500	±15 o ±15% m.v. (el más grande)
PM2.5	Láser de partículas	µg/m³	0 - 1000	±(5 + 5% m.v.) para (1 - 100) ±10% m.v. para (101 - 1000)
PM10	Láser de partículas	µg/m³	0 - 1000	±(5 + 20% m.v.) para (1 - 100) ±25% m.v. para (101 - 1000)
PM4.0	Láser de partículas	µg/m³	0 - 1000	±25 para (0 - 100) ±25% m.v. para (101 - 1000)
PM1.0	Láser de partículas	µg/m³	0 - 1000	±(5 + 5% m.v.) para (0 - 100) ±10% m.v. para (101 - 1000)
Formaldehído	Electroquímico	ppb	0 - 1000	±20 o ±20% m.v. (el más grande)
O3	Electroquímico	ppb	0 - 5000	±10 para (0 - 500) ±2% m.v. para (500 - 2500)
NO2	Electroquímico	ppb	0 - 2500	±20 para (0 - 500 ppb) ±(3% m.v. + 5) para (500 - 2500 ppb)
CO	Electroquímico	ppm	0 - 1000	±1 para (0 - 100 ppm) ±1% m.v. para (100 - 1000)

En el caso del formaldehído en la ficha técnica se indica que las unidades son ppb, sin embargo, en la web de “My inBiot” se puede modificar las unidades y mostrarlas como se crea conveniente. En el trabajo se expresa la concentración de este en µg/m³, donde se ha aplicado la conversión de 100ppb~125µg/m³ [22].

Para los COV'S no se mide una sustancia concreta, lo que dificulta su análisis e interpretación. Que el nivel de COV'S aumente puede ser peligroso porque existe la posibilidad de que entre los contaminantes que hayan aumentado se encuentren algunos nocivos, pero de momento no es posible si dicho aumento corresponde con COV'S nocivos o, por el contrario, inocuos. El sensor de COV'S puede tener diferente sensibilidad y distinta mezcla de calibrado según el medidor, lo que da lugar a variaciones en las ppb medidas. Esto ha llevado a los fabricantes a plantear la medida relativa (Index Points) que se muestra en la tabla de la figura 4. Los medidores indican diferentes valores pero mismas tendencias, por lo que lo correcto es fijarse en estas últimas y aplicar el principio de precaución si se detecta subida de COV'S, ventilando y diluyendo por tanto estos. La solución a este problema posiblemente llegará cuando se disponga de medidores capaces de detectar los COV'S más nocivos de forma individual (como el benceno o el tolueno), de igual forma que ya se ha conseguido para el formaldehído.

### **Aranet Radón Plus**

El medidor Aranet Radón Plus permite obtener valores de la concentración de radón. Esto hace que sea especialmente útil en viviendas en contacto directo con el terreno (como es el caso de los sótanos), ya que es por donde suele entrar el radón a las viviendas y por tanto se suele encontrar mayor concentración de este

El medidor del que se habla ha sido utilizado en el tercer apartado del trabajo para llevar a cabo un estudio y análisis del radón residencial. El medidor es el mostrado en la figura 13:



Figura 13. Medidor Aranet. Fuente: Aranet

Funciona con batería y su sensor es de ionización. Sus principales características se recogen en la tabla 2:

Tabla 2. Características medidor Aranet. Fuente: elaboración propia

Sensibilidad	1 Bq/m <sup>3</sup>
Precisión	±8%
Rango de medición	0 – 9400 Bq/m <sup>3</sup>

El medidor toma mediciones cada 10 minutos y estas pueden ser visualizadas en la aplicación Aranet Home. En la aplicación se muestra de forma muy visual la evolución de la concentración de radón, lo que facilita la interpretación de las mediciones (siendo el color verde equivalente a una concentración de radón aceptable).

Al consultar la aplicación la gráfica proporcionada por esta se corresponde con la adjunta en la figura 14:

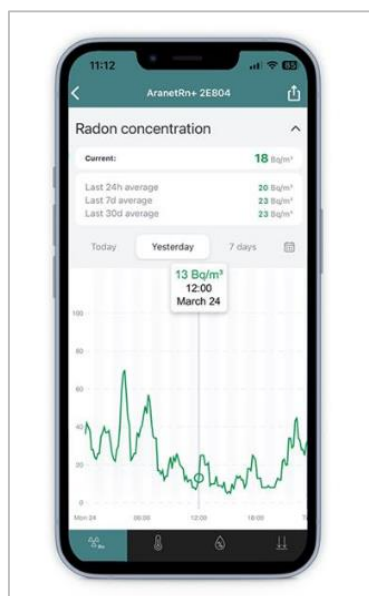


Figura 14. Aplicación Aranet Home. Fuente: Aranet

Además de la concentración de radón el medidor permite conocer la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. Esto permitirá hacer un análisis de las variables medidas y determinar sus relaciones en el apartado 3 del trabajo como se comentaba anteriormente.

Para estos parámetros el medidor presenta las siguientes características (tabla 3):

**Tabla 3. Rango, precisión y sensibilidad para otros parámetros del medidor Aranet. Fuente: elaboración propia**

Parámetro	Rango	Precisión	Sensibilidad
Temperatura	0 - 50 °C	±0.3 °C	0,1 °C
Humedad relativa	0 - 99 %	±3 %	1%
Presión atmosférica	600–1100 hPa	+3 hPa / -2 hPa	1 hPa

La presión atmosférica se corresponde con su valor absoluto y solo es visible a través de la aplicación mencionada.

## 2. Mediciones en continuo en viviendas

Haciendo uso de los medidores MICA y MICA Plus, de inBiot, se han recogido datos de mediciones en continuo en tres viviendas diferentes. La distribución de fechas se muestra en la tabla 4:

Tabla 4. Situación de medidores inBiot según fecha. Fuente: elaboración propia.

	VIVIENDA	FECHA
Caso 1	Casa unifamiliar en Casablanca	31/07/2024 – 19/12/2024
Caso 2	Piso en Valdespartera	21/12/2024 – 18/01/2025
Caso 3	Piso en Zalfonada	07/02/2025 – 29/05/2025

### 2.1 Estudio y análisis de las mediciones en continuo obtenidas

Para realizar este apartado se va a analizar cada parámetro medido de forma conjunta para los tres casos. Aunque se han tomado mediciones tanto con el medidor MICA como con el MICA Plus, para simplificar el análisis se ha optado por mostrar e interpretar los valores facilitados por el MICA Plus.

En el primer subapartado del apartado 2.1 se van a detallar los valores límite admisibles para la salud establecidos para cada parámetro en el caso de estos medidores inBiot.

En los siguientes subapartados se adjuntan tablas con los valores máximos, medios y, para los parámetros que proceden, mínimos de cada variable. Aunque para momentos puntuales se alcancen máximos y mínimos, el valor que más interesa es el medio, ya que es el valor alrededor del cual suele estar la mayor parte del tiempo el parámetro en cuestión. Lo ideal sería que en todas las tablas y para todos los casos los valores medio estuvieran indicados de color verde, lo cual no es así y por tanto, conviene buscar soluciones para conseguir mejorar la CAI de las viviendas.

#### *Umbrales medidores inBiot*

En la tabla 5 se exponen los valores recomendados para cada parámetro en espacios interiores junto con los valores tomados como valores límite admisibles para la salud por inBiot:

Tabla 5. Valores recomendados para cada parámetro y valores límite admisibles para la salud establecidos por inBiot. Fuente: elaboración propia a partir de datos de inBiot.

Parámetro	Valores recomendados	Valores inBiot
Temperatura	Verano 23-25°C Invierno 21-23°C	19 – 27 °C
Humedad	40-60% (45-50% sería el % ideal)	● HR 35 – 60 % ● HR 25 – 35% / 60 – 70% ● HR < 25 % y HR > 70%
CO2	Ambiente cargado: 800-1000 ppm Ambiente altamente cargado: >2000 ppm Inaceptable: >5000 ppm	● < 800 ppm ● 800 – 1500 ppm ● > 1500 ppm
Formaldehído	• No significativo : < 20 µg/m³ • Débilmente significativo : 20 – 50 µg/m³ • Fuertemente significativo : 50 – 100 µg/m³ • Extremadamente significativo : >100 µg/m³	● < 70 µg/m³ ● 70 - 120 µg/m³. ● > 120 µg/m³.
COV'S	En el ámbito residencial no existe una normativa específica sobre la contaminación por COV'S, más allá de recomendaciones o valores de referencia.  Con las mediciones en continuo es posible determinar los niveles de COV con unidades relativas, las cuales pueden convertirse a concentración absoluta mediante factores de conversión.  El sensor inBiot está calibrado para etanol.	● < 204 ppb ● 204 - 621 ppb ● > 621 ppb
Partículas en suspensión	Se recomienda una concentración de PM2.5 <20µg/m³	PM 1.0, PM 2.5 and PM 4.0: ● < 12 µg/m³ ● 12 – 35 µg/m³. ● > 35 µg/m³. PM10: ● < 50 µg/m³ ● 50 – 100 µg/m³. ● > 100 µg/m³.

## Temperatura

Las temperaturas registradas han sido las mostradas en la figura 15 y tabla 6:

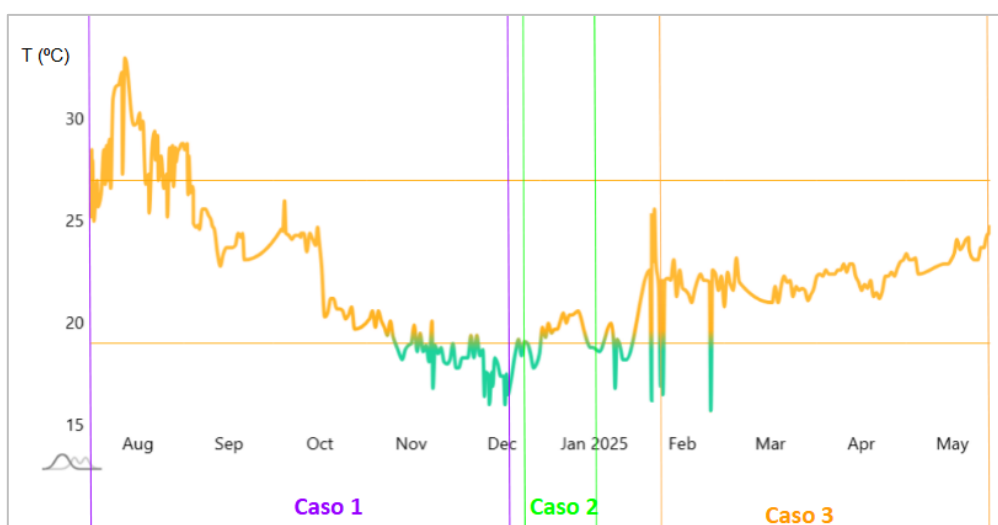


Figura 15. Mediciones en continuo de temperatura

Tabla 6. Valores máximos, medios y mínimos de temperatura para cada caso. Fuente: elaboración propia.

TEMPERATURA (°C)	Valor máximo	Valor medio	Valor mínimo
CASO 1	33	23,8	16
CASO 2	20,8	19,4	17,4
CASO 3	24,4	22,2	15,7

Los valores medios para todos los casos están dentro del intervalo óptimo (19-27°C).

La vivienda del caso 2 posee ventilación mecánica, a diferencia de las demás. En ella se obtiene un perfil de temperaturas más uniforme respecto a las otras. Además, las temperaturas alcanzadas, además de cumplir con el intervalo deseado, no son excesivamente altas, como lo son en el caso 3. En este último caso la temperatura de forma global supera con creces la mínima deseada para una sensación de confort, lo que se traduce en un gasto energético innecesario.

### Humedad

Los valores de humedad medidos se recogen en la figura 16 y tabla 7:

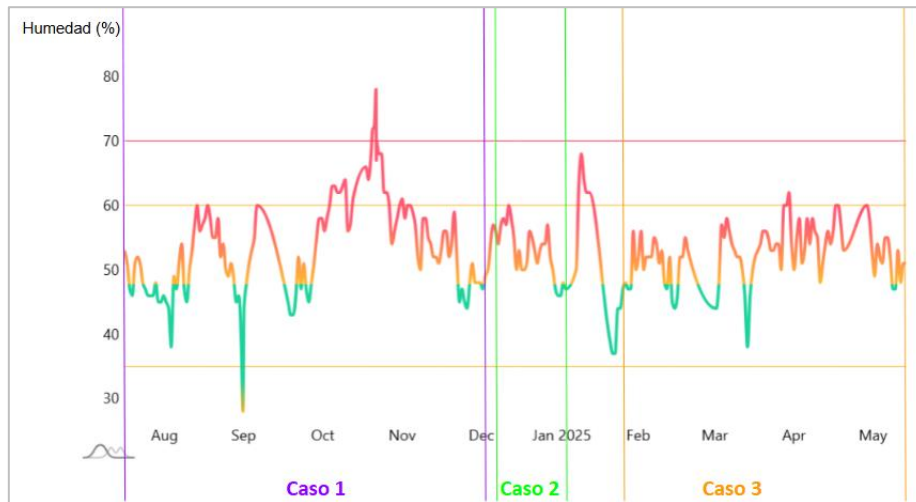


Figura 16. Mediciones en continuo de humedad

Tabla 7. Valores máximos, medios y mínimos de humedad para cada caso. Fuente: elaboración propia.

HUMEDAD (%)	Valor máximo	Valor medio	Valor mínimo
CASO 1	78	53	28
CASO 2	63	54	45
CASO 3	62	52	38

Para la humedad de forma general se permanece dentro del rango de valores óptimos. Los puntos más altos se alcanzan cuando se realizan actividades cotidianas como ducharse, cocinar con la olla o dejar la ropa secándose dentro de casa. No hay valores destacables ni valores demasiado altos o bajos que preocupen por su duración, ya que los máximos y mínimos se corresponden con momentos puntuales.

### CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> no es un contaminante en los valores habitualmente medidos, pero se utiliza como gas trazador, es un indicador del nivel de dilución de los contaminantes gaseosos en aquellos casos en los que la contaminación antropogénica es dominante. Además sirve como indicador de la probabilidad de contagio por virus que se transmiten por el aire. A su vez, también se ha constatado que valores elevados de CO<sub>2</sub> perjudican los procesos cognitivos, provocan adormecimiento y dolores de cabeza.

Las mediciones de  $CO_2$  obtenidas se presentan en la figura 17 y tabla 8:

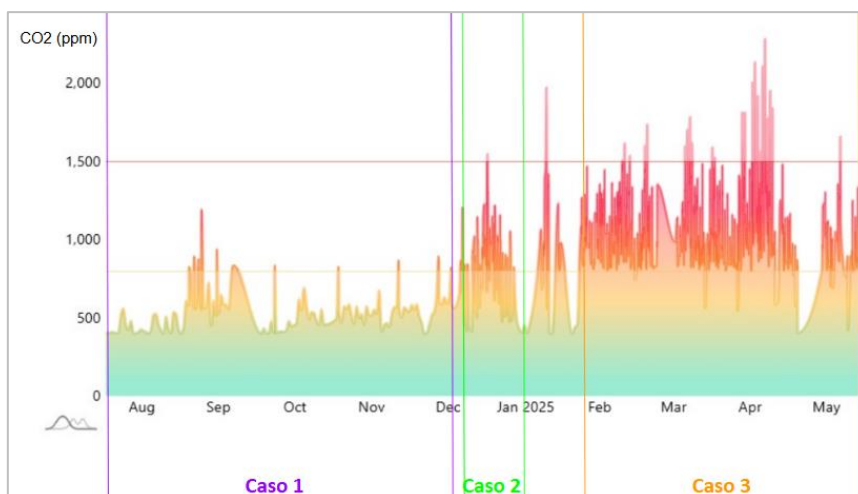


Figura 17. Mediciones en continuo de  $CO_2$

Tabla 8. Valores máximos y medios de  $CO_2$  para cada caso. Fuente: elaboración propia.

CO2 (ppm)	Valor máximo	Valor medio
CASO 1	1192	568
CASO 2	1545	735
CASO 3	2282	1106

Se observa como en el caso 3 se alcanzan valores altos, los cuales superan las 2000 ppm, lo que indica que el ambiente está altamente cargado y pueden aparecer síntomas tales como dolor de cabeza, cansancio o apatía general [1]. Lo más preocupante es que el valor medio de este caso es de 1106 ppm, por lo que de forma habitual el ambiente está cargado y supera el valor máximo aceptable para estancias prolongadas (figura 18).

CONCENTRACIÓN ppm	EFECTO
200.000	mortal en breve tiempo
100.000	mortal después de una inhalación prolongada
85.000	síntomas de paralización
45.000	aire exhalado
35.000	problemas de respiración
20.000	valor tolerado durante periodos cortos
18.000	concentración máxima en un submarino
5.000	concentración máxima permitida
1.500	valor límite de bienestar
1.000	valor máximo para estancias prolongadas
800	valor admitido para estancias prolongadas
700	aire contaminado de ciudad
500...600	condiciones ideales en locales
350	concentración aire exterior (+ 0,5...1 ppm/año)
280	aire exterior antes de industrialización

Figura 18. Efectos según la concentración de  $CO_2$ . Fuente: DTIE 2.02, Atecyr.

En el caso 1 el medidor se dispone en una habitación amplia la cual suele mantener sus puertas abiertas y una buena ventilación. Su ocupación es de 2 personas y, tal como se puede apreciar en la figura 7, en prácticamente la totalidad del periodo medido la concentración de  $CO_2$  permanece en valores aceptables y no peligrosos.

Tanto en el caso 2 como en el caso 3 la ocupación es de 4 personas. Sin embargo, en el caso 2 los valores alcanzados, aunque son altos, no lo son tanto como en el caso 3. Esto es debido a que la ventilación mecánica ayuda a renovar el aire interior y se consigue un valor medio de 735ppm, por debajo de 800 y,

por tanto, admisible para estancia prolongadas. No obstante, no se puede obviar que de forma puntual se superan las 1000ppm, lo que indica que, aunque la ventilación mecánica ayuda, no siempre es garantía de una ventilación adecuada.

En el caso 3 el medidor se sitúa en el salón, donde a partir de media tarde suele haber entre una y tres personas, y permanece con ocupación hasta las 00:00h, acumulándose así el  $CO_2$  debido a la falta de ventilación y dando lugar a esas concentraciones tan elevadas que se observan en la figura 7.

A continuación se muestra en las figuras 19 y 20 el porcentaje de aire inhalado que ya ha sido respirado por otra persona según la concentración de  $CO_2$  presente en el interior:



Figura 19. Límite de  $CO_2$  como indicador indirecto de riesgo de infección. Fuente: Campano, M. Á., Fernández-Agüera, J., Sendra, J. J. (2023). "Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica". Octaedro

$CO_2$ (ppm)	% de aire ya respirado por otra persona
900	1.3%
1000	1.5%
1100	1.8%
1200	2.1%
1300	2.3%
1400	2.6%
1500	2.9%
1600	3.1%
1700	3.4%
1800	3.6%
1900	3.9%
2000	4.2%
2100	4.4%
2200	4.7%
2300	5.0%

Figura 20. Relación  $CO_2$  y % de aire ya respirado por otra persona. Fuente: José Luis Jiménez Palacios.

Relacionando estos valores con los obtenidos en los tres casos, si se focaliza la atención en el caso 3, que es el que posee mayores valores medios y máximos, se puede concluir que con un valor medio como el que se tiene (1106 ppm), un 1,8% del aire respirado por el ocupante ya había sido respirado por otro. Si se habla del valor máximo (2282 ppm) el porcentaje se ve aumentado hasta la cifra de 4,7%, valor excesivamente elevado.

### Formaldehído

Los valores de concentración de formaldehído medidos se representan en la figura 21 y tabla 9:

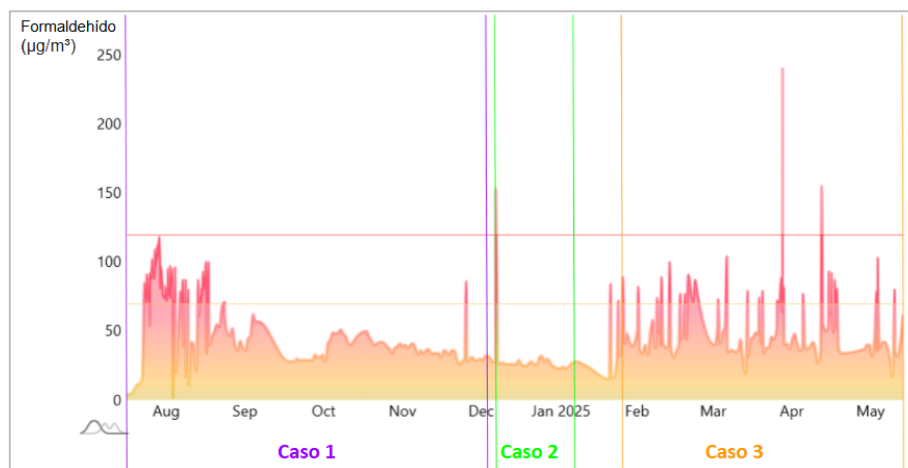


Figura 21. Mediciones en continuo de formaldehído

Tabla 9. Valores máximos y medios de formaldehído para cada caso. Fuente: elaboración propia.

FORMALDEHÍDO (µg/m³)	Valor máximo	Valor medio
CASO 1	118	66
CASO 2	153	27
CASO 3	241	57

Para el caso 2 se observa como la concentración de formaldehído no presenta cambios significativos en el tiempo y se mantiene en un nivel seguro gracias a que la vivienda presenta ventilación mecánica de doble flujo en continuo, con recuperación de calor y filtrado, de forma que el formaldehído que se genera es diluido y no se alcanzan concentraciones mayores.

En cambio, las viviendas del caso 1 y 3 no poseen ventilación mecánica, por lo que cuando el formaldehído es liberado, este perdura más tiempo en el interior y puede alcanzar niveles superiores a los óptimos. Aun así, en todas las viviendas existe un valor medio aceptable. No obstante, es imprescindible identificar las acciones que derivan en las subidas momentáneas para así intentar que estas no ocurran, o por lo menos, no con tanta frecuencia. Es por ello que posteriormente se muestran diversos experimentos realizados, los cuales buscan ver acciones que provoquen cambios en las concentraciones de los contaminantes.

### COV'S

Las mediciones de COV'S obtenidas se presentan en la figura 22:

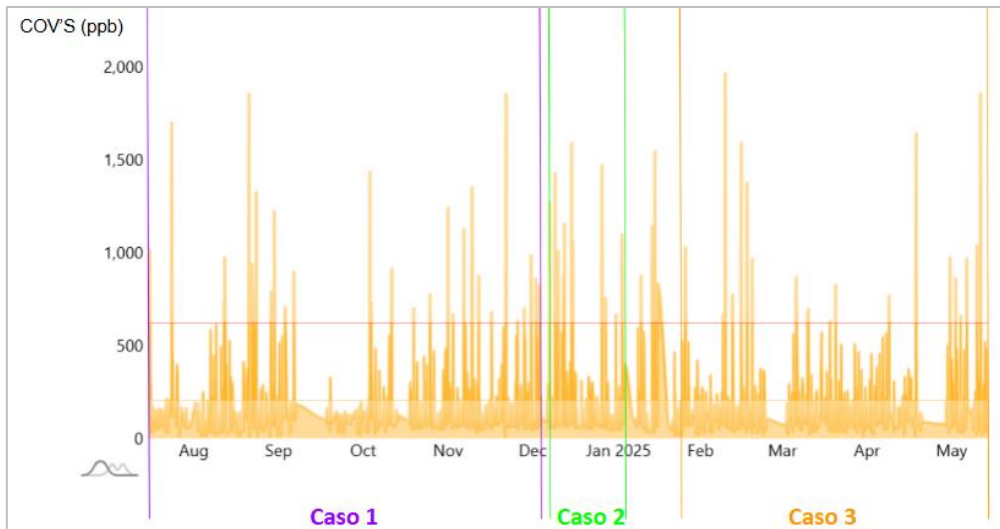


Figura 22. Mediciones en continuo de COV'S

En la figura 22 se observa como los aumentos de la concentración de COV'S se corresponden con picos, momentos puntuales en los que se produce una acción (como utilizar ciertos productos de limpieza, esmalte de uñas, desodorantes en spray, etc.). Una vez la acción cesa, la concentración baja de forma rápida al ventilar.

Los casos 1 y 3 alcanzan valores momentáneos más altos (los cuales disminuyen al ventilar de forma natural), mientras que en caso 2 los valores son ligeramente menores debido a que la ventilación mecánica que ayuda a diluir dichos contaminantes.

### Partículas en suspensión

Los valores de PM2.5 medidos se recogen en la figura 23 y tabla 10:

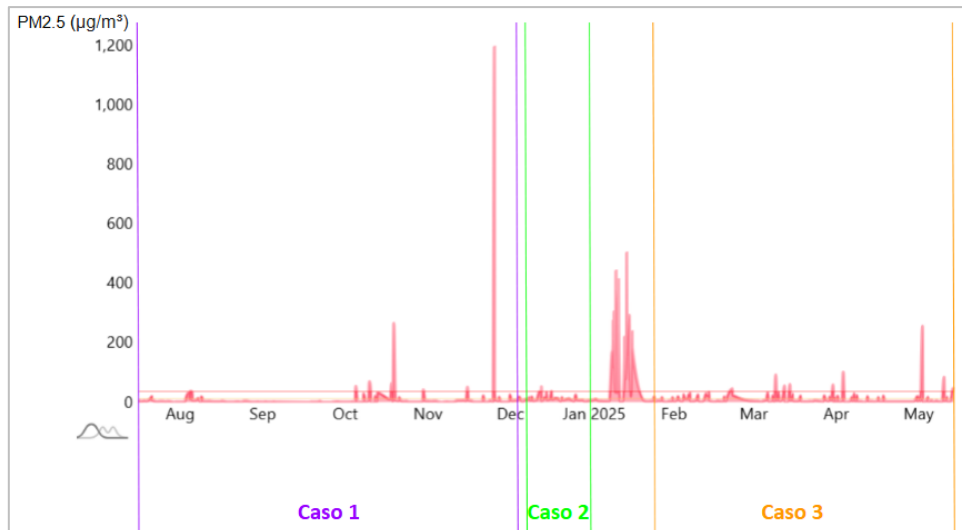


Figura 23. Mediciones en continuo de PM2.5

**Tabla 10. Valores máximos y medios de PM2.5 para cada caso. Fuente: elaboración propia.**

PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valor máximo	Valor medio
CASO 1	1194	17
CASO 2	52	6
CASO 3	255	14

Se aprecia como la ventilación mecánica (caso 2), gracias a los filtros que retienen partículas como polvo y polen, es una muy buena herramienta para controlar los niveles de partículas en suspensión en las viviendas.

Cada vez que se abren ventanas o puertas para ventilar naturalmente entran partículas del exterior, por lo que es necesario llegar a un compromiso entre el nivel de partículas y el de otros contaminantes para lograr una dilución de estos últimos sin aumentar excesivamente los primeros.

Para las PM1.0 y las PM10 siguen la misma tendencia y sus valores máximos y medios se recogen en las tablas 11 y 12:

**Tabla 11. Valores máximos y medios de PM1.0 para cada caso. Fuente: elaboración propia.**

PM1.0 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valor máximo	Valor medio
CASO 1	1105	16
CASO 2	48	6
CASO 3	242	13

**Tabla 12. Valores máximos y medios de PM10 para cada caso. Fuente: elaboración propia.**

PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valor máximo	Valor medio
CASO 1	1237	16
CASO 2	53	6
CASO 3	256	11

Las PM1.0 son especialmente peligrosas debido a su pequeño tamaño, el cual les permite penetrar más profundo en el organismo y los efectos sobre la salud pueden ser más graves por tanto.

## **2.2 Experimentos para ver el comportamiento de los diferentes contaminantes ante acciones de los ocupantes**

Haciendo uso de los medidores de inBiot se han realizado diversos experimentos para ver cómo se comportan los diferentes contaminantes ante acciones realizadas por los ocupantes de las viviendas. Estas acciones son actividades cotidianas que se dan de forma habitual y muchas veces sin tener conciencia del peligro que estas pueden suponer.

### ***Uso de humidificadores de ultrasonidos. Importancia de hacer uso de un agua adecuada.***

Se han realizado tres experimentos para comprobar el efecto de utilizar un tipo de agua u otro para rellenar un humidificador ultrasónico.

El humidificador de ultrasonidos utilizado es el mostrado a continuación en la figura 24:



Figura 24. Humidificador "Pure Aroma 150 Yin". Fuente: Cecotec

En primer lugar, se rellena el humidificador con agua del grifo, con lo que se obtiene el aumento de PM2.5 mostrado en la figura 25:

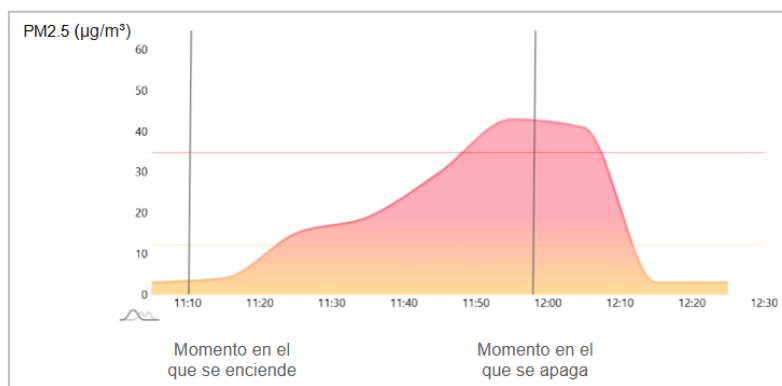


Figura 25. Aumento en la concentración de PM2.5 al usar agua del grifo en un humidificador ultrasónico.

Se contempla claramente como se produce un aumento significativo en la concentración de PM2.5. Esto se debe a que en el agua del grifo se encuentran elementos tales como calcio, magnesio, sodio y cloruro, así como pequeñas cantidades de fluoruro, nitrato, fosfato, sulfato, aluminio, cobre y hierro [20], y mediante el uso de humidificadores ultrasónicos alrededor del 85-90% de los metales y minerales presentes en el agua del grifo se emiten al aire interior [21].

Los resultados y conclusiones son los mismos para cualquier otro tamaño de partículas en suspensión.

Sin embargo, si se emplea agua destilada se obtiene el perfil de concentraciones mostrado en la figura 26:

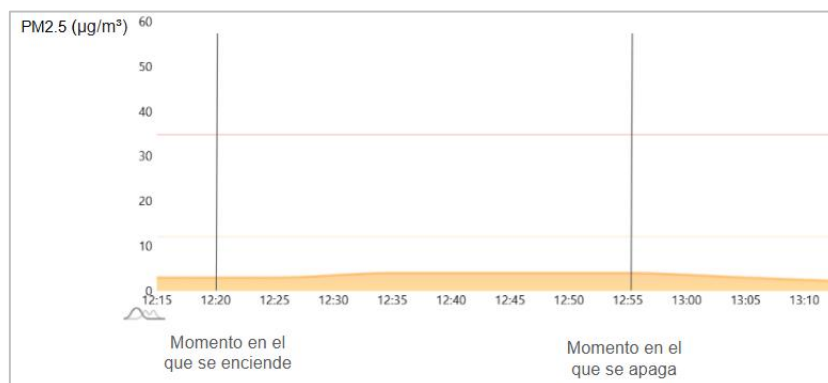
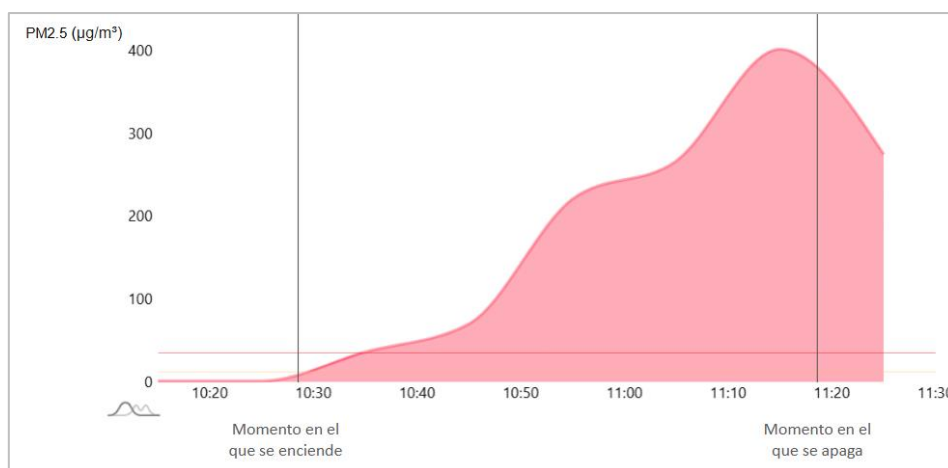


Figura 26. Evolución de la concentración de PM2.5 al usar agua destilada en un humidificador ultrasónico.

Se contempla como al utilizar agua destilada, la cual carece de iones y minerales, las partículas en suspensión emitidas son prácticamente despreciables.

Por último, se rellena el humidificador con agua de subsuelo facilitada por el personal de mantenimiento. El agua ha sido tomada del freático en el edificio Betancourt y contiene más minerales que la del grifo, por lo que el aumento de concentración de PM2.5 (figura 27) es aún mayor que la obtenida en el primer experimento:



**Figura 27. Evolución de la concentración de PM2.5 al usar agua del subsuelo en un humidificador ultrasónico.**

El hecho de que la diferencia de aumento de las partículas sea tan significativa indica que la explicación dada anteriormente de porqué el agua del grifo provocaba emisiones de partículas es correcta. Cuantos más minerales y elementos haya en el agua empleada para rellenar el humidificador, mayor será la cantidad de partículas en suspensión emitidas.

Los humidificadores ultrasónicos constituyeron el 34,5% del mercado mundial de humidificadores en 2016. Sin embargo, aún con este alto porcentaje de consumo, no hay información clara sobre el tipo de agua adecuada para rellenarlos. Los fabricantes de humidificadores recomiendan directamente el uso de agua del grifo, o simplemente recomiendan agua, y por lo tanto, es probable que los consumidores utilicen agua del grifo en lugar de agua destilada [20].

Debido a esta desinformación, cuando se utiliza agua del grifo con minerales el aumento de materia particulada en el aire interior puede superar los estándares de PM2.5 y PM10 del aire ambiente [21].

Al inhalarse durante un periodo de exposición de 8 horas, y dependiendo de la calidad del agua mineral, los aerosoles de los humidificadores pueden depositar hasta 100 µg de minerales en el tracto respiratorio de niños y entre 3 y 4,5 veces más en el de adultos [21].

Las PM2.5 están asociadas a las enfermedades pulmonares, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, las enfermedades cardiopulmonares e incluso el cáncer de pulmón. Además, tanto la exposición a corto plazo como a largo plazo, están relacionadas con una mayor mortalidad. Las PM2.5 residenciales y comerciales contribuyeron a la mortalidad de 675 mil muertes de un total de 2,23 millones de muertes relacionadas con las PM2.5 antropogénicas a nivel mundial [20].

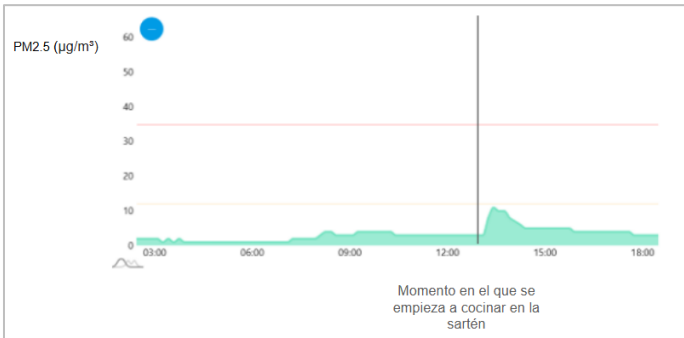
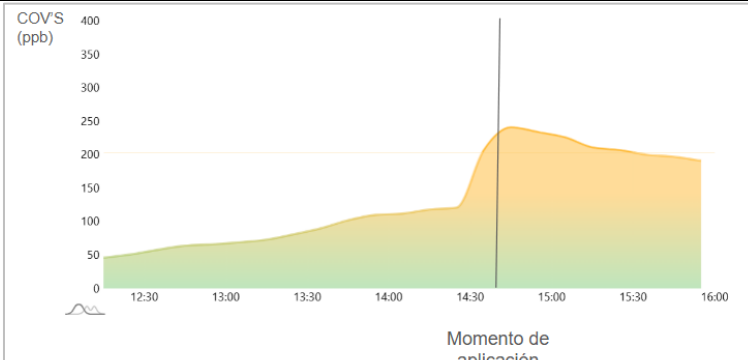
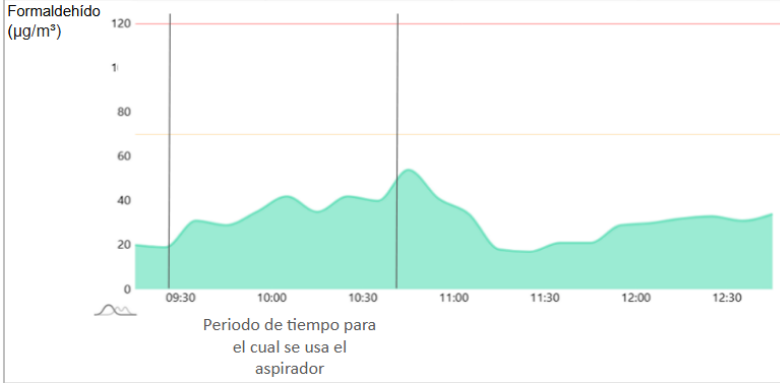
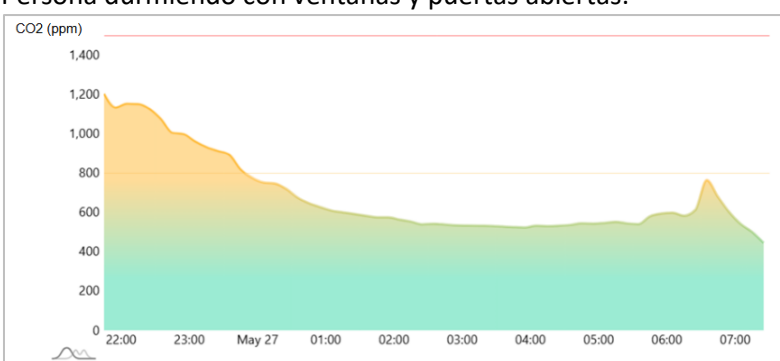
Por todo lo mencionado, es necesario crear conciencia entre la población del peligro al que se pueden estar exponiendo al usar humidificadores de este tipo, especialmente si por sencillez y facilidad se utiliza el agua del grifo.

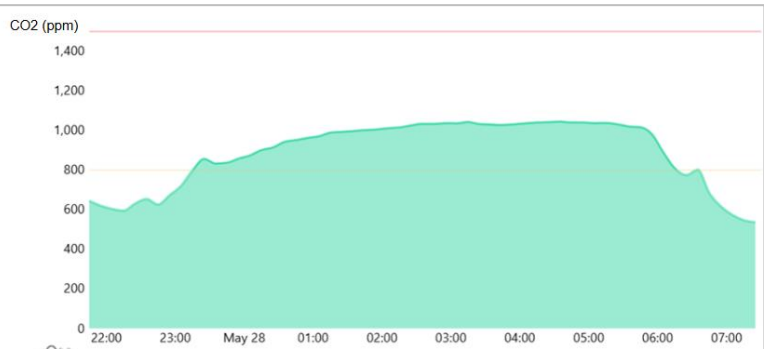

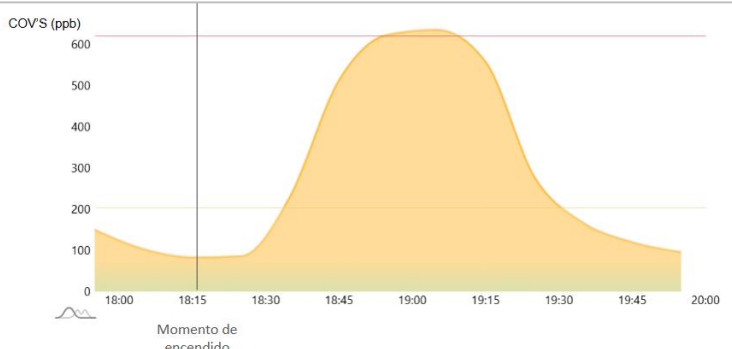
**Experimentos restantes**

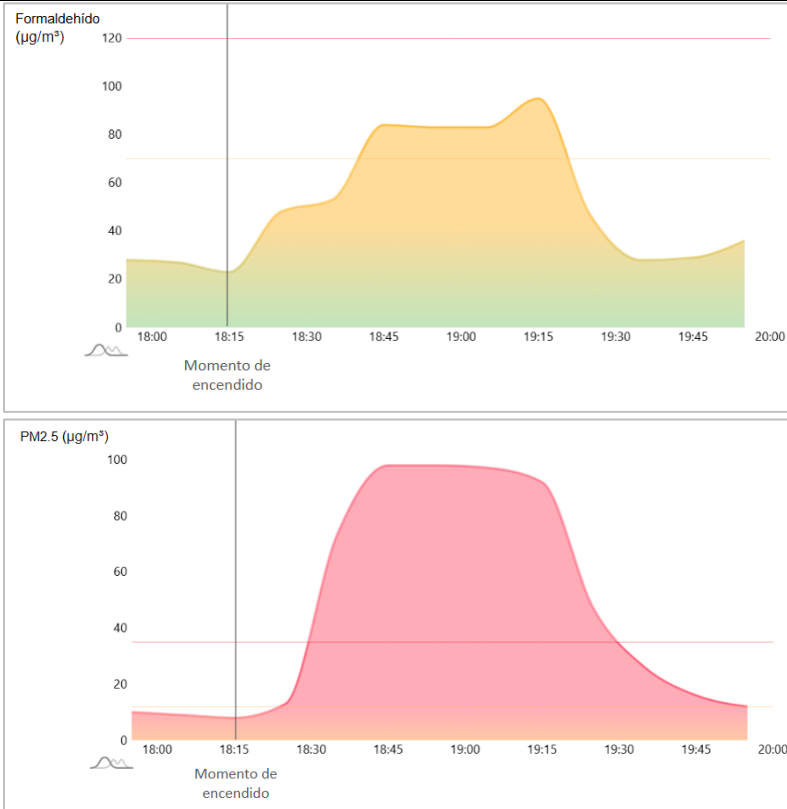
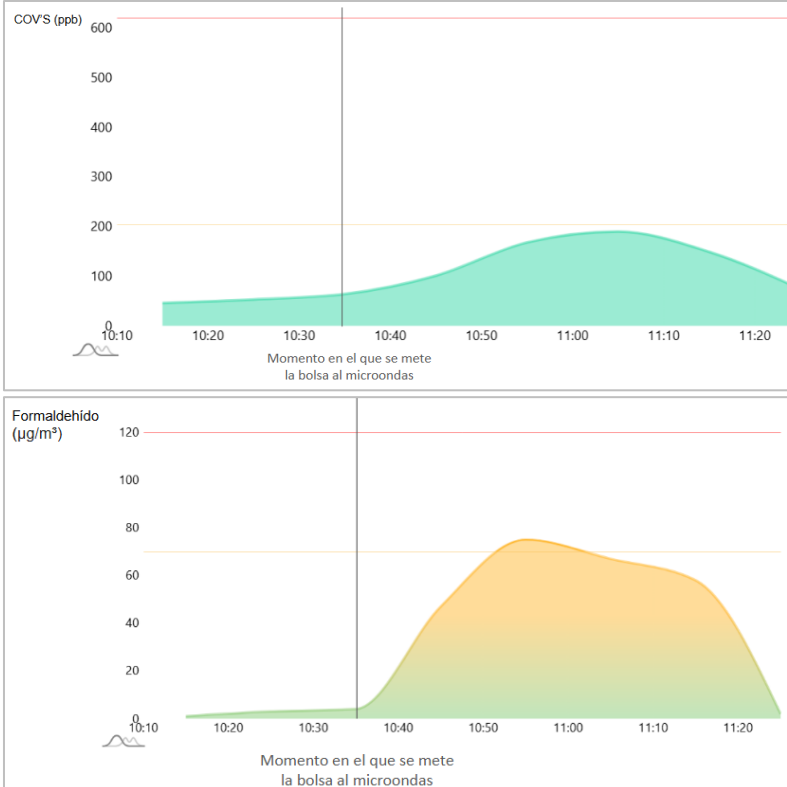
A continuación se muestra en la tabla 13 se recogen todos los experimentos realizados. Estos están explicados e interpretados de forma más amplia en el Anexo 1.

**Tabla 13. Gráficas y conclusiones de cada experimento. Fuente: elaboración propia**

Experimento	Gráficas	Conclusiones
<p>Aplicación de desodorante en spray</p>	<p>COV'S(ppb)</p> <p>Formaldehído (µg/m³)</p> <p>PM2.5 (µg/m³)</p> <p>Momento en el que se aplica el desodorante</p>	<p>Hacer uso de desodorantes en spray eleva la concentración de COV'S y formaldehído (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=58\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), además de aumentar la materia particulada (<math>\Delta\text{PM}_{2.5}=79\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>
<p>Importancia de hacer uso de la campana extractora</p>	<p>Sin hacer uso de la campana extractora:</p> <p>PM2.5 (µg/m³)</p> <p>Momento en el que se empieza a cocinar en la sartén</p>	<p>Aunque al cocinar con campana extractora se produce un ligero aumento de partículas en suspensión, el aumento es muy superior si no se hace uso de ella (si no se utiliza <math>\Delta\text{PM}_{2.5}=99\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>

	<p>Haciendo uso de la campana extractora:</p> 	
<p>Aplicación de esmalte de uñas</p>		<p>Los esmaltes de uñas contienen compuestos químicos volátiles que se evaporan a temperatura ambiente, dando lugar así a un aumento en la concentración de COV'S</p>
<p>Efecto de pasar el aspirador</p>		<p>El hecho de que al pasar el aspirador se observe un aumento de concentración, hace pensar que quizás el aspirador genera un efecto de disminución de presión (succión) que provoca este aumento de concentración de formaldehído (hipótesis) (<math>\Delta CH_2O=54\mu g/m^3</math>)</p>
<p>Ocupación: efecto de una persona durmiendo en el salón (caso 3)</p>	<p>Persona durmiendo con ventanas y puertas abiertas:</p> 	<p>Durante las horas de sueño si no se mantienen las ventanas abiertas (si el tiempo lo permite, como es el caso de verano) y las puertas que comunican con otras estancias de la vivienda abiertas, los niveles de <math>CO_2</math> se elevan aproximadamente unas 500 ppm por cada persona presente en la habitación, alcanzando niveles no óptimos.</p>

	<p>Persona durmiendo con ventanas y puertas cerradas:</p> 	
<p>Rociado de un ambientador en spray con fragancia floral</p>		<p>Aumenta la concentración de COV'S y debido a la interacción de algunos de estos (terpenos concretamente) con el ozono aumenta también el formaldehído (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=24\mu\text{g}/\text{m}^3</math>). A esto se le suma la emisión de partículas por ser un spray (<math>\Delta\text{PM}_{2.5}=32\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>
<p>Efecto de encender incienso</p>		<p>Se liberan COV'S y como subproducto de la combustión incompleta se obtiene formaldehído (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=72\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), junto con partículas en suspensión debidas a dicha combustión (<math>\Delta\text{PM}_{2.5}=90\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>

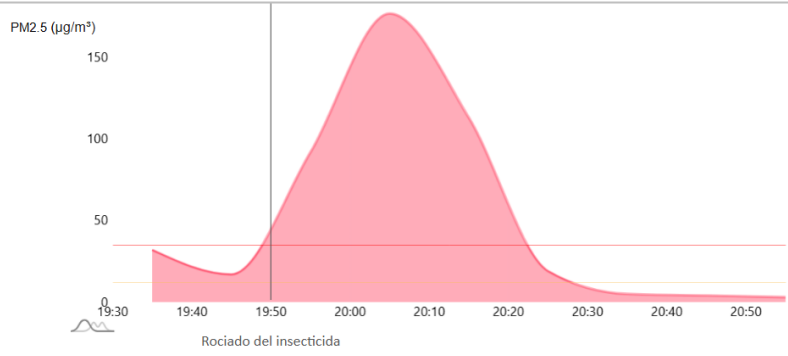
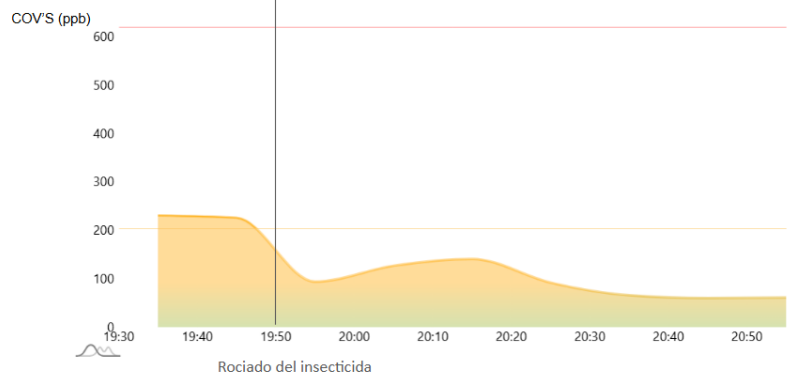
	 <p>Formaldehído (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p> <p>PM2.5 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p> <p>Momento de encendido</p>	
<p>Bolsa de palomitas para el microondas</p>	 <p>COV'S (ppb)</p> <p>Formaldehído (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p> <p>Momento en el que se mete la bolsa al microondas</p>	<p>Se emiten COV'S y gran cantidad de formaldehído debido a las grasas y los aceites que componen este tipo de palomitas (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=71\mu\text{g}/\text{m}^3</math>). Además el humo y las pequeñas gotas de grasa que quedan en el aire suponen un aumento también de partículas en suspensión (<math>\Delta\text{PM}_{2.5}=24\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>

	<p>PM2.5 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p> <p>Momento en el que se mete la bolsa al microondas</p>	
<p>Uso de rotuladores</p>	<p><b>Rotulador metálico:</b></p> <p>COV'S (ppb)</p> <p>Tiempo usando el rotulador</p>	<p>El uso de rotuladores provoca un aumento de COV'S y formaldehído por su composición (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=46\mu\text{g}/\text{m}^3</math>). Este aumento es especialmente alto en el caso de los rotuladores Velleda (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=62\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>
	<p>Formaldehído (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p> <p>Tiempo usando el rotulador</p>	
	<p><b>Rotulador Velleda:</b></p> <p>COV'S (ppb)</p> <p>Tiempo usando el rotulador</p>	

	<p>Formaldehído (µg/m<sup>3</sup>)</p> <p>120 100 80 60 40 20 0</p> <p>16:00 16:10 16:20 16:30 16:40 16:50 17:00 17:10</p> <p>Tiempo usando el rotulador</p>	
Encendido de velas aromáticas	<p>COV'S (ppb)</p> <p>600 500 400 300 200 100 0</p> <p>11:30 11:40 11:50 12:00 12:10 12:20 12:30 12:40 12:50 13:00</p> <p>Momento de encendido Momento de apagado</p>	<p>Inicialmente emiten formaldehído (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=14\mu\text{g}/\text{m}^3</math>) y COV'S, pero tras un rato encendidas la concentración del primero decae y de los segundos continúa aumentando. Al soplar para apagarlas aumentan las partículas en suspensión (<math>\Delta\text{PM}_{2.5}=54\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>
	<p>Formaldehído (µg/m<sup>3</sup>)</p> <p>120 100 80 60 40 20 0</p> <p>11:30 11:40 11:50 12:00 12:10 12:20 12:30 12:40 12:50 13:00</p> <p>Momento de encendido Momento de apagado</p>	
	<p>PM2.5 (µg/m<sup>3</sup>)</p> <p>60 50 40 30 20 10 0</p> <p>11:30 11:40 11:50 12:00 12:10 12:20 12:30 12:40 12:50 13:00</p> <p>Momento de encendido Momento de apagado</p>	

<p>Varitas difusoras de aroma</p>	<p>Momento en el que se destapa bote, se introducen las varitas y se deja en la sala</p>	<p>Aunque parecen inofensivas, emiten mayor cantidad de COV'S y formaldehído que los ambientadores en spray (tomando como referencia un bote recién abierto y un spray recién rociado) (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=61\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>
<p>Aceite esencial con olor a pino (en humidificador con agua destilada)</p>	<p>Momento de encendido</p> <p>Momento de apagado</p>	<p>Aumenta la concentración de COV'S y, debido a que los terpenos son muy reactivos con ozono, el formaldehído también aumenta (<math>\Delta\text{CH}_2\text{O}=35\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</p>

Rociado de insecticida



Se emiten COV'S pero no formaldehído debido a los componentes del insecticida. Además aumenta la materia particulada ( $\Delta PM_{2.5} = 160 \mu g/m^3$ )

### 3. Presencia de radón en las viviendas

Haciendo uso del medidor Aranet (el cuál ha sido analizado en el primer apartado del trabajo) se han recogido medidas de la concentración de radón presente en sótanos de tres viviendas. Asimismo se han tomado medidas de la concentración existente en diferentes plantas de una de las viviendas. Los valores obtenidos para cada periodo se muestran en la figura 28:

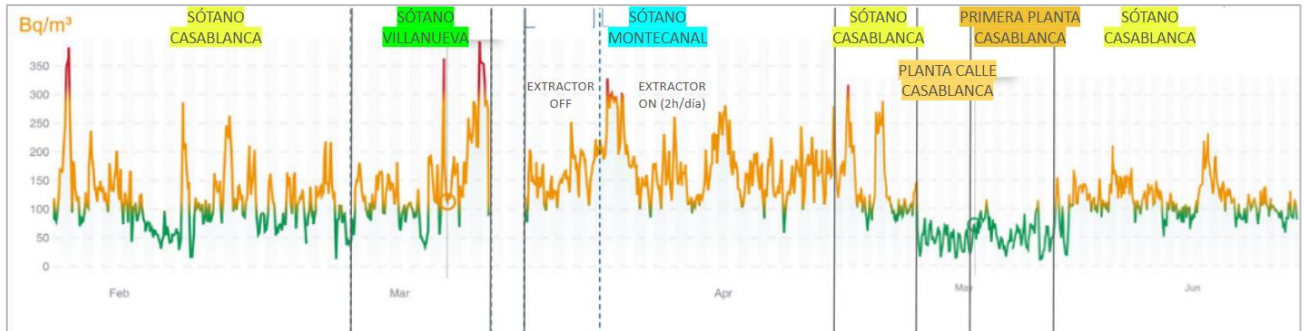


Figura 28. Valores obtenidos para la concentración de radón. Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por la aplicación Aranet Home.

#### 3.1 Mediciones tomadas en diferentes viviendas

Los valores medidos para diferentes sótanos se corresponden con la parte inicial de la gráfica mostrada en la figura 28 (sótano Casablanca, sótano Villanueva y sótano Montecanal).

Para tratar los datos se plantean tres posibilidades a la hora de recoger los datos proporcionados:

- Tomar los valores tomados a lo largo de todo el día, 6 valores por hora, 24 horas al día (144 datos por cada día)
- Tomar los valores promedio tomados cada hora cada día (media de los 6 valores nombrados anteriormente, 24 valores al día)
- Tomar los valores promedio tomados cada día (un valor por cada día)

Estas tres opciones se muestran para el caso de estudio de la relación de la concentración de radón y la presión atmosférica en las figuras 29, 30 Y 31:

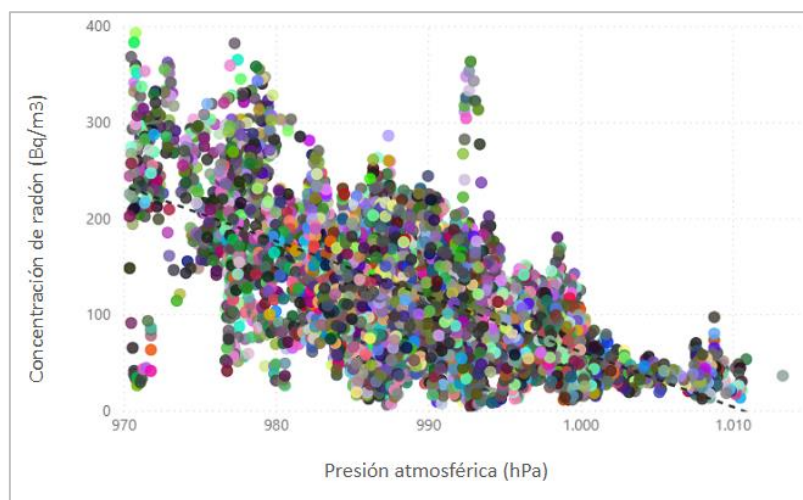
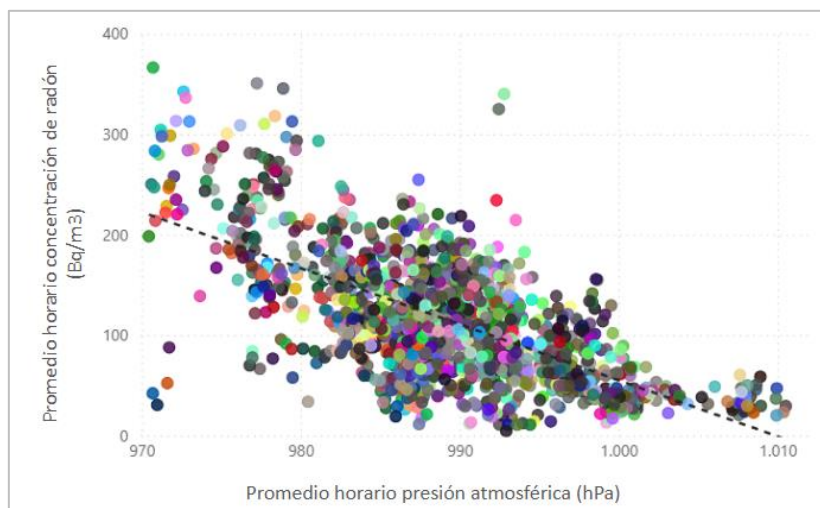
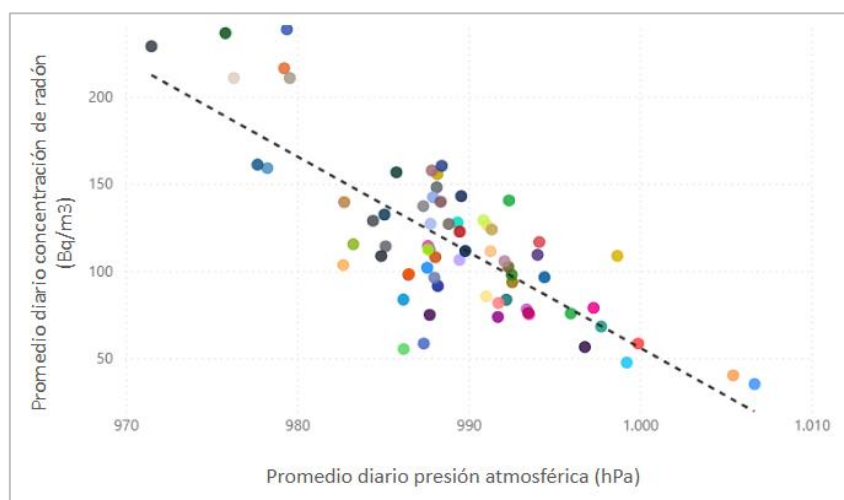


Figura 29. Concentración de radón frente a presión atmosférica, para valores tomados cada 10 minutos. Fuente: Power Bi Miguel García Monge.



**Figura 30. Concentración de radón frente a presión atmosférica, para valores promedio cada hora. Fuente: Power Bi Miguel García Monge**



**Figura 31. Concentración de radón frente a presión atmosférica, para valores promedio diarios. Fuente: Power Bi Miguel García Monge.**

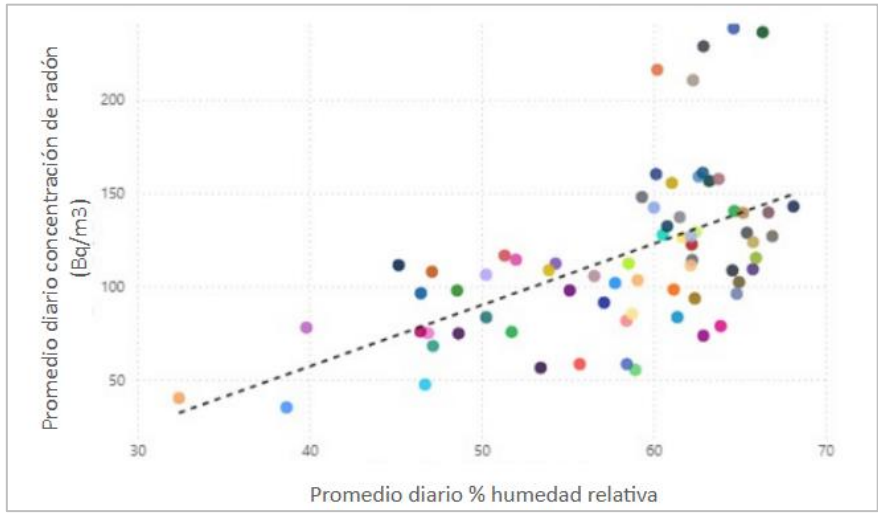
Se considera como mejor opción trabajar con promedios diarios debido a que, aunque la concentración del radón cambia con el tiempo, no lo hace tan rápido como para tener diferencias significativas cada 10 minutos, y a no ser que se produzca una acción que contribuya a un aumento de radón de forma momentánea (con duración de unas horas), se considera buena opción tomar promedios diarios para facilitar el tratamiento de datos. Al trabajar con promedios se consigue suavizar la gráfica ya que las variaciones puntuales se ven reducidas, y por tanto se reduce el riesgo de cometer errores experimentales.

Una vez decidida la opción óptima, se procede a analizar las mediciones realizadas.

El medidor proporciona medidas no sólo de la concentración de radón de la vivienda, sino también de la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica. Se procede a analizar la relación que existe entre las variables nombradas anteriormente.

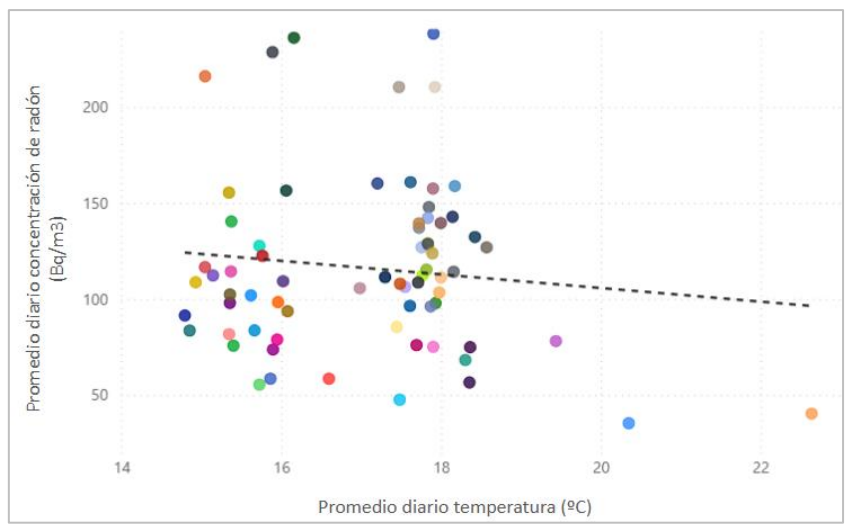
En primer lugar se estudia el comportamiento del radón frente a la presión atmosférica, cuya relación se ha mostrado anteriormente para la elección de la toma de valores en la figura 31.

Se observa que la concentración de radón medida es inversamente proporcional a la presión atmosférica. De igual manera, al haber menor presión, el porcentaje de humedad relativa es mayor, y por tanto se obtiene una mayor concentración de radón, como se indicaba anteriormente. Es decir, la humedad relativa es inversamente proporcional a la presión atmosférica y directamente proporcional a la concentración de radón medida, tal como se muestra en la figura 32:



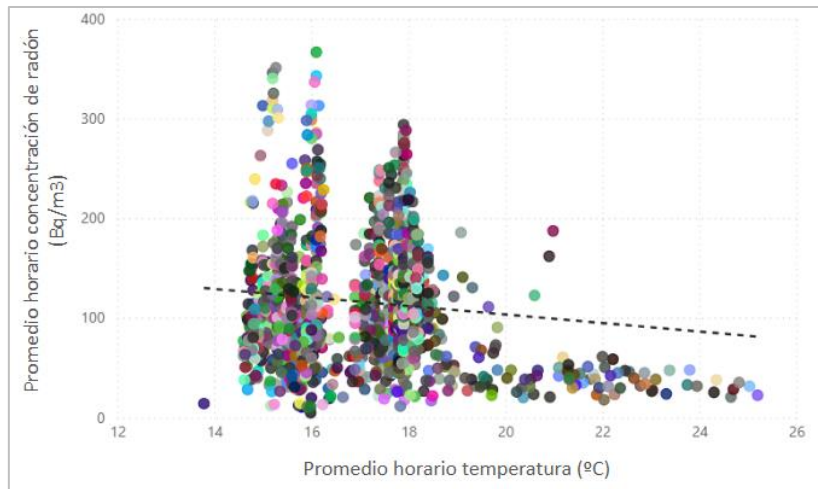
**Figura 32. Concentración de radón frente a humedad relativa, para valores promedio diarios. Fuente: Power Bi Miguel García Monge.**

Por otro lado, para la temperatura se obtiene el siguiente perfil de concentraciones mostrado en la figura 33:



**Figura 33. Concentración de radón frente temperatura, para valores promedio diarios. Fuente: Power Bi Miguel García Monge.**

Aunque se ha determinado que la opción óptima para tratar los datos es tomar promedios diarios, se representan los promedios de cada hora para obtener una gráfica más visual, la cual se muestra en la figura 34:



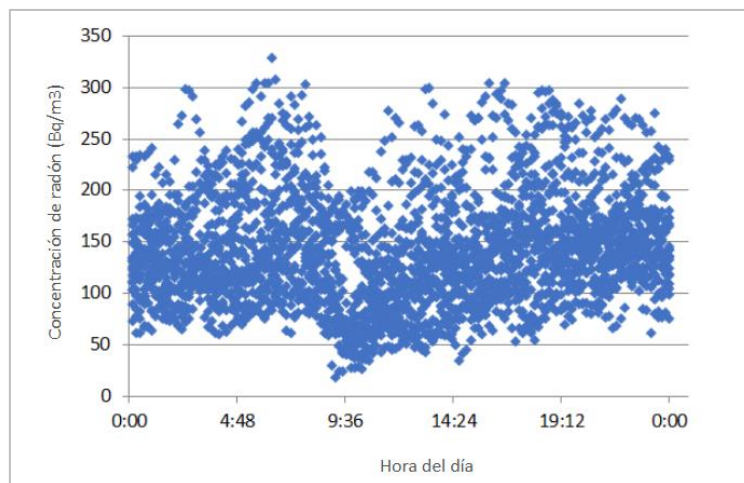
**Figura 34. Concentración de radón frente temperatura, para valores promedio cada hora. Fuente: Power Bi Miguel García Monge.**

Se observa una tendencia según la cual a menor temperatura se obtienen mayores concentraciones de radón. Se concluye que la concentración de radón es inversamente proporcional a la temperatura.

Por todo lo mencionado anteriormente, se determina que los valores más elevados de concentración de radón tienen lugar en días lluviosos (donde hay una baja presión atmosférica y una alta humedad relativa) y fríos.

#### ***Dependencia de la concentración de radón con las horas del día y con el uso del extractor***

Como se comentaba anteriormente, durante un periodo de tiempo se dejó apagado el extractor de la vivienda de Montecalán todo el día excepto 2 horas diarias (de las 22h a las 24h). En la figura 35 se muestra la distribución de la concentración según las horas del día y el estado de encendido del extractor:



**Figura 35. Concentración de radón a lo largo del día, influencia del uso del extractor. Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por la aplicación Aranet Home.**

No se ha detectado relación alguna con el uso del extractor (figura 36). Se han planteado dos posibles hipótesis al respecto:

- El radón posee una densidad de 9,73 kg/m<sup>3</sup>, mucho mayor que la del aire (1,293 kg/m<sup>3</sup>) [5], por lo que tiende a acumularse en las zonas más bajas, en este caso, en el suelo del sótano. Esto significa que para que el nivel de concentración de radón disminuya, el aire extraído

debería ser de esa zona, lo cual no sucede si el extractor se encuentra situado en la zona superior del sótano.

- El radón se puede mover por presiones relativas además de por corrientes. Al estar extrayendo aire del sótano se crea una presión negativa dentro de él, la cual deriva en una mayor entrada de radón. De esta forma se explica el porqué en el balance global no se nota apenas diferencia, ya que si bien es cierto que el extractor consigue extraer parte del radón presente, el funcionamiento de este conlleva una mayor entrada del gas y por tanto, globalmente no se aprecia la diferencia.



Figura 36. Extractor sótano Montecanal

Asimismo tampoco se ha detectado dependencia entre la hora del día y las concentraciones de radón.

### **Mapas de radón en España**

Haciendo uso de los mapas de radón de España se puede encontrar información sobre los valores máximos esperados según la zona. Para el caso de estudio, según estos mapas en Aragón el valor máximo esperado para la concentración de radón es de entre 101 y 200 Bq/m<sup>3</sup> en el 90% de las viviendas, pudiendo ser superior en el 10% restante. Es lo que se denomina P90, es decir, percentil 90. Así se muestra en la figura 37:

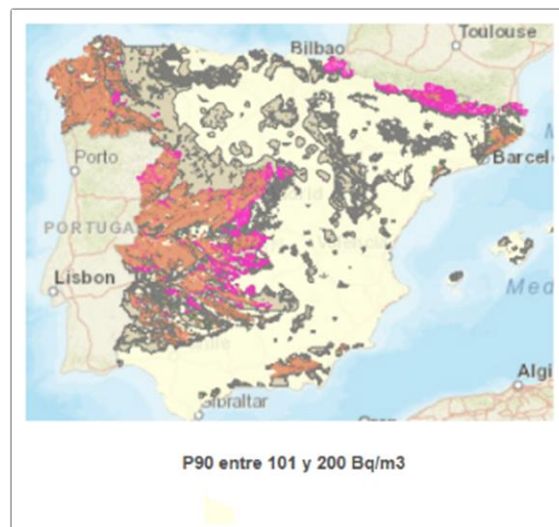


Figura 37. Mapa del Potencial de Radón de España. Fuente: CSN

Si se organizan los datos recogidos en las tres viviendas por meses (figura 38), se ve que los porcentajes según el rango de concentraciones se corresponden con lo indicado en los mapas:

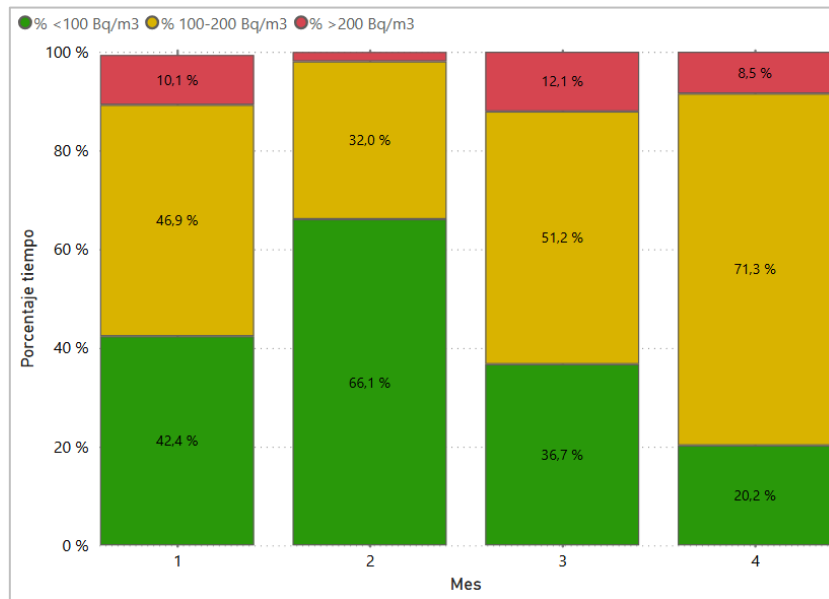


Figura 38. Rango de concentraciones medido en las viviendas. Fuente: Power Bi Miguel García Monge.

Por tanto, se concluye que las tres viviendas analizadas están dentro del 90% comentado anteriormente.

### 3.2 Comparación de las mediciones tomadas en primavera e invierno

En la figura 28 se pueden observar los valores obtenidos para la concentración de radón en invierno y en primavera para el sótano del caso 1 (sótano Casablanca). Se corresponden con los extremos de la gráfica.

Se aprecia como claramente al aumentar la temperatura exterior los valores de radón medidos para el último periodo (del 15 de mayo a 16 de junio) son muy inferiores a los obtenidos anteriormente. Es importante hacer mención de que, aunque los valores son bajos en comparación con los obtenidos los dos periodos anteriores (en enero-febrero y abril), en gran parte del tiempo se superan los 100 Bq/m3 (color amarillo), por lo que la concentración de radón en el sótano de la vivienda se sigue considerando peligrosa aun siendo buenas las condiciones exteriores (en el sentido de que no favorecen la presencia de radón).

Las mediciones tomadas a partir del 16 de junio se muestran en la figura 39:



Figura 39. Radón medido en el sótano de la vivienda de Casablanca durante el verano

Se observa como al aumentar la temperatura exterior y tener presiones más altas los valores se vuelven más admisibles y apenas hay zonas amarillas (exceptuando los periodos marcados en rojo, donde la ausencia de ventilación deriva en los altos niveles de radón alcanzados), lo que es equivalente a decir que no se superan los 100 Bq/m<sup>3</sup> de forma general y, aunque no hay una concentración de radón que se pueda considerar como no peligrosa, al menos el nivel de radón es más seguro que en invierno.

### 3.3 Comparación de mediciones tomadas en distintos pisos de la vivienda

Para la vivienda de estudio en el caso 1 se tomaron mediciones de la concentración de radón presente en diferentes pisos de la misma. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 28 (sótano Casablanca, planta calle Casablanca y primera planta Casablanca).

En la gráfica se puede ver como claramente los valores de radón obtenidos para la planta calle y en la primera planta son menores y más estables (con menos oscilaciones). La concentración se muestra casi en su totalidad de color verde, por lo que no se está ante una concentración que pudiese ser considerada potencialmente peligrosa.

Por otro lado, en el sótano se obtienen valores mucho más altos y oscilantes, mostrando la concentración la mayoría del tiempo de color amarillo e incluso alcanzando cifras mayores de 300 Bq/m<sup>3</sup>, lo que da lugar al color rojo de la gráfica. Aunque si bien es cierto que en el sótano la concentración de radón siempre va a ser superior que en plantas más altas (al estar en contacto más directo con el suelo sobre el que se ha construido la casa), las concentraciones medidas en el sótano no se esperaba que tuvieran valores tan altos ni que estos estuvieran presentes de forma general en periodos tan largos de tiempo.

### 3.4 ¿Cómo mitigar el radón residencial?

El radón está presente principalmente en las zonas bajas de las viviendas, las cuales están en contacto directo con el suelo.

Según Cluster IAQ (“Healthy Buildings: IAQ observatory, eficiencia energética y radón”), lo ideal es tomar acción desde la fase de proyecto de las viviendas, para así poder construir salud desde el plano. La primera línea de defensa se construye antes de que el radón entre en el edificio. Algunas estrategias pueden ser:

- Estrategia de aislamiento: mediante barreras de protección. De esta forma se evita la entrada de radón en el interior de la vivienda mediante la mejora de la estanqueidad de la envolvente en contacto con el terreno.
- Estrategia de ventilación de un espacio de contención: consiste en favorecer la expulsión de aire con alta concentración de radón de la cámara (espacio situado entre el terreno y la vivienda) y que no tienda a penetrar en la vivienda.
- Estrategia de ventilación mediante la despresurización del terreno: se basa en producir una depresión del terreno donde se vaya a situar la vivienda mediante la utilización de un extractor mecánico, de forma que se favorezca que el radón sea expulsado al exterior.

Una combinación de diseño inteligente y ventilación mecánica puede evitar problemas antes de que aparezcan.

Por otro lado, para los numerosos casos de viviendas ya construidas, una vez que el radón ya ha entrado a la vivienda la única opción es aplicar estrategias de ventilación para intentar conseguir su dilución aumentando la renovación del aire interior.

## 4. Estudio de posibles subproductos generados con purificador de aire de iones

Se trabaja con un purificador de iones, el cual se corresponde con el mostrado en la figura 40:



Figura 40. HAVERLAND AIRPURE19 PURIFICADOR. Fuente: Haverland

Toda la información relacionada con el purificador que se menciona ha sido extraída de la web del fabricante.

Se trata de un sistema de purificación de aire que, según indica el fabricante, crea iones negativos que son liberados al aire donde atraen a las partículas con carga positiva, como son el polvo, bacterias, polen y otros muchos alérgenos y sustancias. Al unirse con los iones, las partículas se hacen demasiado pesadas para mantenerse en suspensión y van cayendo al suelo.

El fabricante indica que cuenta con 4 niveles de filtración de 3 tipos de filtro diferentes (figura 41): el pre-filtro que elimina las partículas de mayor diámetro, el filtro de desodorización con carbón activo absorbe los químicos nocivos como COV'S y formaldehído y el filtro hepa elimina las partículas de hasta 0.3 micras con una eficiencia del 99,97%. Se desconoce el estado de los filtros, cuantas horas han estado funcionando y si pueden estar colmatados. Sin embargo, se considera interesante ver las consecuencias de usar este purificador en las condiciones que posea.



Figura 41. Filtros purificador. Fuente: Haverland

El purificador posee un indicador LED de calidad del aire interior (figura 42), cuyas características se explican posteriormente en el subapartado “¿Es correcto tomar el purificador como indicador de calidad del aire?”:



Figura 42. Purificador indicador de la calidad del aire. Fuente: Haverland

El objetivo de los experimentos es determinar si el uso de este tipo de purificadores produce subproductos o contaminantes secundarios, entre ellos ozono. Inicialmente se planteaba un solo experimento donde solo se tenía en cuenta que las condiciones iniciales fueran estables sin entrar en detalle de las concentraciones iniciales de los parámetros. Al realizar este experimento se observó que no se medía formación de ozono, pero sí de COV'S y, en especial, de formaldehído. Es por ello por lo que se toma la decisión de repetir el experimento con otras condiciones iniciales para observar la evolución de los diferentes contaminantes.

Se han realizado tres experimentos poniendo en funcionamiento un mismo purificador en diferentes condiciones iniciales.

Las tres situaciones iniciales planteadas son:

- Caso A: Concentración inicial de COV'S de  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Caso B: Concentración inicial de COV'S de  $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Caso C: Concentración inicial de COV'S de  $729 \mu\text{g}/\text{m}^3$

### Experimento Caso A

Se parte de una concentración de COV'S con valor de  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se deja en funcionamiento el purificador durante una hora y cuarenta y cinco minutos. La evolución de los diferentes contaminantes se comenta a continuación.

La concentración de las partículas en suspensión disminuye  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gracias a los filtros (figura 43), como era de esperar ya que es la finalidad principal del purificador:

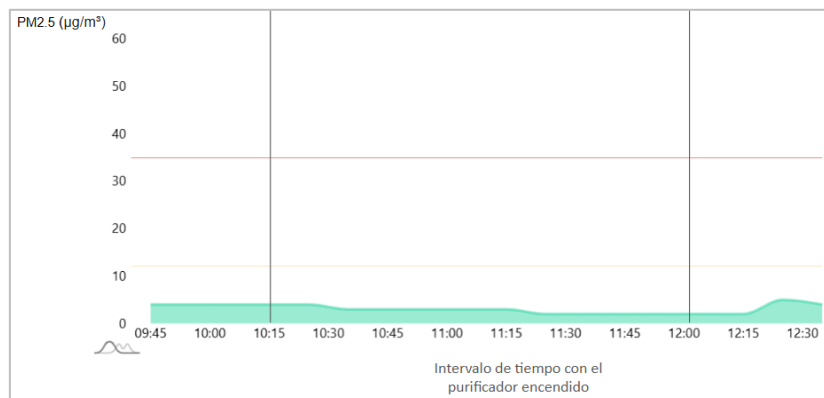
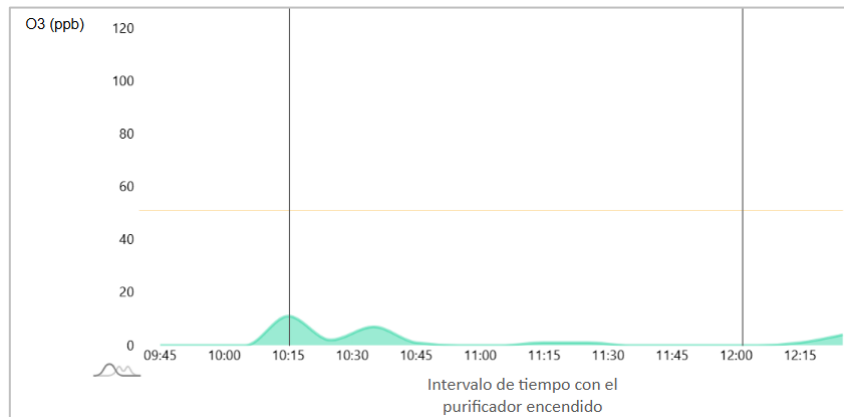


Figura 43. Evolución de la concentración de partículas al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S

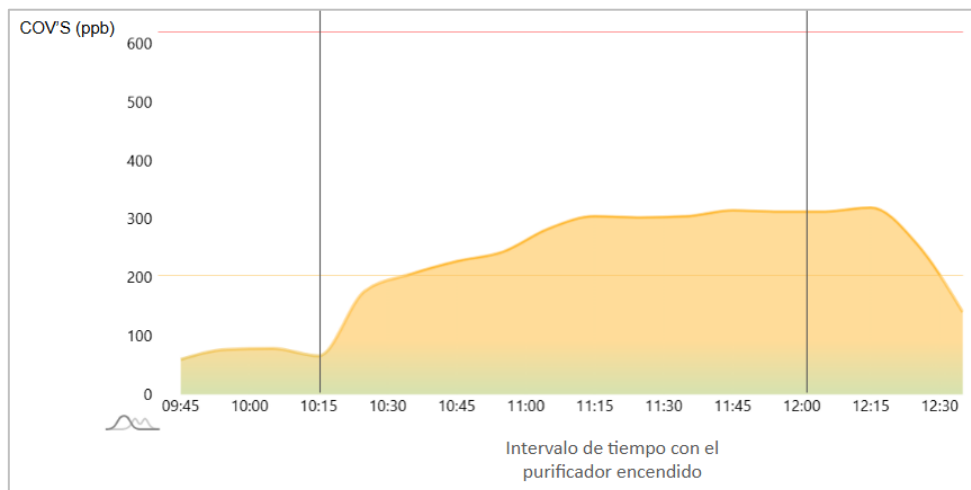
Inesperadamente no se aprecia un aumento en la concentración de ozono (figura 44), tal como se ha documentado que sí que ha sucedido en algunos estudios de investigación.



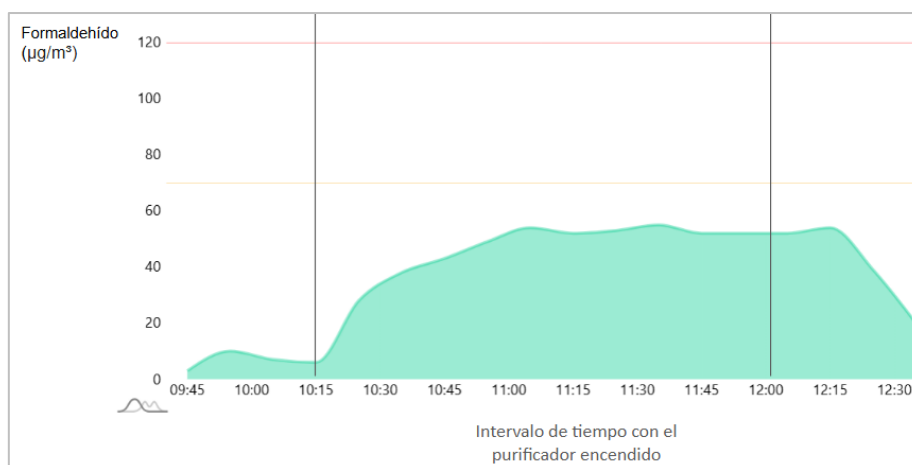
**Figura 44. Evolución de la concentración de ozono al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S**

Algunos artículos (por ejemplo, el artículo “Ten questions concerning the future of residential indoor air quality and its environmental justice implications” [1] o la ponencia “Airborne disease transmission: how it works, why it was misunderstood, and how to fight it” [2] ) sugieren un aumento en la concentración de ozono entre otros tipos de contaminantes secundarios por el uso de purificadores de aire, sin embargo, en este experimento no se ha observado un aumento en dicha concentración (exceptuando pequeñas fluctuaciones que ocurren de manera natural aún sin el purificador encendido).

Se observa un aumento en la concentración de COV'S y formaldehído (figuras 45 y 46, respectivamente). Preocupa esta subida de formaldehído ya que es compuesto orgánico volátil especialmente nocivo.



**Figura 45. Evolución de la concentración de COV'S al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S**



**Figura 46. Evolución de la concentración de formaldehído al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S**

Como se ha visto en el apartado 2 del trabajo, en ocasiones el ozono reacciona con algunos COV'S y esta reacción da lugar a la formación de formaldehído y otros contaminantes secundarios. Esta es una posible razón de porque la variación en la concentración de ozono no se detecta, ya que a medida que se genera se puede estar consumiendo en la reacción para producir formaldehído y contaminantes secundarios.

A continuación se muestra en la figura 47 una clasificación de los purificadores en la que se indica que este tipo de purificador (ionizador) genera contaminantes aunque ayude con la desinfección, y por tanto en el balance global se puede considerar perjudicial:

Air Cleaner Technology	Disinfects Air?	Reduces Pollution?	Increases Pollution?
HEPA, DIY, MERV13 Filters	✓	✓	
Activated Carbon Filters	✓	✓	
Electrostatic Precipitators	✓	✓	✗
O <sub>3</sub> Generators	✓		✗
OH Generators	✓		✗
Photocat. Oxidation (PCO)	✓		✗
HOCl / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Foggers	✓		✗
Ionizers	✓		✗
Bipolar Ionizers	✓		Neither or ✗
Germicidal UV at 222 nm	✓		✗
Germicidal UV at 254 nm	✓		✗

**Figura 47. Tabla balance global purificadores. Fuente: "Airborne disease transmission: how it works, why it was misunderstood, and how to fight it" [2]**

### Caso B

Se parte de una concentración inicial de COV'S de 96 µg/m<sup>3</sup> y se deja en funcionamiento casi tres horas. Al ser la interpretación análoga a la anterior se prescinde de mostrar las gráficas obtenidas. Estas están recogidas en el Anexo 2.

### Caso C

Para este tercer experimento se eleva la concentración de COV'S inicial rociando ambientador en el aire. En las figuras se muestra con una línea morada el momento de rociado de este, seguido de un periodo de tiempo donde se deja que se establezcan los niveles de los parámetros. Una vez que estos están

estabilizados se procede a poner en marcha el purificador, con una concentración inicial de COV'S de 729 ppb.

Se observa como, al igual que en el primer y segundo experimento, el nivel de partículas en suspensión disminuye (figura 48), el de ozono no presenta variaciones significativas (figura 49) y el formaldehído aumenta (figura 50). Sin embargo, a diferencia de los casos anteriores, la concentración de COV'S decae lentamente en vez de crecer, hasta llegar a las 600 ppb (figura 51).

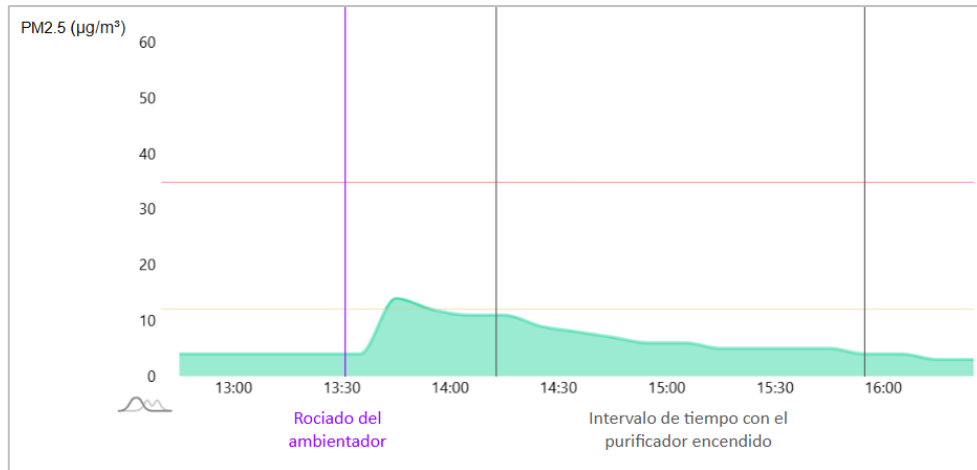


Figura 48. Evolución de la concentración de partículas al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración baja de COV'S

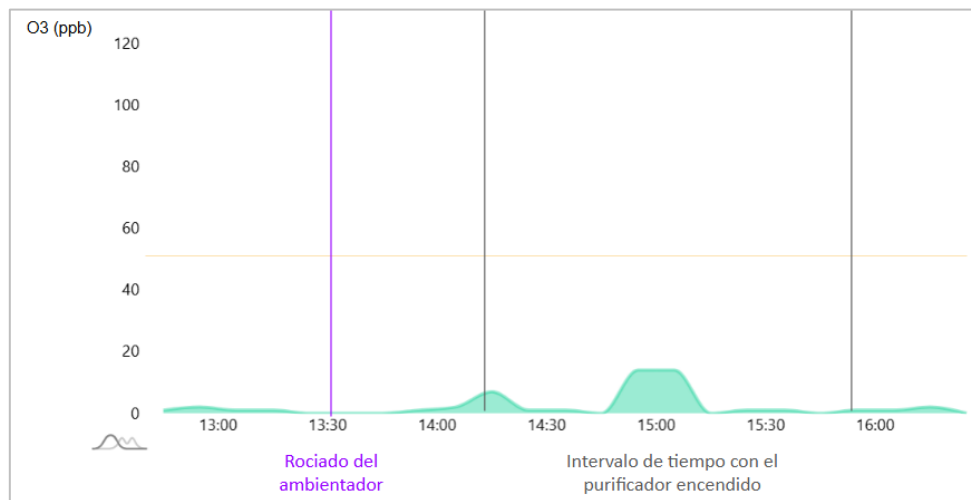
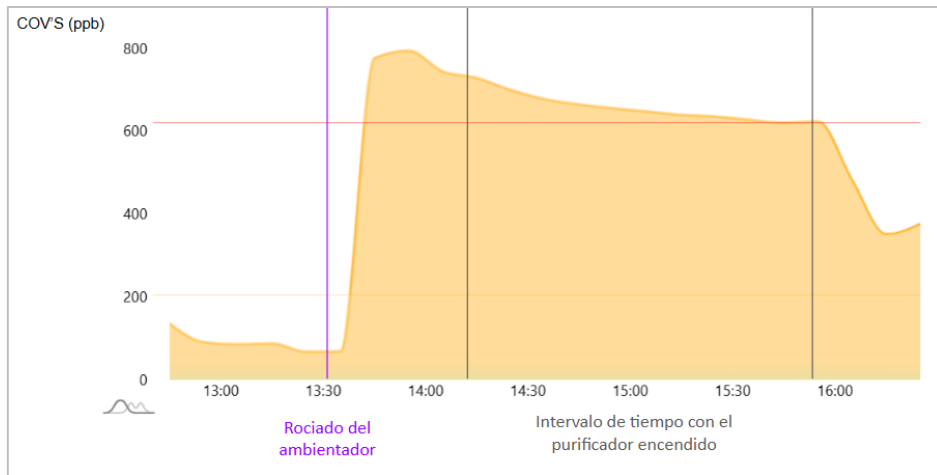
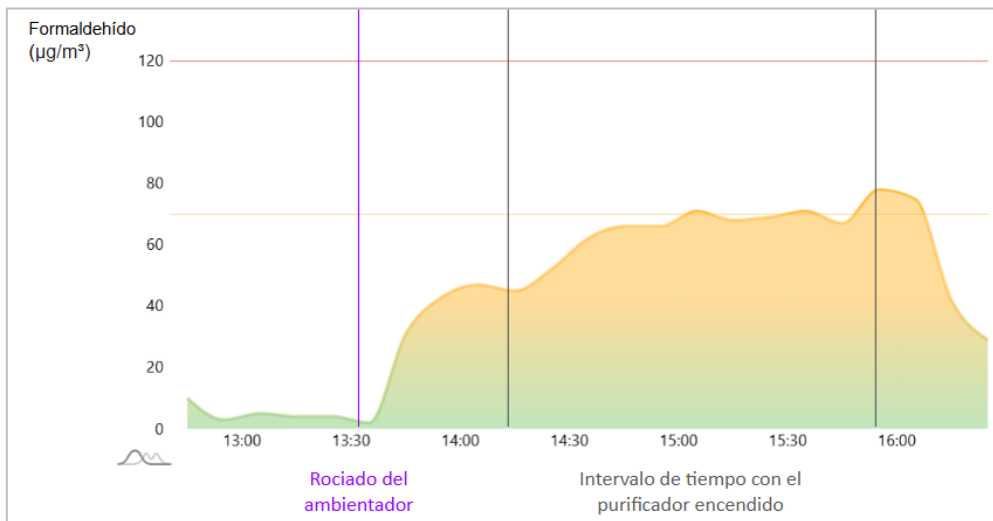


Figura 49. Evolución de la concentración de ozono al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración alta de COV'S



**Figura 50. Evolución de la concentración de COV'S al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración alta de COV'S**



**Figura 51. Evolución de la concentración de formaldehído al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración alta de COV'S**

Se plantea que el descenso de la concentración de COV'S se deba a que, al haber tanta cantidad inicial, se produzca una oxidación de muchos de ellos, de forma que la cantidad de COV'S que se oxidan no es superior a los que se forman por interacción de los COV'S con el ozono y en el balance global se produce una pérdida de este tipo de contaminantes.

### Variaciones medidas

A continuación en la tabla 14 se presentan las variaciones de contaminantes que ha tenido lugar (siendo la de ozono despreciable):

**Tabla 14. Incrementos de los contaminantes para cada experimento haciendo uso del purificador de iones**

Caso	$\Delta PM_{2.5}$	$\Delta CH_2O$	$\Delta COV'S$
A	$\downarrow 2 \mu g/m^3$ (se parte de un valor menor)	$\uparrow 49 \mu g/m^3$	$\uparrow$
B	$\downarrow 6 \mu g/m^3$	$\uparrow 70 \mu g/m^3$	$\uparrow$
C	$\downarrow 7 \mu g/m^3$	$\uparrow 76 \mu g/m^3$	$\downarrow$

### ¿Es correcto tomar el purificador como indicador de la calidad del aire?

Al inicio del apartado actual se comentaba que el purificador utilizado en los experimentos está catalogado por el fabricante como apto para tomarse como indicador de la CAI. Sin embargo, tomando mediciones con medidores inBiot se ha comprobado que el hecho de que la línea indicativa del purificador esté azul, color que indica una buena calidad del aire interior, no implica que realmente la haya.

Se adjunta una tabla con la calidad del aire indicada por el purificador (tabla 15) junto a fotografías de los tres colores mostrados por el este durante el experimento para la situación 3 (figura 52). Así mismo se muestran también las gráficas de las mediciones tomadas identificando dichos colores con el momento correspondiente (figuras 53 y 54):

Tabla 15. Calidad del aire indicada según el color del purificador

Color	Calidad del aire
Azul	Muy buena
Púrpura / morado	Buena / justa
Rojo	Mala



Figura 52. Colores indicadores de la CAI del purificador

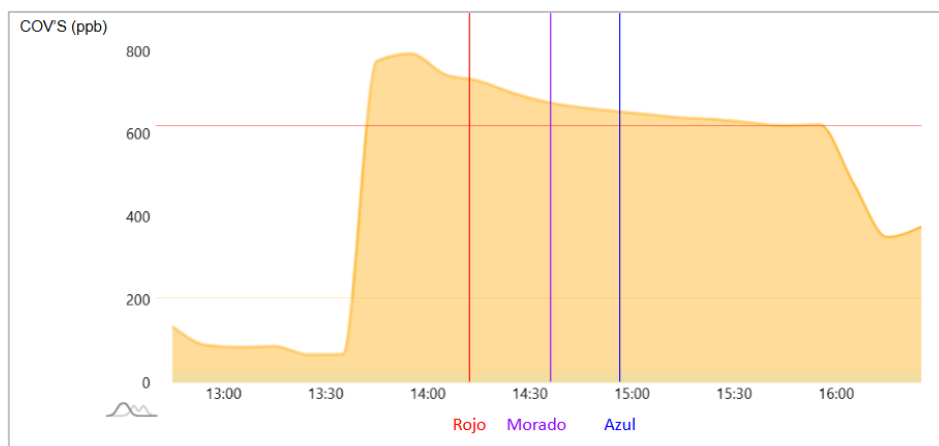
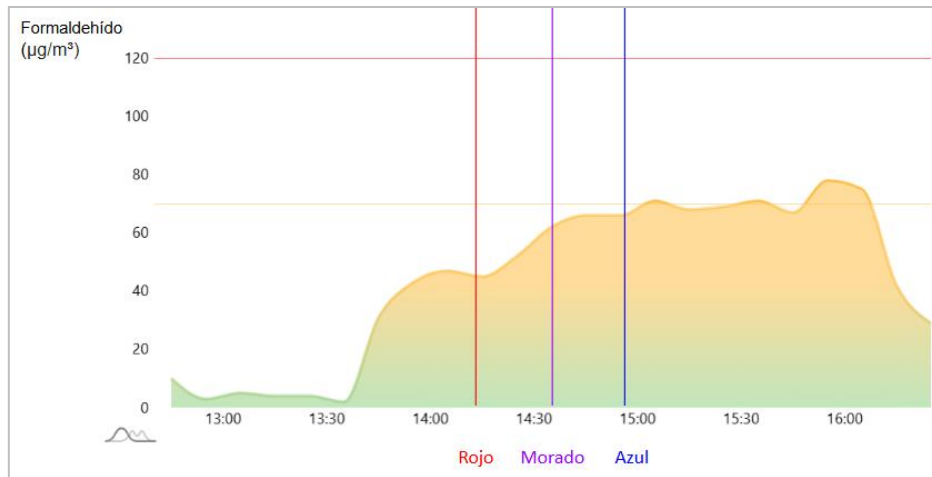


Figura 53. Calidad del aire indicada vs concentración de COV'S presente



**Figura 54. Calidad del aire indicada vs concentración de formaldehído presente**

Lo más peligroso es que indica que hay una buena calidad del aire cuando más formaldehído hay presente. Esto es un riesgo ya que este tipo de productos cada vez son más frecuentes, sobre todo en personas con asma o alergia, ya que son gente que busca mejorar la calidad el aire interior de sus hogares.

En el caso concreto de este purificador de iones no compensa las partículas que son eliminadas a cambio de la gran cantidad de formaldehído que es producido por su uso.

Aunque la interpretación dada es una hipótesis y no se tiene evidencia de que el purificador realmente esté generando ozono, sería conveniente hacer uso de otros tipos de purificadores que no sean susceptibles a generar ozono (y en caso de que la hipótesis sea correcta, evitar así la formación de formaldehído). Una buena elección sería optar por un purificador HEPA.

## Conclusiones

Se han revisado 23 documentos técnicos, de los cuales 10 eran artículos sobre CAI en el sector residencial. Entre las principales líneas de trabajo en la actualidad se encuentran las nuevas tecnologías que están siendo adoptadas en el sector, el estudio de problemas potenciales asociados al uso de purificadores, la investigación de efectos que pueden causar los distintos contaminantes a parte de los ya conocidos y la petición de implantación en España del sistema de etiquetado para productos de construcción y decoración francés, entre otras.

En segundo lugar, se hizo una revisión de los trabajos fin de estudios presentados en años anteriores y se optó por tomarlos como base. Los medidores de la marca inBiot cumplían los requisitos necesarios para poder llevar a cabo este trabajo y además estaban disponibles para poder ser usados. Se recopiló información acerca de los cuatro medidores de CAI que ofrece inBiot y se compararon entre ellos. Posteriormente se estudió el medidor de Aranet Radón Plus el cual proporciona mediciones en continuo de radón además de otros parámetros.

### Mediciones en continuo (medidores InBiot)

Se realizaron mediciones en continuo en tres viviendas diferentes con sus respectivas características con los medidores MICA y MICA PLUS y se procedió al análisis y comparación de estas. Se confirmó que la ventilación mecánica (caso 2) ayuda a diluir de manera continua y más eficiente los contaminantes y se alcanzan picos de menos magnitud que en los demás casos (casos 1 y 3, viviendas sin ventilación mecánica).

A continuación se presenta en la tabla 16 los 14 experimentos que fueron realizados junto a sus respectivos incrementos en las concentraciones de los contaminantes (el color rojo indica que con esos niveles de incremento el nivel del contaminante sería extremadamente significativo, entrando en niveles nocivos para la salud, mientras que el morado se asocia a valores significativos para los que se recomienda ventilar), seguida de otra (tabla 17) donde se han ordenado de mayor a menor los experimentos según la cantidad de formaldehído y materia particulada emitida:

**Tabla 16. Conclusiones de los experimentos. Fuente: elaboración propia**

Experimento	Conclusiones
Uso de humidificadores de ultrasonidos. Importancia de hacer uso de un agua destilada	Usar agua del grifo para rellenar humidificadores ultrasónicos implica un gran aumento en la concentración de partículas en suspensión emitidas ( $\Delta PM_{2.5}$ con agua destilada= $1\mu g/m^3$ , $\Delta PM_{2.5}$ con agua del grifo= $40\mu g/m^3$ y $\Delta PM_{2.5}$ con agua del subsuelo= $401\mu g/m^3$ )
Aplicación de desodorante en spray	Hacer uso de desodorantes en spray eleva la concentración de COV'S y formaldehído ( $\Delta CH_2O=58\mu g/m^3$ ), además de aumentar la materia particulada ( $\Delta PM_{2.5}=79\mu g/m^3$ )
Importancia de hacer uso de la campana extractora	Aunque al cocinar con campana extractora se produce un ligero aumento de partículas en suspensión, el aumento es muy superior si no se hace uso de ella (si no se utiliza $\Delta PM_{2.5}=99\mu g/m^3$ )
Aplicación de esmalte de uñas	Los esmaltes de uñas contienen compuestos químicos volátiles que se evaporan a temperatura ambiente, dando lugar así a un aumento en la concentración de COV'S
Efecto de pasar el aspirador	El hecho de que al pasar el aspirador se observe un aumento de concentración, hace pensar que quizás el aspirador genera un efecto de disminución de presión (succión) que provoca este aumento de concentración de formaldehído (hipótesis) ( $\Delta CH_2O=54\mu g/m^3$ )

Ocupación: efecto de una persona durmiendo en el salón (caso 3)	Durante las horas de sueño si no se mantienen las ventanas abiertas (si el tiempo lo permite, como es el caso de verano) y las puertas que comunican con otras estancias de la vivienda abiertas, los niveles de $CO_2$ se elevan aproximadamente unas 500 ppm por cada persona presente en la habitación, alcanzando niveles no óptimos.
Rociado de un ambientador en spray con fragancia floral	Aumenta la concentración de COV'S y debido a la interacción de algunos de estos (terpenos concretamente) con el ozono aumenta también el formaldehído ( $\Delta CH_2O=24\mu g/m^3$ ). A esto se le suma la emisión de partículas por ser un spray ( $\Delta PM_{2.5}=32\mu g/m^3$ )
Efecto de encender incienso	Se liberan COV'S y como subproducto de la combustión incompleta se obtiene formaldehído ( $\Delta CH_2O=72\mu g/m^3$ ), junto con partículas en suspensión debidas a dicha combustión ( $\Delta PM_{2.5}=90\mu g/m^3$ )
Bolsa de palomitas para el microondas	Se emiten COV'S y gran cantidad de formaldehído debido a las grasas y los aceites que componen este tipo de palomitas ( $\Delta CH_2O=71\mu g/m^3$ ). Además el humo y las pequeñas gotas de grasa que quedan en el aire suponen un aumento también de partículas en suspensión ( $\Delta PM_{2.5}=24\mu g/m^3$ )
Uso de rotuladores	El uso de rotuladores provoca un aumento de COV'S y formaldehído por su composición ( $\Delta CH_2O=46\mu g/m^3$ ). Este aumento es especialmente alto en el caso de los rotuladores Velleda ( $\Delta CH_2O=62\mu g/m^3$ )
Encendido de velas aromáticas	Inicialmente emiten formaldehído ( $\Delta CH_2O=14\mu g/m^3$ ) y COV'S, pero tras un rato encendidas la concentración del primero decae y de los segundos continúa aumentando. Al soplar para apagarlas aumentan las partículas en suspensión ( $\Delta PM_{2.5}=54\mu g/m^3$ )
Varitas difusoras de aroma	Aunque parecen inofensivas, emiten mayor cantidad de COV'S y formaldehído que los ambientadores en spray (tomando como referencia un bote recién abierto y un spray recién rociado) ( $\Delta CH_2O=61\mu g/m^3$ )
Aceite esencial con olor a pino (en humidificador con agua destilada)	Aumenta la concentración de COV'S y, debido a que los terpenos son muy reactivos con ozono, el formaldehído también aumenta ( $\Delta CH_2O=35\mu g/m^3$ )
Rociado de insecticida	Se emiten COV'S pero no formaldehído debido a los componentes del insecticida. Además aumenta la materia particulada ( $\Delta PM_{2.5}=160\mu g/m^3$ )

Tabla 17. Experimentos ordenados según emisiones. Fuente: elaboración propia

Experimentos ordenados según la cantidad de formaldehído que emiten	$\Delta CH_2O$ ( $\mu g/m^3$ )	Experimentos ordenados según la cantidad de partículas que emiten	$\Delta PM_{2.5}$ ( $\mu g/m^3$ )
Efecto de encender incienso	72	Rociado de insecticida	160
Bolsa de palomitas para el microondas	71	Importancia de hacer uso de la campana extractora	99
Uso de rotuladores: Velleda	62	Efecto de encender incienso	90
Varitas difusoras de aroma	61	Aplicación de desodorante en spray	79
Aplicación de desodorante en spray	58	Encendido de velas aromáticas (al apagarlas)	54
Efecto de pasar el aspirador	54	Uso de humidificadores de ultrasonidos. Importancia de hacer uso de un agua adecuada (experimento con agua del grifo)	40
Uso de rotuladores: rotulador metálico	46	Rociado de un ambientador en spray con fragancia floral	32
Aceite esencial con olor a pino (en humidificador con agua destilada)	35	Bolsa de palomitas para el microondas	24
Rociado de un ambientador en spray con fragancia floral	24	Aceite esencial con olor a pino (en humidificador con agua destilada) Uso de humidificadores de ultrasonidos. Importancia de hacer uso de un agua adecuada (experimento con agua destilada) Efecto de pasar el aspirador	1
Encendido de velas aromáticas	14		

La precisión de los medidores es de  $\pm(5\mu\text{g}/\text{m}^3+5\%\text{m.v.})$  para valores (1-100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y de  $\pm 10\%\text{m.v.}$  para (101 – 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para las PM2.5, mientras que para el formaldehído es de  $\pm 156,25\mu\text{g}/\text{m}^3$  aproximadamente o  $\pm 20\%\text{m.v.}$  (lo que sea más grande).

#### Mediciones de radón

El análisis realizado sobre el radón residencial se recoge en la tabla 18:

**Tabla 18. Resumen apartado 3. Fuente: elaboración propia**

<p><b>Toma de mediciones de radón en continuo en sótanos de tres viviendas haciendo uso del medidor Aranet Radón Plus</b></p>	<p>Se concluyó que la concentración de este presenta una relación inversamente proporcional con la temperatura y con la presión atmosférica, mientras que para la humedad relativa la relación es directamente proporcional. Es por ello que los días lluviosos y de tormentas se corresponden con los días en lo que se miden concentraciones de radón más altas. Por otro lado, no se detectó relación alguna con el horario ni con el uso del extractor presente en el sótano de la vivienda de Montecanal. Además, se determinó que las tres viviendas se encuentran dentro del 90% de las viviendas que poseen una concentración de radón con valores entre 101 y 200 Bq/m<sup>3</sup> (lo que se conoce como percentil 90).</p>
<p><b>Mediciones en el sótano de la vivienda de Casablanca en invierno y primavera</b></p>	<p>Se confirmó que con la subida de temperaturas la concentración de radón medida toma valores mucho menores.</p>
<p><b>Mediciones diferentes plantas de la vivienda de Casablanca</b></p>	<p>En la planta calle y planta primera la concentración de radón era mucho menor que en el sótano, lo que es lógico ya que, a diferencia del sótano, no se encuentran en contacto directo con el suelo.</p>

Como parte final del apartado se plantearon alternativas para evitar la entrada (o, por lo menos, dificultarla y disminuir la cantidad que entra) del radón, las cuales en general deben de ser tomadas antes de construir la vivienda.

#### Uso de purificadores

Se realizaron tres experimentos haciendo uso del medidor MICA WELL poniendo en funcionamiento el purificador con diferentes condiciones iniciales (tabla 19):

**Tabla 19. Resumen experimentos apartado 4. Fuente: elaboración propia**

Situación inicial	Evolución de los contaminantes
Concentración inicial de COV'S intermedia	↓PM ↑COV'S ↑Formaldehído
Concentración inicial de COV'S baja	↓PM ↑COV'S ↑Formaldehído
Concentración inicial de COV'S alta	↓PM ↓COV'S ↑Formaldehído

Se observó como la evolución de los contaminantes depende de la situación inicial de la que se parte al encender el equipo.

Se argumentó que una posible explicación para las evoluciones observadas es que sí que se genera ozono pero este reacciona con los COV'S presentes en el ambiente y esta interacción da como producto la formación de formaldehído y contaminantes secundarios.

Por último, se analizó si realmente el purificador sirve como indicador de CAI, siendo el resultado negativo ya que indica una buena CAI cuando no la hay. Esto se pudo comprobar gracias a los dispositivos inBiot situados en la misma habitación.

## Líneas de futuro

A continuación se procede a enumerar las líneas de futuro en las que se puede seguir trabajando para contribuir a la mejora de la calidad del aire interior residencial y un mayor confort de los ocupantes:

1. Probar otros tipos de humidificadores para ver si, al igual que en los humidificadores de ultrasonidos, la emisión de partículas en suspensión es función del tipo de agua empleada para su relleno.
2. Probar otros tipos de purificadores para analizar si se aprecia un aumento en las mediciones de ozono, de COV'S y/o de formaldehído e incluso si por el contrario, no se aprecian subidas significativas a ningún contaminante.
3. Realizar mediciones en continuo de radón en un sótano que posea extractor en la parte inferior para comprobar que al estar este en funcionamiento se consigue reducir la concentración de radón presente.
4. De los experimentos ya realizados en este trabajo, repetirlos con diferentes fragancias para estudiar el efecto de estas sobre las emisiones de los contaminantes, siendo de especial interés las emisiones de formaldehído y las tendencias de los COV'S.
5. Repetir los experimentos realizados en este trabajo para reducir los posibles errores experimentales.
6. Realizar otros experimentos probando otros productos como limpiacristales, friegasuelos, productos con olores (por ejemplo a limón o a pino), productos para limpiar tapicería, tabaco, etc.
7. Tomar mediciones de la evolución de los COV'S y el formaldehído que emiten las varitas difusoras de aroma con el paso de los días o semanas.
8. Tomar mediciones al realizar otras actividades cotidianas diferentes a las ya realizadas en el trabajo (como por ejemplo planchar o aplicarse perfume) o que se puedan llevar a cabo de manera puntual en el hogar (como pintar con pintura o barnizar).
9. Realizar mediciones en continuo en una vivienda a las afueras de la ciudad para comprobar la influencia de la calidad del aire exterior sobre la calidad del aire interior.

## Bibliografía

- [1] “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.” Accessed: May 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] Campano, M. Á., Fernández-Agüera, J., Sendra, J. J. (2023). “Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica”. Octaedro.
- [3] Paulino Pastor Pérez. “Documentos Técnicos De Instalaciones en la Edificación DTIE: DTIE 2.02 Calidad de aire interior”. Atecyr.
- [4] Keyter, 30 de mayo de 2025, “Webinar: RITE y UNE EN 16798: De la normativa a la acción KEYTER”.
- [5] Halios, C. H., Landeg-Cox, C., Lowther, S. D., Middleton, A., Marczylo, T., & Dimitroulopoulou, S. (2022). “Chemicals in European residences – Part I: A review of emissions, concentrations and health effects of volatile organic compounds (VOCs)”. In *Science of the Total Environment* (Vol. 839). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156201>
- [6] Booker, D., Petrou, G., Chatzidiakou, L., Das, D., Farooq, F., Ferguson, L., Jutila, O. E. I., Milczewska, K., Modlich, M., Moreno-Rangel, A., Thakrar, S. K., Yeoman, A. M., Davies, M., Mead, M. I., Miller, M. R., Wild, O., Shi, Z., Mavrogianni, A., & Doherty, R. M. (2025). “Ten questions concerning the future of residential indoor air quality and its environmental justice implications”. In *Building and Environment*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112957>
- [7] Kolawole E.Adesina, Aaron J.Specht, Suaib D.Olaniyan, Catherine Ignatius, Operiyemi P.Idowu, Ramotallah D.Jubril, Toheeb T.Hamzat, Emmanuel G.Ndoma, Olalekan Olatunji. (2025). “Residential and occupational exposure to indoor radon and associated human health risk in Nigeria buildings assessed by multiple monitoring techniques”. In *Science of The Total Environment*, 981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179478>
- [8] Lozinsky, C. H., Casquero-Modrego, N., & Walker, I. S. (2025). “The health and indoor environmental quality impacts of residential building envelope retrofits: A literature review”. In *Building and Environment* (Vol. 270). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112568>
- [9] Mortari, D., Wang, Y., Guyot, G., Plagmann, M., & Mendes, N. (2025). “Smart ventilation in residential buildings: a systematic review of control strategies and their effectiveness”. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 108). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112584>
- [10] Baptiste Poirier, Gaëlle Guyot, Monika Woloszyn, Hugo Geoffroy, Michel Ondarts, Evelyne Gonze. (2021) “Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators”. In *Journal of Building Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103140>
- [11] inBiot. “Volatile Organic Compounds – TVOC”. <https://www.inbiot.es/wikinbiot/tvoc>
- [12] Mónica Pérez Ríos, Marta García Talavera, Montserrat García Gómez, Santiago González Muñoz, Julia Rey-Brandariz, Juan Miguel Barros Dios, Alberto Ruano Raviña. (2021). “Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España”. Ministerio de Sanidad.

- [13] Baptiste Poirier, Gaëlle Guyot, Hugo Geoffroy, Monika Woloszyn, Michel Ondarts, Evelyne Gonze. (2021). "Pollutants emission scenarios for residential ventilation performance assessment. A review". In *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102488>
- [14] Wenzhe Shang, Junjie Liu, Congcong Wang, Jiayu Li, Xilei Dai. (2023). "Developing smart air purifier control strategies for better IAQ and energy efficiency using reinforcement learning". In *Building and Environment*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110556>
- [15] Fan, X., Liao, C., Bivolarova, M. P., Sekhar, C., Laverge, J., Lan, L., Mainka, A., Akimoto, M., & Wargocki, P. (2022). "A field intervention study of the effects of window and door opening on bedroom IAQ, sleep quality, and next-day cognitive performance". In *Building and Environment*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109630>
- [16] Patrizia Urso, Andrea Cattaneo, Gaetano Garramone, Carlo Perruzo, Domenico Maria Cavallo, Paolo Carrer. (2015). "Identification of particulate matter determinants in residential homes". In *Building and Environment*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.019>
- [17] Estela D. Vicente, Ana I. Calvo, Tsend-Ayush Sainnokhoi, Nora Kováts, Ana Sánchez de la Campa, Jesús de la Rosa, Fernanda Oduber, Teresa Nunes, Roberto Fraile, Mário Tomé, Célia A. Alves. (2024). "Indoor PM from residential coal combustion: Levels, chemical composition, and toxicity". In *Science of The Total Environment*, 918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170598>
- [18] Lovas, S., Pál, L., Kovács, N., Diószegi, J., McKee, M., & Szűcs, S. (2024). "Dataset on concentrations of volatile organic compounds in indoor environments of offices, educational and residential buildings in the European Union between 2010 and 2023". In *Data in Brief*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.111070>
- [19] Banrida Wahlang, Hong Gao, Shesh N. Rai, Rachel J. Keith, Craig J. McClain, Sanjay Srivastava, Mathew C. Cave, Aruni Bhatnagar. (2023). "Associations between residential volatile organic compound exposures and liver injury markers: The role of biological sex and race". In *Environmental Research*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115228>
- [20] Yao, W., Gallagher, D. L., & Dietrich, A. M. (2020). "An overlooked route of inhalation exposure to tap water constituents for children and adults: Aerosolized aqueous minerals from ultrasonic humidifiers". In *Water Research X*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100060>
- [21] Yao, W., Dal Porto, R., Gallagher, D. L., & Dietrich, A. M. (2020). "Human exposure to particles at the air-water interface: Influence of water quality on indoor air quality from use of ultrasonic humidifiers". In *Environment International*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105902>
- [22] inBiot. "Formaldehyde". <https://www.inbiot.es/wikinbiot/formaldehyde>
- [23] Digging Deeper: Where Indoor Air Pollution Comes From Insights from K-HEALTHinAIR's second phase of monitoring Tracing the sources of poor Indoor Air Quality.
- [24] Kai Su, Xixian Fang, Siqing Wu, Xinjie Dai, Chunliang Wang, Linming Hu, Yiqiang Zhan, Yang Zhao, Jianbang Xiang. (2024). "A novel approach for large-scale characterization of residential cooking-generated PM with computer vision and low-cost sensors". In *Science of The Total Environment*, 951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175621>

- [25] Guofeng Shen, Wei Du, Shaojie Zhuo, Jialing Yu, Shu Tao. (2019). "Improving regulations on residential emissions and non-criteria hazardous contaminants—Insights from a field campaign on ambient PM and PAHs in North China Plain". In *Environmental Science & Policy*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.003>
- [26] Indrayudh Mondal, Megan Groves, Erin M. Driver, Wendy Vittori, Rolf U. Halden. (2024). "Carcinogenic formaldehyde in U.S. residential buildings: Mass inventories, human health impacts, and associated healthcare costs". In *Science of The Total Environment*, 944. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173640>
- [27] Liu, L., Yu, X., Dong, X., Wang, Q., Wang, Y., & Huang, J. (2017). "The Research on Formaldehyde Concentration Distribution". In *New Decorated Residential Buildings. Procedia Engineering*, 205, 1535–1541. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.238>
- [28] Dan Liao, Lei Wang, Yanyun Wang, Chengqi Lin, Jinlei Chen, Huabin Huang, Zhixia Zhuang, Sung-Deuk Choi, Youwei Hong. (2024). "Health risks and environmental influence of volatile organic compounds (VOCs) in a residential area near an industrial park in Southeast China". In *Atmospheric Pollution Research*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101966>
- [29] Francisco Javier Rey Martínez, Eloy Velasco Gómez. "Documentos Técnicos De Instalaciones en la Edificación DTIE: DTIE 9.04 Sistema de suelo radiante". Atecyr.
- [30] Pedro G. Vicente Quiles. "Documentos Técnicos De Instalaciones en la Edificación DTIE: DTIE 17.04 Instrumentación y medición". Atecyr.
- [31] José Manuel Cejudo López, Arcadio García Lastra, José Fernández Seara, Eduardo A. Rodríguez García, José Manuel Pinazo Ojer, Víctor Manuel Soto Francés, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés, Pedro G. Vicente Quiles, Francisco Javier Rey Martínez, Eloy Velasco Gómez, Ricardo García San José. "Fundamentos de climatización". Atecyr.
- [32] valvias. "Densidad de gases". <https://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php>
- [33] Cappa, C. (2023). Air Pollutant Emissions and Possible Health Effects Associated with Electronic Air Cleaners Final Report Agreement Number: A23-1321 Lead Principal Investigator.

## ANEXO 1. Desarrollo e interpretación de los experimentos

En este anexo se desarrollan los experimentos llevados a cabo y las gráficas de la evolución de las concentraciones de los principales contaminantes de CAI proporcionadas en cada caso por el medidor MICA Plus. También se argumentan posibles explicaciones de los resultados obtenidos para cada experimento en su respectivo subapartado.

### Aplicación de desodorante en spray

Se aplica el desodorante en spray mostrado en la figura 55:



Figura 55. Desodorante deliplus

Las evoluciones de las concentraciones de los contaminantes se muestran en las figuras 56, 57 y 58:

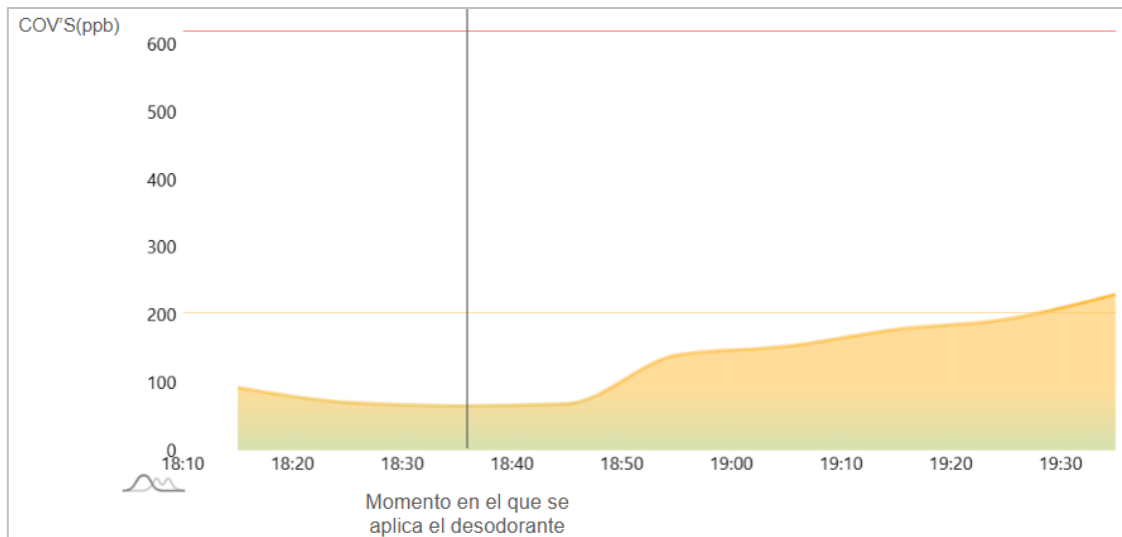
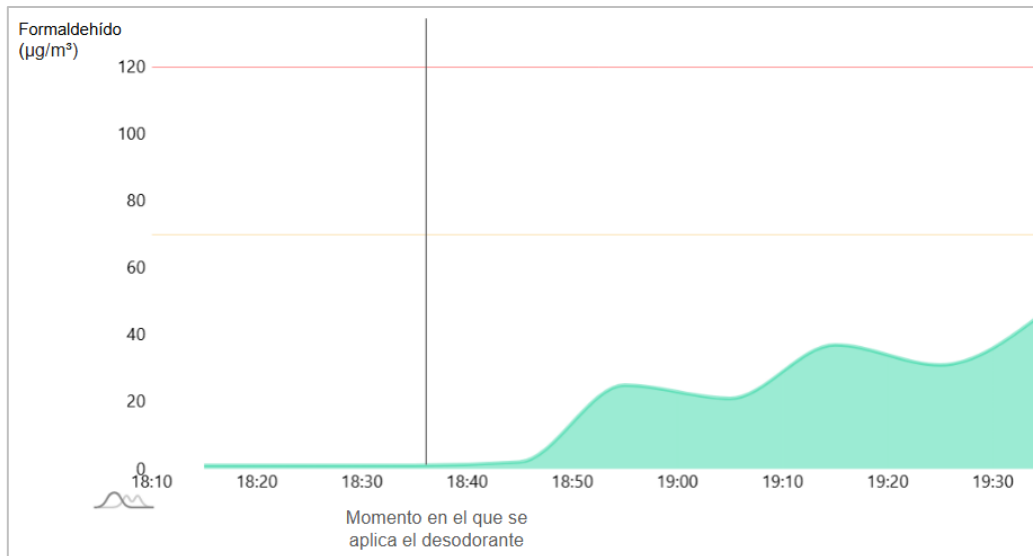
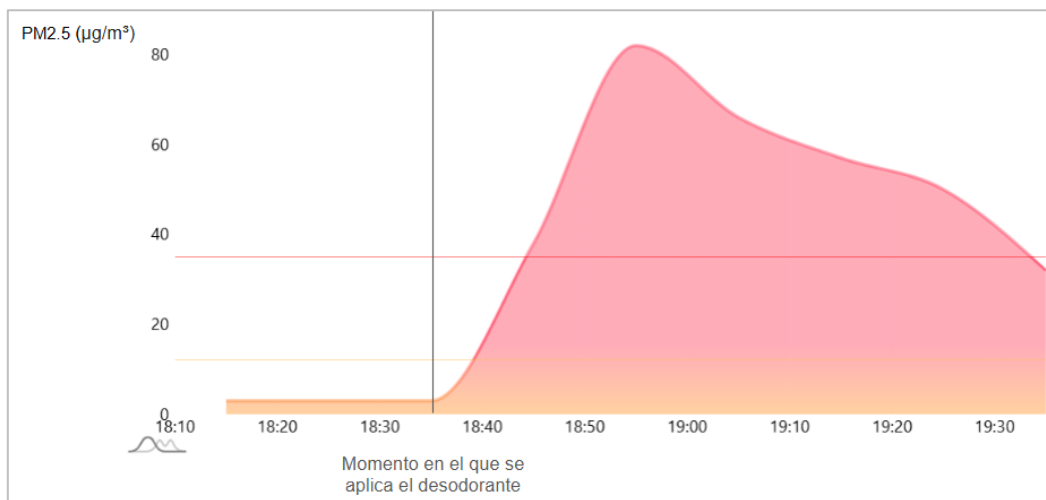


Figura 56. Aumento de COV'S al aplicar desodorante en spray



**Figura 57. Aumento de formaldehído al aplicar desodorante en spray**



**Figura 58. Aumento de PM2.5 al aplicar desodorante en spray**

Se observa un aumento de COV'S y de formaldehído. Por ello, aunque es posible que entre los COV'S detectados haya algunos inocuos, el hecho de que aumente el formaldehído indica que se han emitido COV'S nocivos y peligrosos, por lo que sería recomendable no hacer uso de este tipo de desodorante y optar por otro tipo como los de barra o roll-on. Además, al ser un spray se obtiene una subida significativa en la concentración de materia particulada.

En caso de hacer uso de estos desodorantes no se deberían emplear en habitaciones cerradas ni cerca del rostro.

#### **Importancia de hacer uso de la campana extractora**

Se han tomado mediciones de la concentración de PM2.5 mientras se cocina en la sartén para mostrar la importancia que tiene el uso de la campana extractora (figuras 59 y 60). Aunque en ambos casos la actividad supone un aumento en la concentración de PM2.5 (ya que se producen partículas de aceite y grasa en suspensión, humo y gases de combustión, entre otros), al hacer uso de la campana no se alcanzan niveles que pudiesen considerarse nocivos, mientras que si no se usa los niveles alcanzados son demasiado altos y, por tanto, peligrosos.

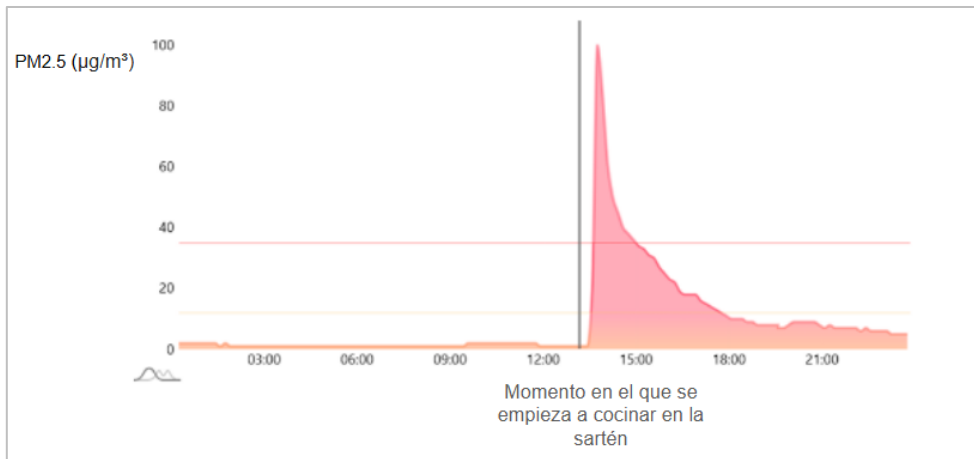


Figura 59. Aumento de PM2.5 al cocinar sin hacer uso de la campana extractora.

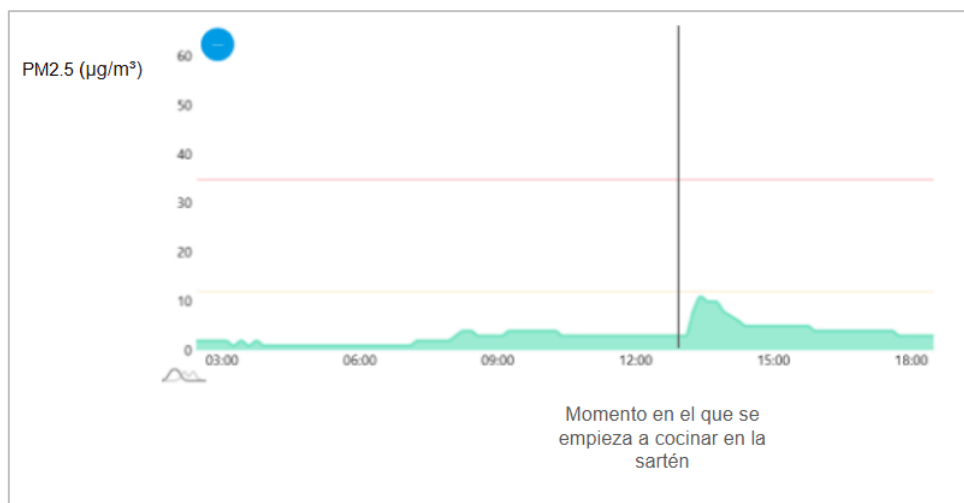


Figura 60. Aumento de PM2.5 al cocinar haciendo uso de la campana extractora

Cabe mencionar que para ambos casos se ha cocinado el mismo tipo de alimento (pechugas de pollo), el mismo número de filetes (3 filetes), con la misma cantidad de aceite, la misma sartén y, en resumen, las mismas condiciones.

### Aplicación de esmalte de uñas

Los esmaltes de uñas contienen compuestos químicos volátiles que se evaporan a temperatura ambiente, dando lugar así a un aumento en la concentración de COV'S (figura 61):

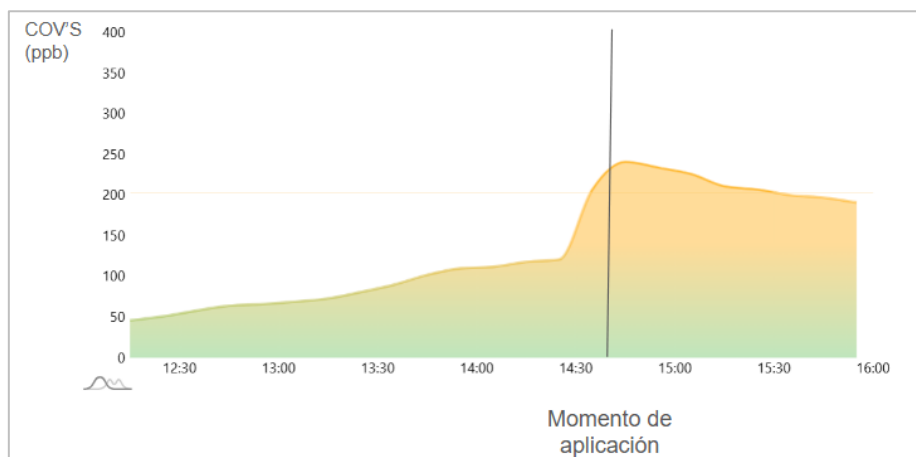


Figura 61. Aumento de COV'S debido al esmalte de uñas

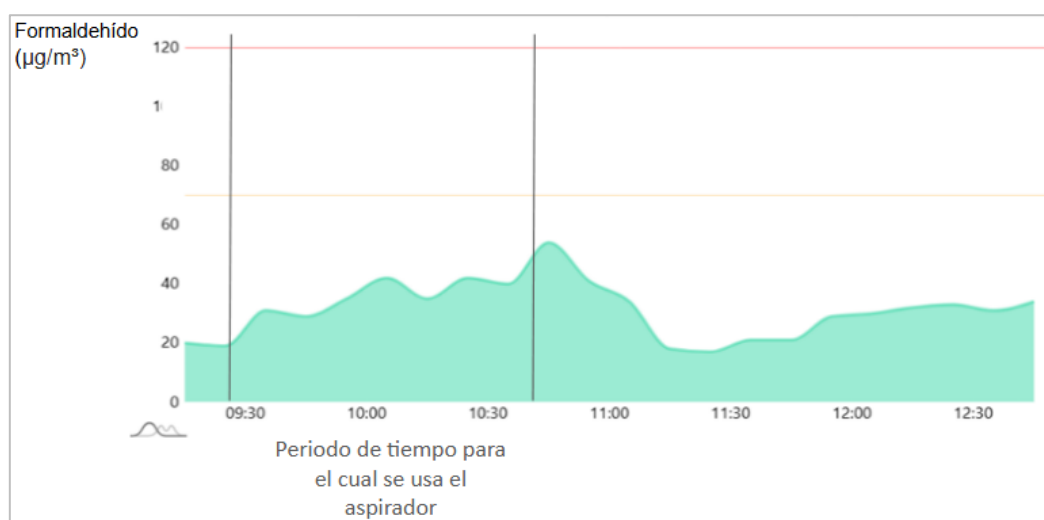
Entre estos compuestos se encuentran el acetato de etilo, el tolueno y el alcohol isopropílico [4].

Además se observa como los niveles de COV'S son elevados no solo en el momento de aplicación, sino también previamente (cuando se abre el frasco) y posteriormente (cuando una vez ya aplicado se deja secar).

La concentración de COV'S baja rápidamente si se abren las ventanas (en el experimento se dejaron cerradas y se puede ver como la bajada es mucho más tendida, y por tanto, lenta), por lo que sería preferible que, en caso de hacer uso de este tipo de productos, se mantuviera la habitación lo más abierta posible para intentar que la concentración alcanzada fuera menor.

### **Efecto de pasar el aspirador**

Se pasa el aspirador para limpiar la casa y, curiosamente, se observa un aumento continuo de la concentración de formaldehído (figura 62):



**Figura 62. Aumento de formaldehído al pasar el aspirador**

Una de las fuentes de formaldehído pueden ser los muebles, suelos tipo madera o elementos de decoración, entre otros. El hecho de que al pasar el aspirador se observe un aumento de concentración, hace pensar que quizás el aspirador genera un efecto de disminución de presión (succión) que provoca este aumento de concentración de formaldehído. Sin embargo, esto es solamente una hipótesis, ya que se han buscado artículos relacionados, junto con una búsqueda con palabras clave, y no se ha conseguido encontrar otros autores que apoyen o desmientan esta hipótesis.

Se plantea como posible línea de futuro repetir el experimento para otras viviendas para comprobar si se cumple la hipótesis planteada.

### **Ocupación: efecto de una persona durmiendo en el salón (caso 3)**

Como es bien conocido, cuantas más personas hay en un lugar, mayor es la cantidad de  $CO_2$  emitida, y si no se ventila pero se mantiene esta ocupación durante un periodo de tiempo prolongado pueden alcanzarse niveles no deseados. Por la noche puede ocurrir esto, ya que muchas veces las personas se van a dormir con todo cerrado (puertas y ventanas) y, en algunas ocasiones, hay más de una persona en la habitación. Esto hace que la concentración de  $CO_2$  alcanzada durante la noche pueda ser excesiva.

Es por ello que se plantea un experimento para ver la diferencia de las concentraciones de  $CO_2$  alcanzadas según las condiciones de la habitación. Para el experimento en vez de una habitación se utilizó el salón ya que es donde se encontraban situados los medidores en el momento de realización. El experimento tiene lugar en mayo, por lo que las buenas temperaturas permiten estar con las ventanas abiertas durante la noche.

Las condiciones en las que se han tomado mediciones son:

- Situación 1: sin personas, con las puertas del interior de la vivienda abiertas y las ventanas abiertas también.
- Situación 2: con una persona, con las puertas del interior de la vivienda abiertas y las ventanas abiertas también.
- Situación 3: con una persona, con las puertas del interior de la vivienda cerradas y las ventanas cerradas también.

Las concentraciones de  $CO_2$  alcanzadas en cada caso se muestran en las figuras 63,64 y 65, respectivamente:

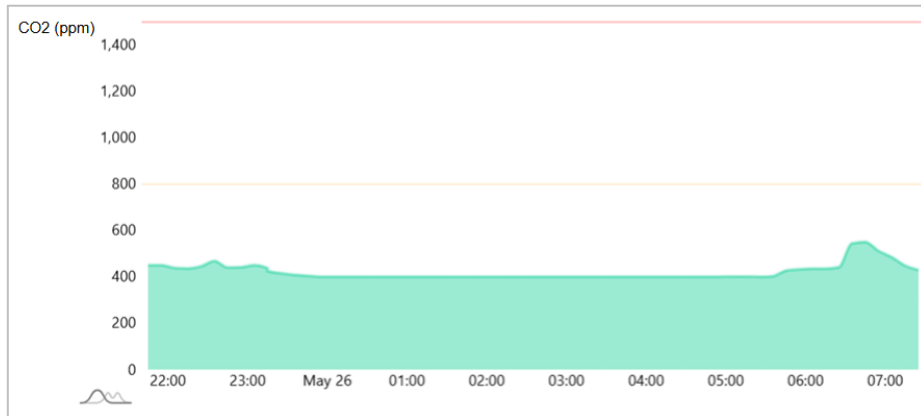


Figura 63. Situación 1 experimento salón por la noche.

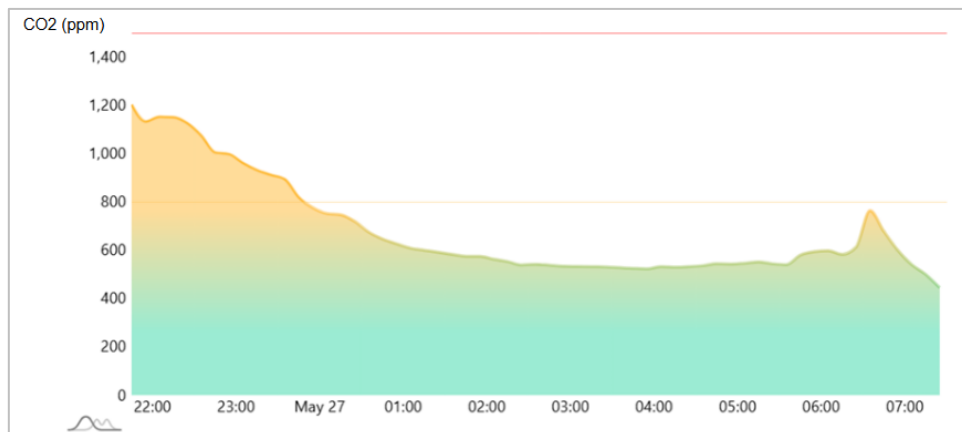


Figura 64. Situación 2 experimento salón por la noche.

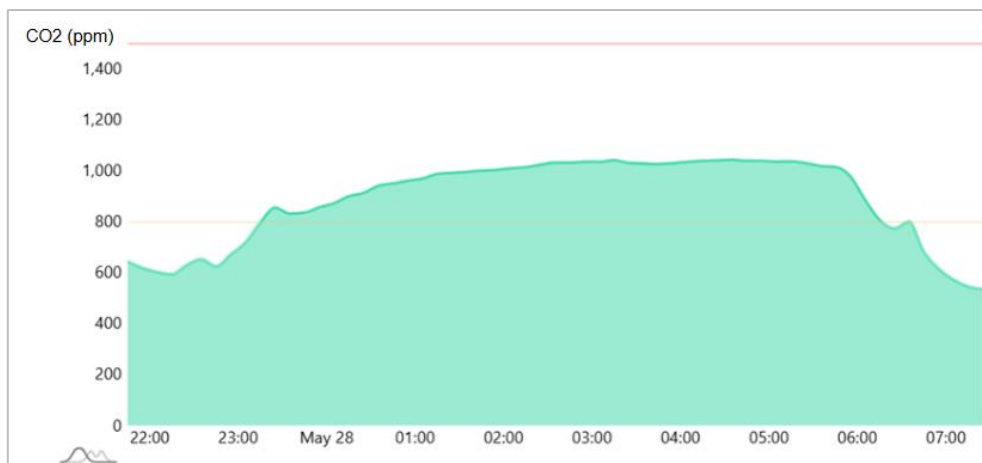


Figura 65. Situación 3 experimento salón por la noche

Las mediciones tomadas concuerdan con lo esperado. El hecho de que haya una persona durmiendo en el salón provoca que la concentración de  $CO_2$  aumente. Sin embargo, si se mantienen unas buenas condiciones que permitan la correcta renovación del aire, no se llega a niveles que pudiesen ser nocivos.

Por otro lado, si por el contrario se aísla lo máximo posible el salón (situación 3), se observa como los niveles de  $CO_2$  están por encima del umbral en prácticamente la totalidad del tiempo de descanso. Aunque este experimento se ha realizado en el salón, los resultados son aplicables a cualquier otra habitación, como son por ejemplo los dormitorios.

En verano, siempre que las condiciones meteorológicas lo permitan, sería aconsejable mantener ventanas y puertas abiertas para que se produzca intercambio del aire interior más cargado con el aire exterior en el caso de ventanas y aumentando el volumen en el caso de las puertas que comunican con otras estancias de la vivienda, consiguiendo así aumentar la capacidad de dilución. Si no es posible, como es el caso de la época de invierno, cuando las temperaturas exteriores no permiten abrir las ventanas para dormir, al menos se debería mantener la puerta abierta para que el aire respirado esté menos contaminado, ya que por lo menos se distribuye por el resto de la vivienda y no queda concentrado en una sola habitación (se aumenta el volumen, como se comentaba anteriormente).

En el hipotético caso de que hubiera otra persona durmiendo con la primera, el aumento en la concentración sería el doble (aproximadamente unas 500 ppm) y por tanto sería todavía más importante evitar tener tanto ventanas como puertas cerradas.

#### ***Rociado de un ambientador en spray con fragancia floral***

El uso de ambientador es muy extendido en los hogares, ya que estos ayudan a eliminar los malos olores y proporcionan una fragancia al gusto del consumidor. Para el experimento se ha rociado el ambientador en spray mostrado en la figura 66:



**Figura 66. Ambientador en spray fragancia floral**

Si se mira en la parte posterior del frasco se pueden leer que sus componentes principales son los hidrocarburos alifáticos (figura 67), compuestos químicos generalmente orgánicos y que se evaporan fácilmente (volátiles), es decir, COV'S:



Figura 67. Componentes ambientador en spray fragancia floral

Como resultado de su rociado se obtienen las siguientes evoluciones de los contaminantes (figuras 68, 69 y 70):

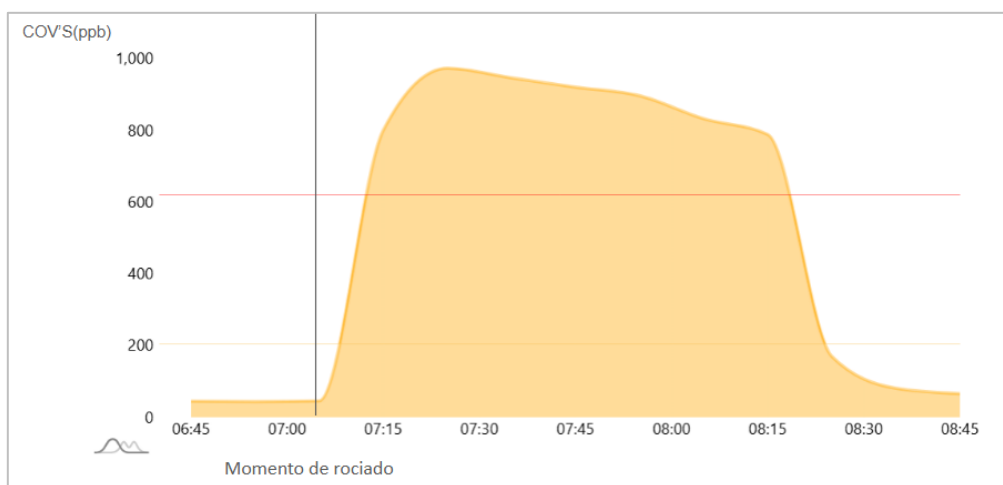


Figura 68. Aumento de COV'S al rociar ambientador en spray fragancia floral

Obviamente se observa un gran incremento en la concentración de COV'S debido a la composición de este tipo de sprays con fragancias.

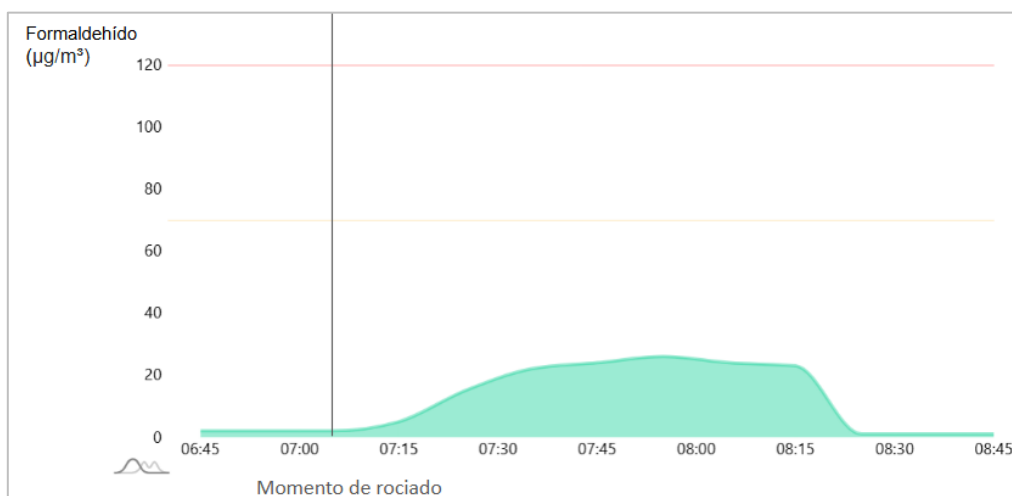


Figura 69. Aumento de formaldehído al rociar ambientador en spray fragancia floral

Aunque el formaldehído no se encuentra entre los componentes usuales de un ambientador de este tipo, sí que se observa un aumento notable de él. Esto es porque algunos de los COV'S emitidos por el ambientador, especialmente terpenos, son muy reactivos con el ozono, dando así lugar a la formación de formaldehído.

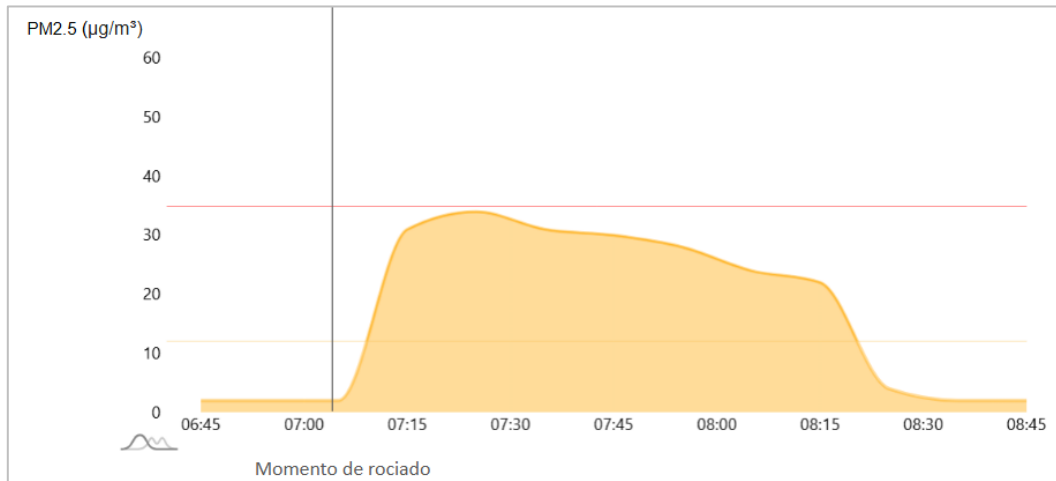


Figura 70. Aumento de partículas en suspensión al rociar ambientador en spray fragancia floral

Al ser un spray se observa el consecuente aumento de partículas en suspensión.

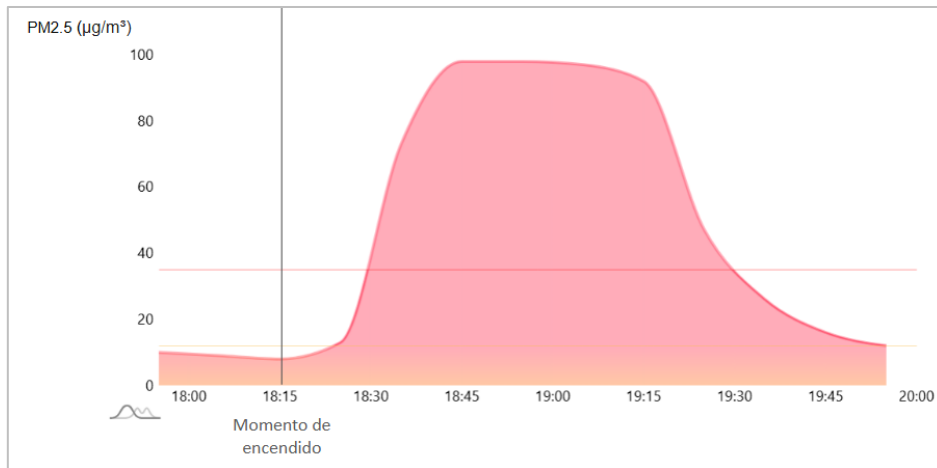
#### *Efecto de encender incienso*

Para este experimento se encienden tres barras de incienso del paquete mostrado en la figura 71:



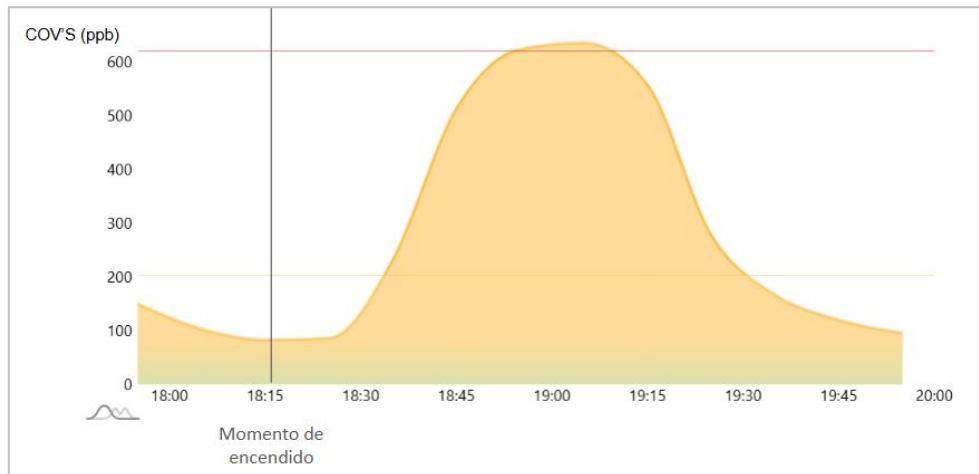
Figura 71. Incienso con olor a rosa

Al encender las barras de incienso se observa como aumentan varios contaminantes:

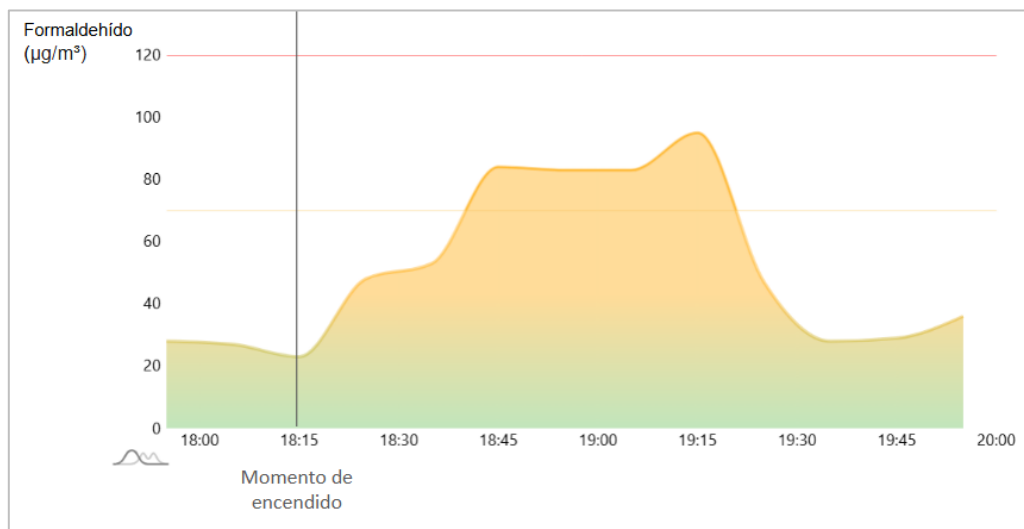


**Figura 72. Aumento de partículas en suspensión al encender incienso**

Aumenta la concentración de materia particulada (figura 72), lo que es lógico ya que se están quemando las barras. Las partículas emitidas se deben al humo resultante, junto con más cosas como las cenizas o partes no quemadas de las barras. Al quemar incienso se produce una combustión incompleta.



**Figura 73. Aumento de COV'S al encender incienso**



**Figura 74. Aumento de formaldehído al encender incienso**

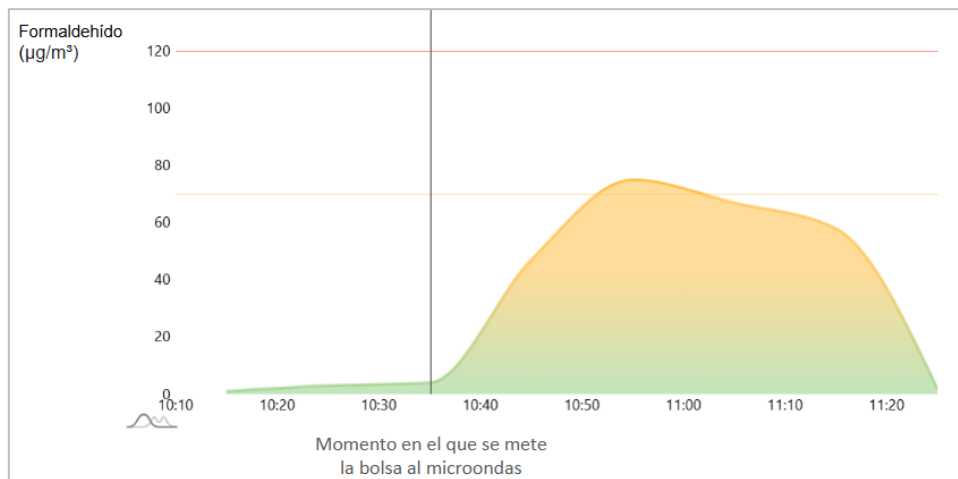
Se observa un significativo aumento de COV'S (figura 73) ya que los aromas del incienso se evaporan al aplicar calor y dan lugar a la liberación de estos contaminantes. Así mismo también se eleva la concentración de formaldehído (figura 74) debido a que este se produce como subproducto de la combustión incompleta debido a la degradación térmica de los compuestos orgánicos que contienen las barras.

El uso de incienso es bastante variado (desde encenderlo para mejorar el olor del hogar hasta hacerlo para crear ambiente relajante para meditar, por ejemplo) y son muchas las personas que, aun haciendo uso de él, no son conscientes del riesgo que este puede suponer, sobre todo cuando ese uso es frecuente.

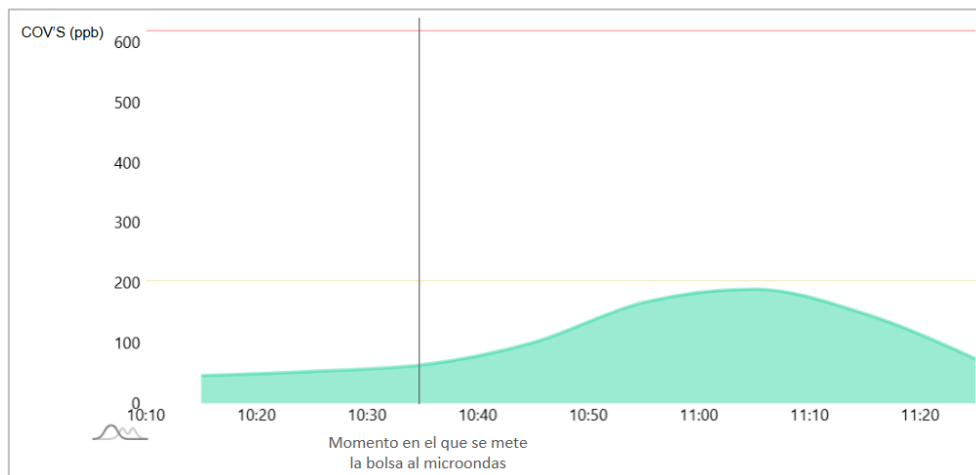
### **Bolsa de palomitas para el microondas**

Las bolsas de palomitas preparadas para ser introducidas al microondas y ser consumidas automáticamente son un producto bastante consumido actualmente, ya que representan una opción rápida y sencilla de poder ingerir palomitas sin tener que hacerlas directamente con maíz natural en una sartén o en una palomitera.

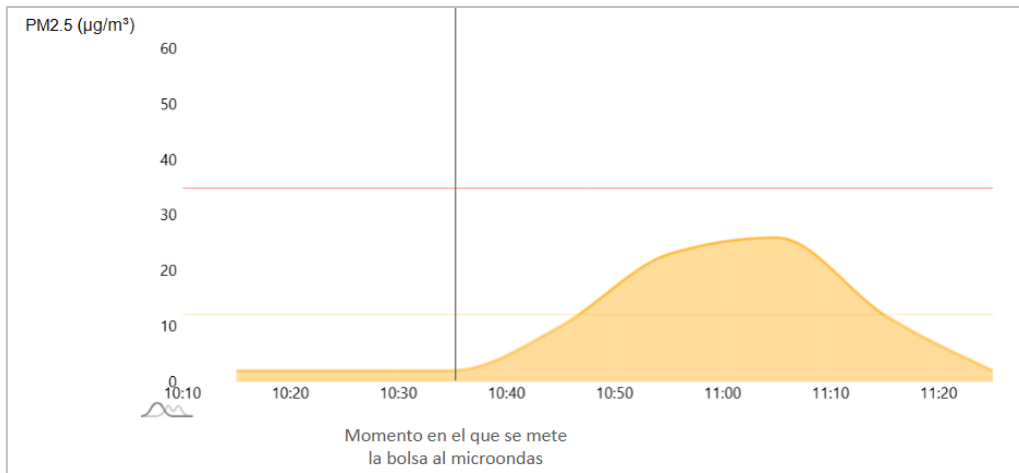
Como resultado de esta acción se recogen las mediciones de las figuras 75, 76 y 77:



**Figura 75. Aumento de formaldehído al poner una bolsa de palomitas en el microondas**



**Figura 76. Aumento de COV'S al poner una bolsa de palomitas en el microondas**



**Figura 77. Aumento de partículas en suspensión al poner una bolsa de palomitas en el microondas**

El aumento de COV'S corresponde a compuestos liberados por grasas y aceites al calentarse, a los aromas y saborizantes artificiales que se evaporan en el microondas y, en algunos casos, puede contribuir también la bolsa que envuelve las palomitas dependiendo de su composición. El formaldehído generado puede ser debido a reacciones secundarias de los COV'S o incluso debido a la descomposición de los propios componentes de las palomitas (aceites y grasas). Cabe destacar que la cantidad de formaldehído emitido es muy alta (concretamente  $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), por lo que este tipo de producto representa un riesgo para la salud humana y su consumo debería ser muy puntual o nulo.

Por último, se produce también un aumento en la concentración de partículas en suspensión atribuible al humo que se produce y a pequeñas gotas de grasa que puedan quedar en el aire.

### **Uso de rotuladores**

Para este experimento se hace uso de dos tipos de rotuladores. El primero es un marcador metálico, el cual se puede utilizar para actividades como colorear o en relación con tareas escolares, por ejemplo. El segundo es un rotulador de la marca Velleda el cual es usado para escribir sobre pizarras blancas.

A continuación se procede a analizar las mediciones obtenidas para cada rotulador:

#### **Rotulador 1: rotulador metálico**



**Figura 78. Rotulador 1**

Se hace uso del rotulador mostrado en la figura 78 durante 37 minutos y se obtiene un aumento de 46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el formaldehído (figura 79) y aumento de COV'S (figura 80):

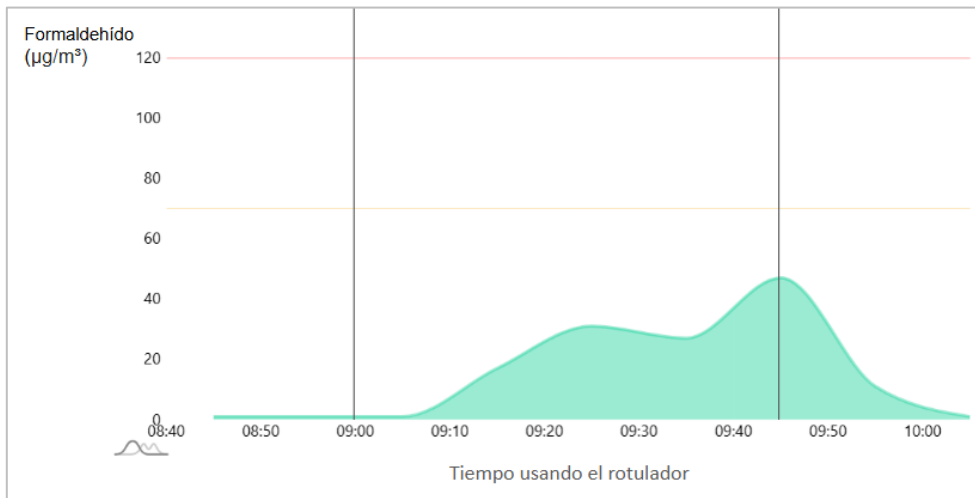


Figura 79. Aumento de formaldehído al hacer uso del rotulador 1

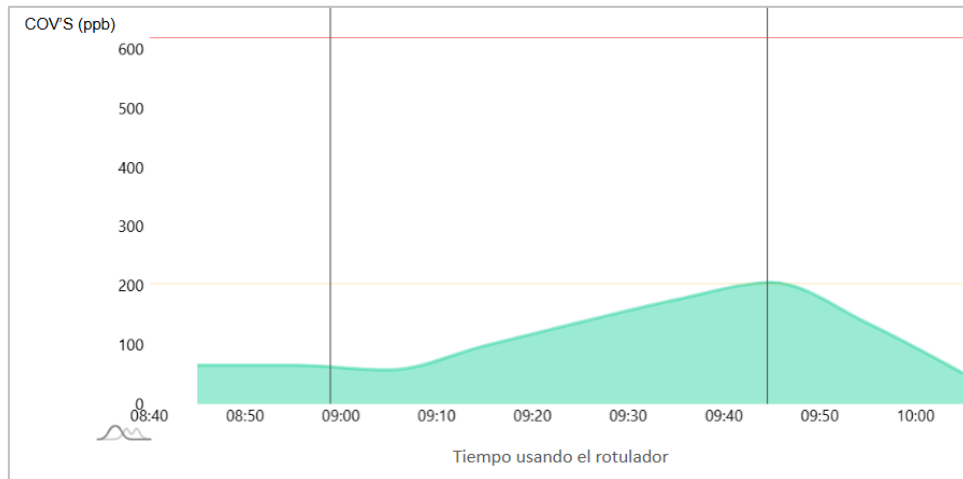


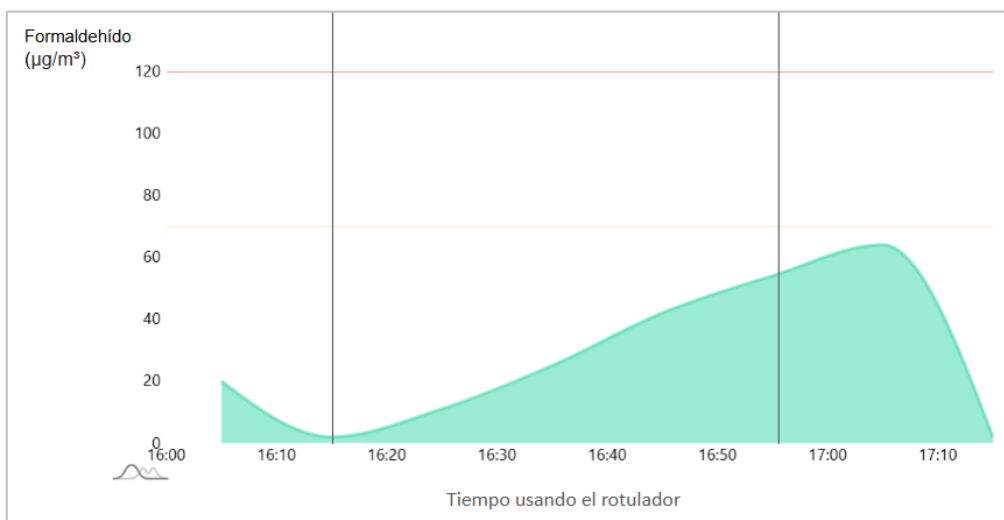
Figura 80. Aumento de COV'S al hacer uso del rotulador 1

Rotulador 2: rotulador Velleda

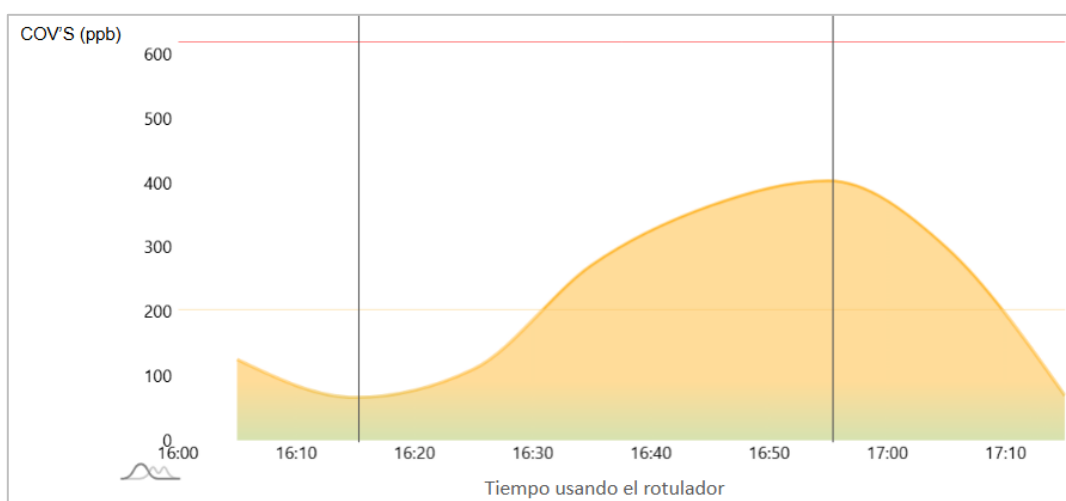


Figura 81. Rotulador 2

Se hace uso del rotulador de la figura 81 durante 41 minutos y se obtiene un aumento de  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el formaldehído (figura 82) y de aumento de COV'S (figura 83):



**Figura 82. Aumento de formaldehído al hacer uso del rotulador 2**



**Figura 83. Aumento de COV'S al hacer uso del rotulador 2**

### Interpretación

Los rotuladores poseen solventes volátiles los cuales sirven para disolver el pigmento deseado, por lo que al hacer uso de ellos los COV'S son fácilmente emitidos. A su vez, el formaldehído puede provenir de la degradación de alguno de estos COV'S o por estar presente en pequeñas cantidades en la propia composición del rotulador.

El rotulador 2 emite mayores cantidades de ambos contaminantes debido a que los rotuladores utilizados para pizarras blancas están compuestos por COV'S más activos, con olor más fuerte y de evaporación aún más rápida que los pensados para uso en papel.

### **Encendido de velas aromáticas**

Se encienden las diez velas de un pack de velas aromáticas con olor a lavanda (figuras 84 y 85):



Figura 84. Pack de velas olor lavanda



Figura 85. 10 velas olor lavanda encendidas

Se procede a analizar las mediciones tomadas durante el experimento:

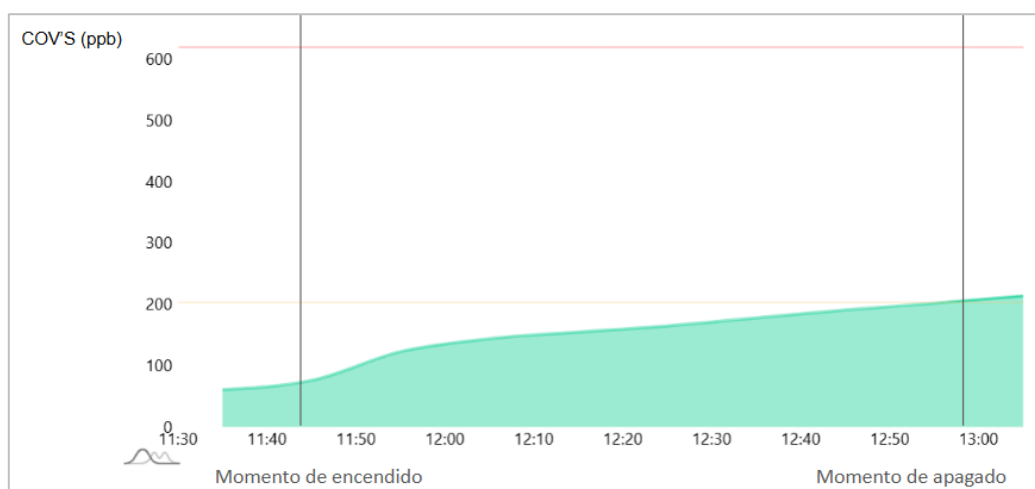
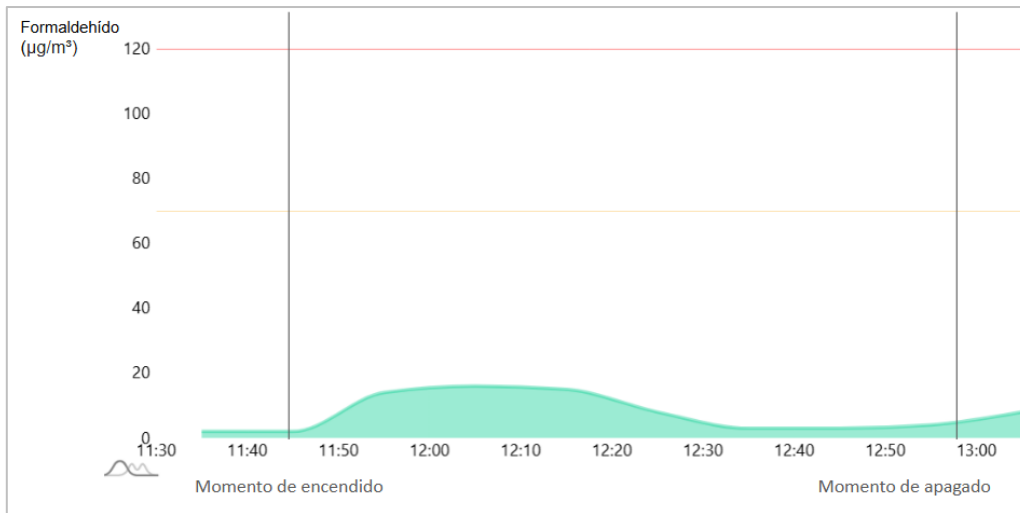


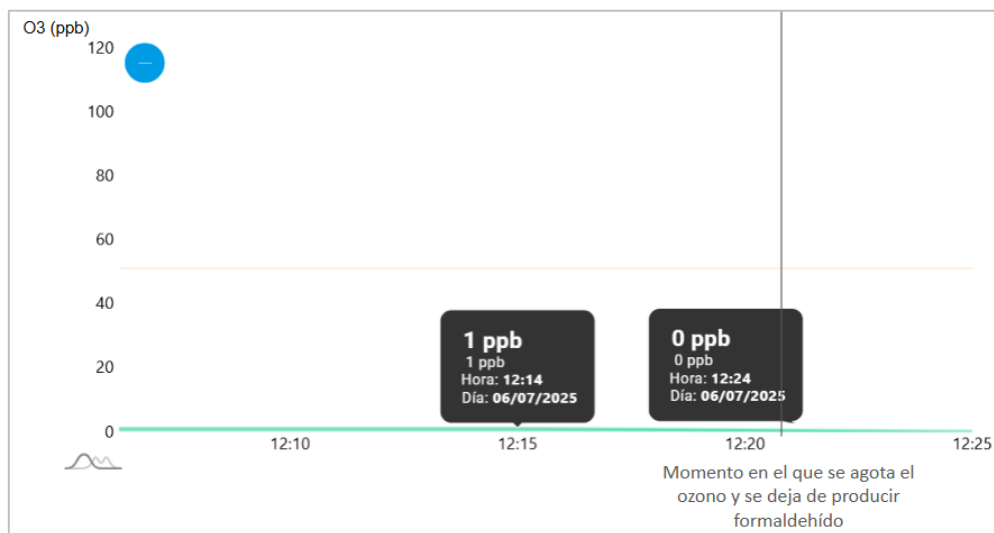
Figura 86. Aumento de COV'S al encender 10 velas aromáticas

Por un lado, los COV'S aumentan de manera prácticamente lineal con el tiempo, pero no de forma brusca, sino progresivamente de manera lenta (figura 86). No se produce un pico como en otras ocasiones, pero no por ello es menos significativo ni se puede despreciar.



**Figura 87. Aumento de formaldehído al encender 10 velas aromáticas**

Sin embargo, se observa como la concentración de formaldehído aumenta inicialmente, pero tras un periodo de tiempo de aproximadamente media hora comienza a decrecer hasta quedarse en un valor bajo (figura 87). Se han analizado los niveles de ozono y coincide el momento de descenso del formaldehído con el momento en el que el ozono presente se vuelve nulo (figura 88).



**Figura 88. Consumo de ozono con los COV'S emitidos por velas aromáticas**

Al no quedar ozono con el que los COV'S puedan reaccionar la formación de formaldehído se detiene y el ya formado se diluye.

Por otro lado, durante el periodo en el que las velas están encendidas el nivel de partículas permanece constante. Al soplar para apagar las velas el humo hace que la concentración aumente de manera rápida, tal y como se muestra en la figura 89:

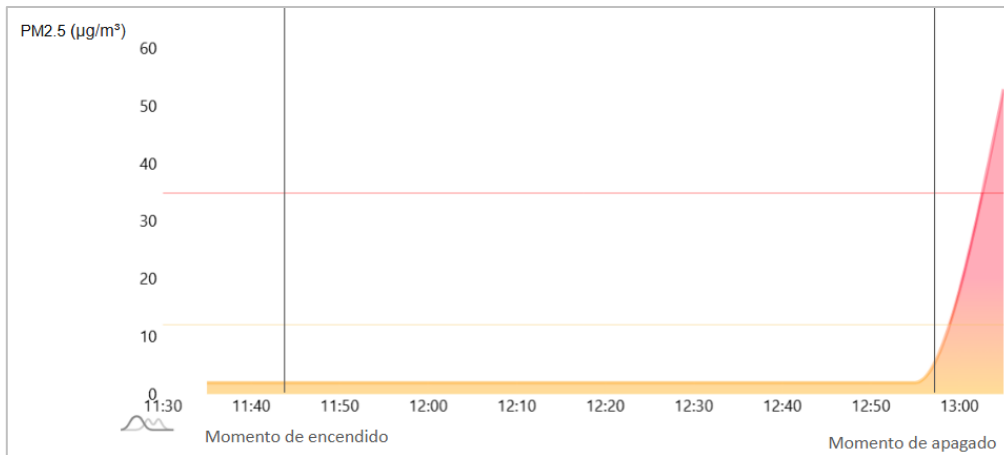


Figura 89. Aumento de partículas en suspensión al encender 10 velas aromáticas

### Varitas difusoras de aroma

Las varitas difusoras de aroma pueden verse como una opción fácil y duradera para tener un olor agradable que perdure en el hogar. Además, al usarse las varitas pudiera parecer que el aroma saliese de manera más controlada y pudiera ser menos peligroso que otro tipo de ambientadores, como el comentado anteriormente de fragancia floral.

Las varitas difusoras de aroma utilizadas para el experimento poseen olor a lavanda y se corresponden con los mostrados en las figuras 90 y 91:



Figura 90. Varitas difusoras de aroma olor lavanda



Figura 91. Varitas introducidas en bote en dejados en la sala

A pesar de lo comentado en el párrafo anterior, al analizar las mediciones correspondientes al periodo de tiempo en el que se deja el bote con las varitas introducidas, se observa que la realidad no coincide con los que mucha gente pudiese creer en un principio.

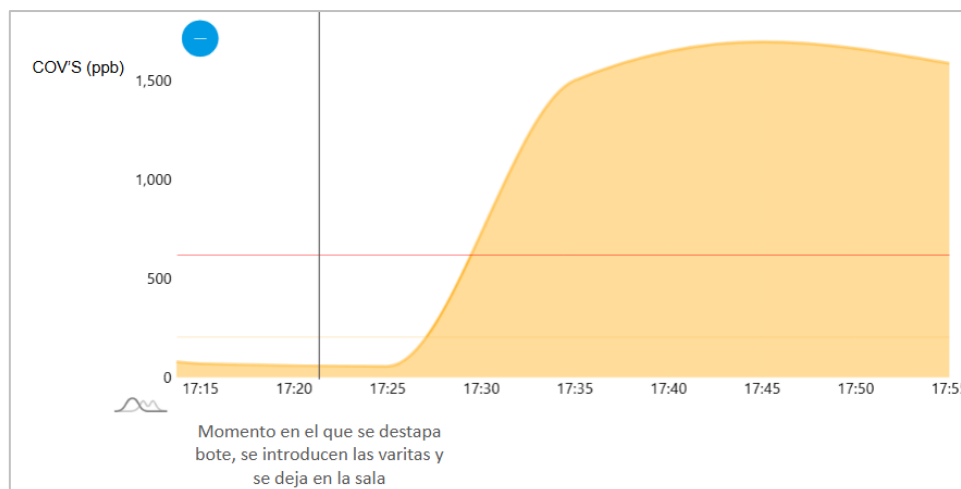


Figura 92. Aumento de COV'S al hacer uso de varitas difusoras de aroma olor lavanda

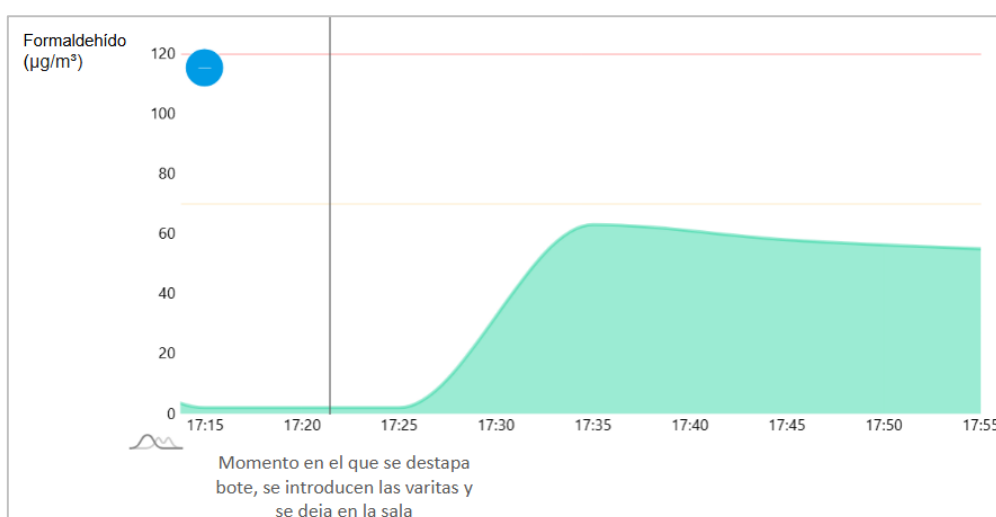
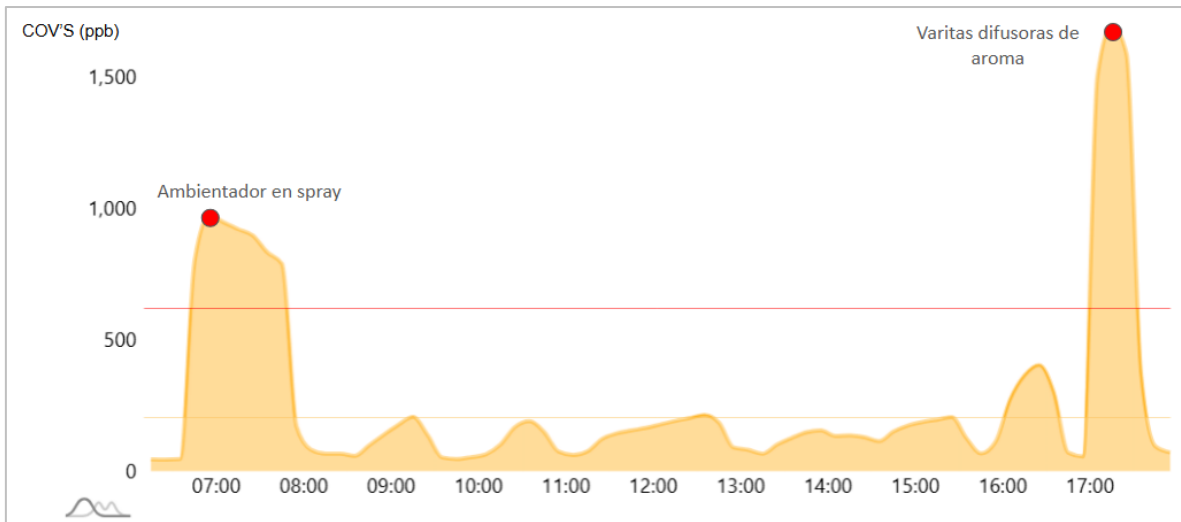


Figura 93. Aumento de formaldehído al hacer uso de varitas difusoras de aroma olor lavanda

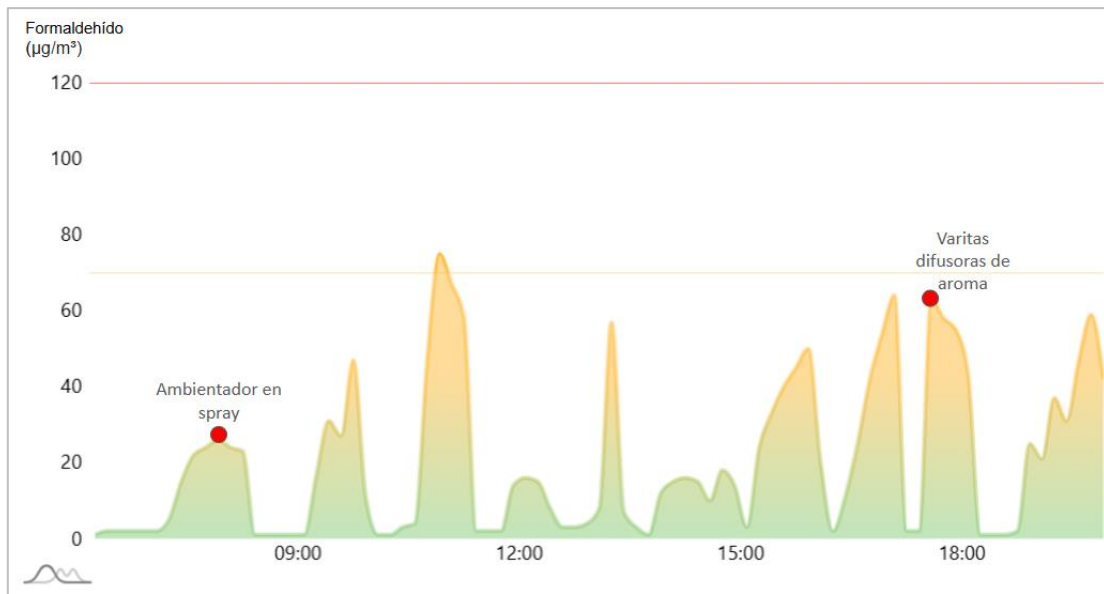
Es llamativa la gran subida de COV'S (figura 92); se alcanzan unos niveles muy altos y potencialmente peligrosos debido a la presencia de este tipo de producto, el cual en ocasiones está presente incluso en habitaciones donde se duerme o se está por un tiempo prolongado. En el experimento solo se deja en la sala por media hora, pero aunque si bien es cierto que con el paso del tiempo el olor desprendido será menor y por tanto, las emisiones de COV'S también lo serán, es necesario crear conciencia sobre el peligro que puede suponer tener este producto a largo plazo presente en la vivienda. En concreto, preocupa el aumento de formaldehído (figura 93), ya que es uno de los COV'S más nocivos y se observa que se forma como subproducto de COV'S reactivos (en general terpenos, como el limoneno) al reaccionar con el ozono presente en el aire (ya que el líquido del bote de las varitas no suele tener formaldehído entre sus componentes).

A continuación se muestra en la figura 94 como haciendo uso de las varitas se alcanzan valores de COV'S sorprendentemente altos, superiores a los alcanzados previamente por el ambientador en spray (que también había superado el valor límite admisible para la salud humana):



**Figura 94. Emisiones de COV'S debidas al uso de ambientador en spray comparadas con las debidas al uso de varitas difusoras de aroma.**

Además de ser superiores las emisiones de COV'S, también lo son las de formaldehído (figura 95), compuesto orgánico volátil muy nocivo.



**Figura 95. Emisiones de formaldehído debidas al uso de ambientador en spray comparadas con las debidas al uso de varitas difusoras de aroma.**

***Aceite esencial con olor a pino (en humidificador con agua destilada)***

Se rellena un humidificador de ultrasonidos con agua destilada (agua adecuada para ello, como se ha visto anteriormente) y se añaden dos gotas de un aceite esencial con olor a pino (figura 96).



Figura 96. Aceite esencial con olor a pino

Como resultado se obtienen las evoluciones de los contaminantes mostradas en las figuras 97, 98 y 99:

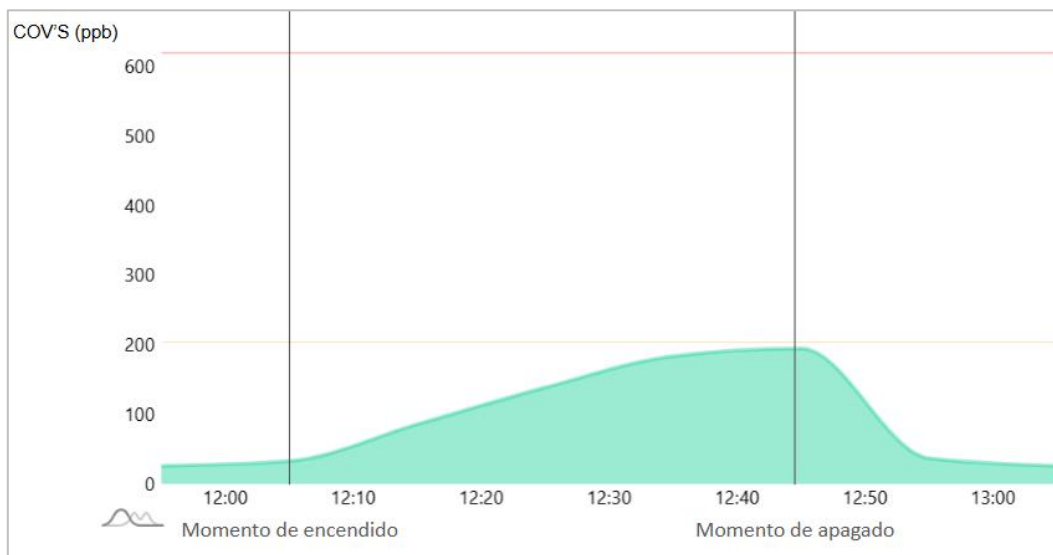


Figura 97. Aumento de COV'S al hacer uso de aceites esenciales en humidificador

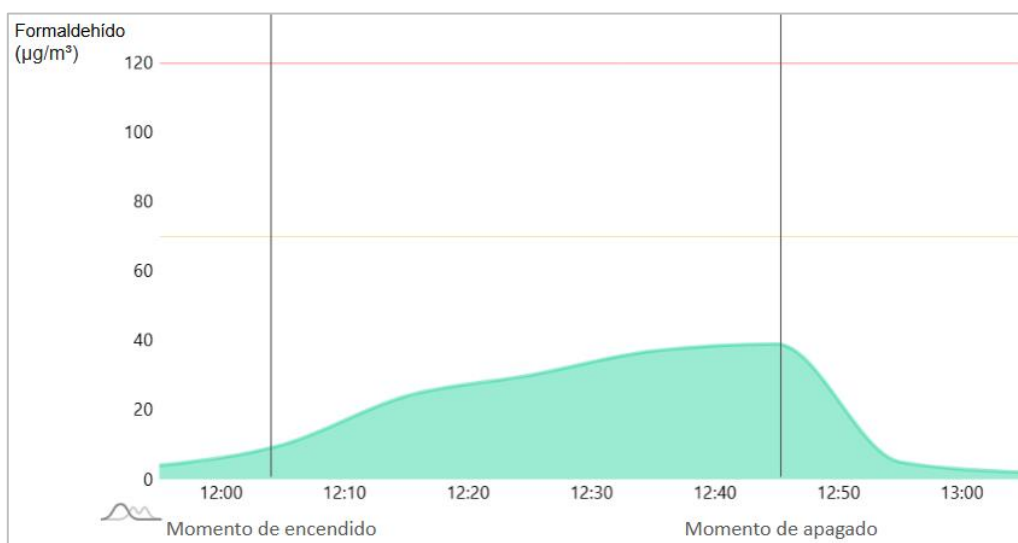
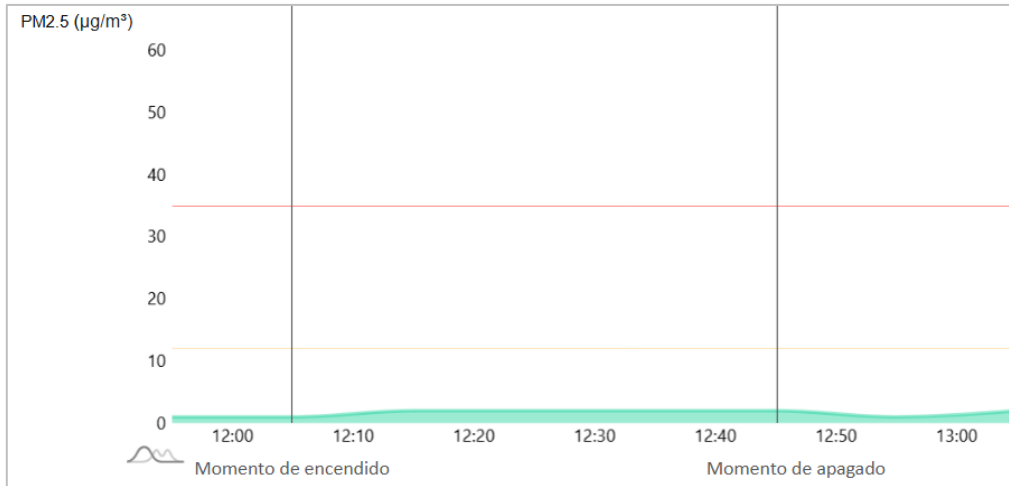


Figura 98. Aumento de formaldehído al hacer uso de aceites esenciales en humidificador

Se emiten COV'S (figura 97) debido a que el aceite esencial está compuesto por componentes que se evaporan fácilmente y estos pasan al aire cuando se pone en funcionamiento el humidificador. Por otro lado, aunque el aceite esencial no posee formaldehído entre sus componentes, sí que contiene terpenos, los cuales son muy reactivos con el ozono y dan como subproducto formaldehído y otros contaminantes secundarios (figura 98).

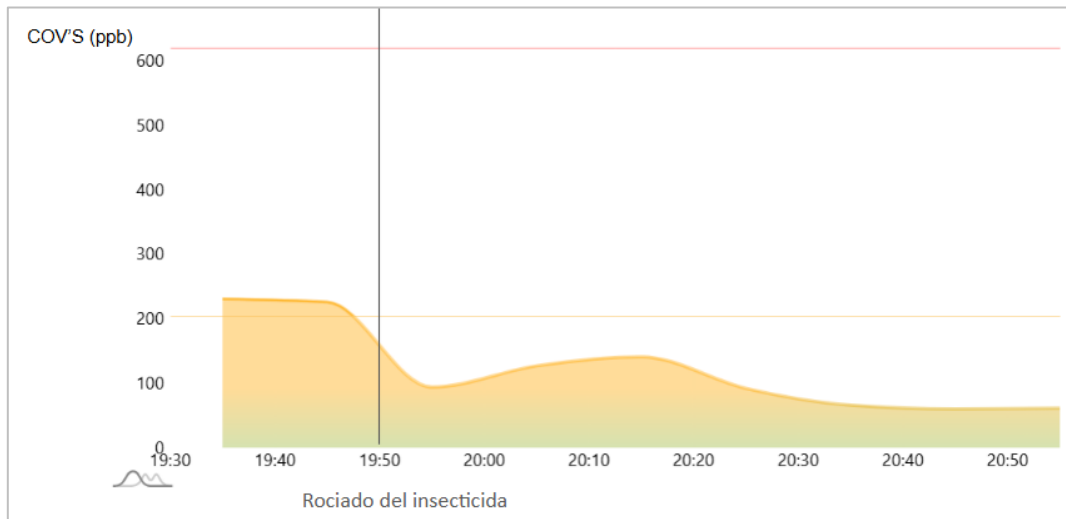


**Figura 99. Despreciable aumento de partículas en suspensión al hacer uso de aceites esenciales en humidificador**

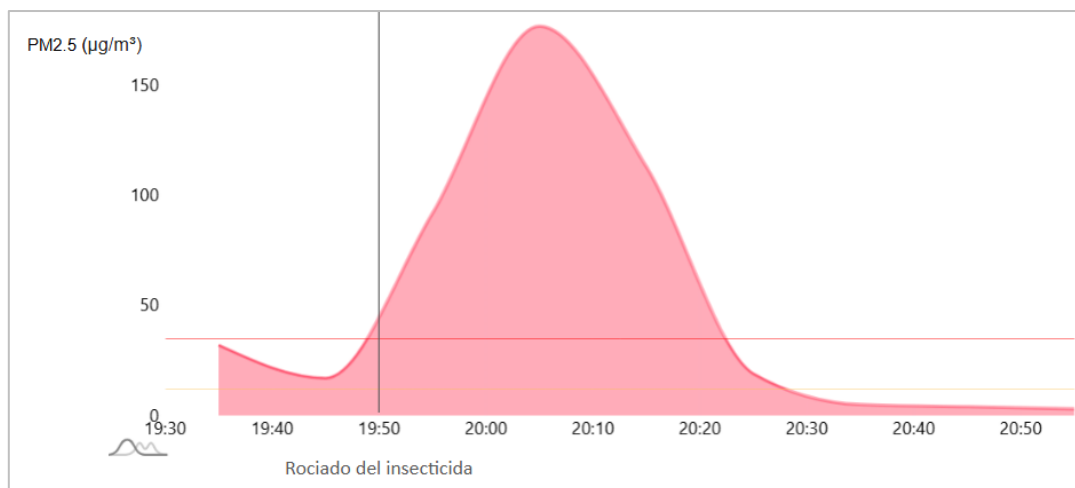
Al hacer uso de agua destilada y añadir una cantidad pequeña de aceite (la recomendada por el fabricante concretamente) las partículas emitidas son despreciables (figura 99).

**Rociado de insecticida**

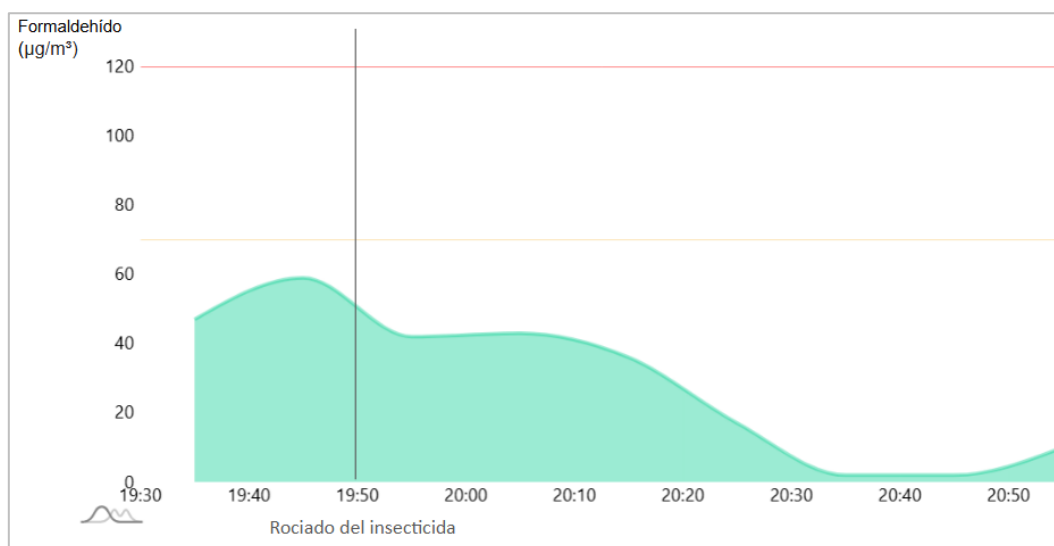
Se rocía insecticida para analizar la evolución de los parámetros, obteniéndose las siguientes mediciones (figuras 100, 101 y 102):



**Figura 100. Aumento de COV'S al rociar insecticida**



**Figura 101. Aumento de partículas en suspensión al rociar insecticida**



**Figura 102. Formaldehído no varía al rociar insecticida**

Al ser spray se obtiene de nuevo un aumento de las partículas en suspensión. Se observa un aumento de COV'S, pero no de formaldehído. Esto es debido a que el formaldehído no es componente del insecticida y tampoco se produce como subproducto inmediato, ya que los COV'S contenidos por el insecticida no tienen grupos funcionales muy reactivos, por lo que no reaccionan con el ozono y no se forma formaldehído ni otros contaminantes secundarios. Los COV'S son emitidos debido a las fragancias, solventes y propulsores que presenta el insecticida.

## ANEXO 2. Complemento de los experimentos apartado 4 memoria: concentración inicial de COV'S intermedia

Como se comenta en la memoria, se realiza un experimento partiendo de una concentración inicial de COV'S de  $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se deja en funcionamiento el purificador de iones aproximadamente tres horas. Aunque numéricamente el resultado de las mediciones es diferente al obtenido en el experimento en el cual se parte de concentraciones de COV'S iniciales más bajas, la interpretación y el razonamiento es el mismo para ambos casos.

De igual manera que en el caso anterior, disminuye la materia particulada (figura 103), la concentración de ozono medido no sufre variaciones significativas (figura 104) y los COV'S y el formaldehído aumentan (figuras 105 y 106, respectivamente), lo que puede ser debido a la reacción de los COV'S iniciales con el ozono generado (que posiblemente no es detectado por el medidor MICA WELL porque a medida que se genera se consume en la reacción para producir formaldehído y contaminantes secundarios). Esto es una hipótesis que explica el aumento de formaldehído y la prácticamente nula variación de la concentración de ozono, sin embargo, no se pueden aportar evidencias de que se esté generando ozono.

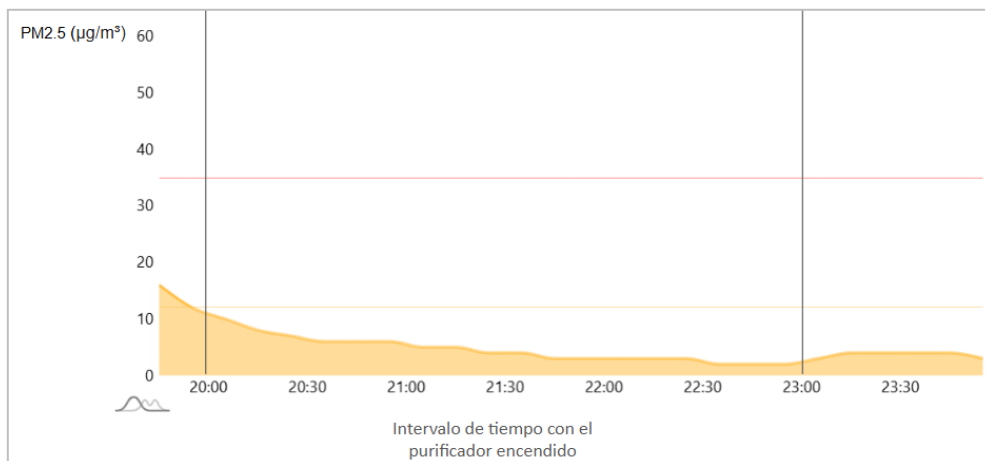


Figura 103. Evolución de la concentración de partículas al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S

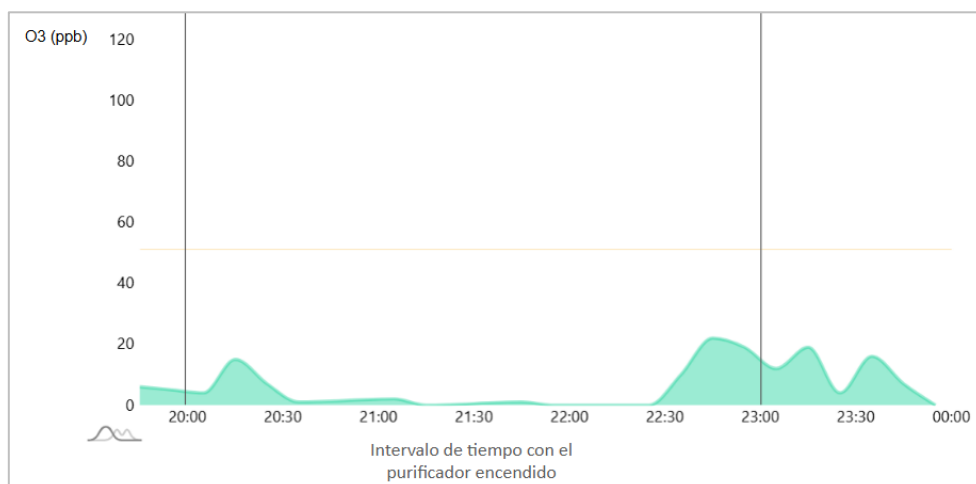


Figura 104. Evolución de la concentración de ozono al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S

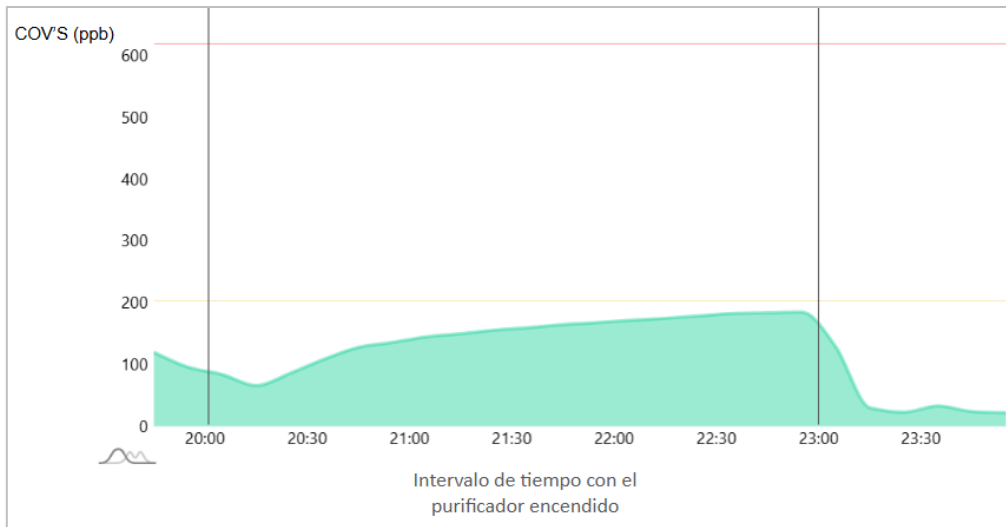


Figura 105. Evolución de la concentración de COV'S al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S

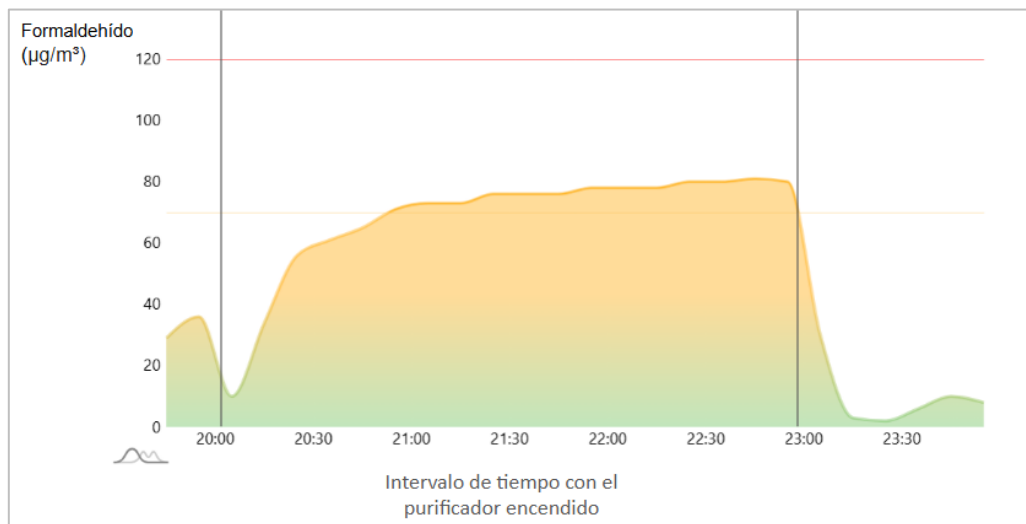


Figura 106 Evolución de la concentración de formaldehído al hacer uso de un purificador de iones, partiendo de una concentración intermedia de COV'S

## ANEXO 3. Justificación de la elección de medidores

Para poder tomar mediciones en continuo en este trabajo se ha optado por utilizar medidores de la marca inBiot. Como justificación se ha argumentado que se ha realizado una revisión de trabajos fin de estudios presentados en años anteriores por alumnos de la universidad. Sin embargo, es conveniente hacer un repaso de los medidores planteados inicialmente y de la ventaja que presentan los medidores inBiot sobre los otros, motivo por el que han sido escogidos.

Los medidores comparados inicialmente fueron AirCheq Pro Aero (AirTeq), AQsensor Ultra, AM300(L) Series (Milesight) y, el seleccionado finalmente, MICA (inBiot).

En la tabla de la figura 107 se muestran los parámetros medidos por cada medidor:

	Mediciones								
	Temperatura	Humedad relativa	CO <sub>2</sub>	TVOC	Formaldehído	PM1.0	PM2.5	PM10	Presión atmosférica
<b>MICA</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	
<b>AirCheq Pro Aero</b>	X	X	X	X		X	X	X	
<b>AQsensor Ultra</b>	X	X	X	X		X	X	X	X
<b>AM300L Series</b>	X	X	X	X	X		X	X	X

Figura 107. Parámetros medidos por medidores comparados. Fuente: Trabajo fin de grado Ana Pilar Gimeno Sobreviela

Los medidores MICA y AM300(L) Series miden el formaldehído, contaminante el cual se debe controlar debido a su peligrosidad, lo que supone un punto a favor de estos. Además, el dispositivo MICA detecta las PM1.0, partículas especialmente peligrosas debido a su extremadamente pequeño diámetro, a diferencia del AM300(L) Series que no lo hace.

Para cada uno de los parámetros medidos los medidores comparados presentan los rangos y precisión de medidas mostrados en la tabla de la figura 108:

		MICA	AirCheq Pro Aero	AQsensor Ultra	AM300L series
<b>Temperatura (°C)</b>	Rango	-40 -145	-40 - 90		-20-60
	Precisión	±0,5	±0,3	±0,5	±0,2
<b>Humedad relativa (%)</b>	Rango	0 - 100	0 - 99	0 - 100	0 - 100
	Precisión	±2	±2	±1,8	±2
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	Rango	400 - 10000	300 - 5000	Hasta 5000	400 - 5000
	Precisión	±30 + 3% m.v.	3%/40ppm	±50 + 5% of reading	± 30 + 3 % of reading
<b>TVOC</b>	Rango	0 – 2383 ppb	1 - 500 (index)	Hasta 29206 ppb	1.00-5.00 (IAQRating) *
	Precisión	± 15% m.v.	±15	± 12%	±1
<b>PM2.5 (µg/m<sup>3</sup>)</b>	Rango	0 - 1000	0 - 1000	Hasta 2000	0 - 1000
	Precisión	±5% m.v. & 5 (0 -100) ±10% m.v. (101-1000)	±10 (0 -100) ±10% (100 -1000)	± 10%	±10 (0 -100) ±10% (100 - 1000)
<b>Formaldehído</b>	Rango	0 - 1000 ppb	-	-	0 - 1.25 mg/m <sup>3</sup>
	Precisión	±20 ppb o ±20% m.v., el más grande			±10%

Figura 108. Rango y precisión para cada variable de los medidores comparados. Fuente: Trabajo fin de grado Ana Pilar Gimeno Sobreviela

En el caso del medidor AM300(L) Series la concentración de COV'S está indicada en valor relativo, a diferencia del resto de casos.

Las mediciones se toman utilizando diferentes tipos de sensores según el parámetro a medir y según el medidor (figura 109):

	<b>MICA</b>	<b>AirCheq Pro Aero</b>	<b>AQsensor Ultra</b>	<b>AM300L series</b>
<b>Temperatura</b>	CMOS	Termistor HTU21D	PIR remoto termopila	CMOS y MEMS
<b>Humedad relativa</b>	CMOS	Capacitivo HTU21D	Capacitivo	CMOS y MEMS
<b>CO<sub>2</sub></b>	NDIR	NDIR S8 LP (Senseair)	NDIR	NDIR
<b>TVOC</b>	MOx gas sensor	MOx gas sensor SGP40 (Sensirion)	MOx gas sensor	MOx gas sensor
<b>Partículas en suspensión</b>	Láser de partículas	Laser Scattering SPS30 (Sensirion)	Láser	Laser Scattering
<b>Formaldehído</b>	Sensor electroquímico	-	-	Sensor electroquímico

Figura 109. Sensores de los medidores comparados. Fuente: Trabajo fin de grado Ana Pilar Gimeno Sobreviola

Así mismo los medidores pueden utilizar varios tipos de conectividades para el envío de datos. La conectividad de los medidores comparados se recoge en la tabla de la figura 110:

	<b>Conectividad</b>		
	Wi-Fi	GSM	LoRaWAN
<b>MICA</b>	X	X	X
<b>AirCheq Pro Aero</b>	X		
<b>AQsensor Ultra</b>	X		
<b>AM300L Series</b>			X

Figura 110. Conectividad de los medidores comparados. Fuente: Trabajo fin de grado Ana Pilar Gimeno Sobreviola

La elección del uso de los dispositivos inBiot se basa en varias razones. El principal argumento es la variedad ofrecida en cuanto a conectividad para el envío de datos se refiere. También cabe destacar la variedad de parámetros que pueden ser medidos, tal y como se ha argumentado en párrafos anteriores. A esto se le añade la cercanía del servicio técnico, el cual garantiza una solución rápida en caso de problemas de funcionamiento de los dispositivos. Además de este buen trato y atención, se cuenta con la certeza de que la Universidad de Zaragoza ya ha trabajado anteriormente con inBiot para adquirir medidores de la CAI y las prestaciones ofrecidas por estos fueron buenas. Junto a todas estas razones se añade que estos medidores estaban disponibles para ser usados.