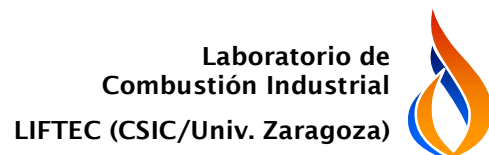


Informe de Proyecto

Realizado para:
Ayuntamiento de Zaragoza



Realizado por:



Medidas de ventilación y CO₂ en establecimientos de hostelería

Convenio firmado entre Ayuntamiento de
Zaragoza y la Universidad de Zaragoza

Febrero, 2021

Medidas de ventilación y CO₂ en establecimientos de hostelería

Realizado para:	Ayuntamiento de Zaragoza
Realizado por:	Laboratorio de Combustión Industrial Grupo perteneciente al LIFTEC (<i>Lab. de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión</i>), Centro Mixto CSIC-Univ. Zaragoza Calle María de Luna, 10; 50018-Zaragoza weblci@unizar.es www.unizar.es/lci
Autores:	Á. Muelas, A. Pina, P. Remacha, E. Tizné, J. Ballester
Referencia:	LCI/21/ 02
Fecha:	Febrero, 2021

Índice

1. Introducción	1.1
2. Metodología.....	2.1
2.1 Sensores de CO ₂	2.1
2.2 Tipos de pruebas	2.2
3. Medidas en la sala Chocolat	3.1
3.1 Prueba sin ocupantes	3.2
3.2 Prueba con ocupantes	3.9
3.3 Resumen y conclusiones.....	3.17
4. Medidas en el local Canterbury.....	4.1
4.1 Prueba sin ocupantes	4.4
4.2 Prueba con ocupantes.....	4.11
4.3 Ensayos en funcionamiento normal	4.20
4.4 Resumen y conclusiones.....	4.21
5. Comentarios finales.....	5.1

Introducción

La relevancia de la transmisión aérea de la COVID-19 se encuentra en la actualidad ampliamente respaldada por numerosos estudios científicos, que demuestran que los aerosoles exhalados por personas infectadas son un importante vector de contagio. Este hecho hace necesaria una evaluación precisa de la calidad del aire existente en todos los espacios compartidos, ya que se ha demostrado que un ambiente saludable y bien ventilado es fundamental para la prevención de infecciones por vía aérea.

Debido a la gran relevancia y urgencia de realizar este tipo de evaluaciones, se están llevando a cabo diversas actuaciones en varios ámbitos, como por ejemplo en las aulas de colegios e institutos, donde alumnos y profesores comparten espacios durante varias horas al día. Como resultado, se han publicado varias guías e informes con recomendaciones en el transcurso de los últimos meses [1-2]. En estos trabajos, además de dar pautas para mantener los espacios comunes bien ventilados y seguros, se destaca el papel del CO₂ como indicador de la calidad del aire, ya que este gas es exhalado junto con los aerosoles potencialmente infecciosos. A diferencia de los aerosoles, el CO₂ es muy fácil de medir mediante dispositivos de bajo coste, por lo que en estas guías se recomienda evaluar la calidad del aire (y, por tanto, el riesgo de contagio por transmisión aérea) a través de medidas de CO₂.

Esta misma metodología de prevención sería perfectamente trasladable a cualquier ambiente en el que un grupo de personas comparten el mismo aire en un recinto cerrado. Un claro ejemplo de ello es la hostelería, sector especialmente golpeado por la pandemia. Es evidente que recintos como bares o restaurantes, en los cuales el uso continuado de mascarilla no siempre es posible, requieren de una elevada calidad del aire como medida fundamental para evitar la transmisión aérea de la COVID-19 en sus interiores. La monitorización continua del CO₂ de la estancia sería, por tanto, una forma sencilla, económica y efectiva para evaluar la seguridad de estos espacios interiores.



Este enfoque presenta además la gran ventaja de la objetividad y la adecuación a cada local. Es indudable que en el sector de la hostelería existe una gran variedad de establecimientos, con distintos tamaños, aforos, sistemas de ventilación, etc. Ante esta enorme heterogeneidad, y la imposibilidad de adaptarse a todos los casos, las medidas de prevención COVID muchas veces optan por aplicar criterios comunes para todos los negocios hosteleros. Prueba de ello son las medidas de restricción de aforo, cuya aplicación típicamente afecta a la totalidad de establecimientos de un territorio, sin tener en cuenta sus distintas capacidades en cuanto a renovación del aire interior. Esto hace que, para un determinado local, un aforo del 30% del original pueda dar como resultado una adecuada calidad del aire, mientras que en otro esta limitación pueda resultar insuficiente. De esta forma, si un establecimiento está equipado con un potente sistema de extracción con entrada de aire exterior, tal vez podría aumentarse el aforo por encima del 30% sin riesgo significativo para clientes ni trabajadores. En vista de las grandes diferencias esperables entre locales, especialmente en cuanto a la tasa de renovación de aire, el uso de analizadores de CO₂ como medio de monitorización de la calidad del aire interior, así como herramienta de evaluación objetiva del riesgo de contagio, resultaría una solución adecuada para la creación de espacios seguros ante la transmisión aérea de enfermedades.

En las últimas semanas, varias administraciones públicas se han hecho eco de esta posibilidad para la reducción del riesgo de contagio en interiores. Un claro ejemplo de ello es la obligatoriedad en la CCAA de Islas Baleares de la instalación de medidores de CO₂ en todos los establecimientos de entretenimiento y restauración, de acuerdo con [3], donde se especifica además que la concentración de CO₂ no deberá superar en ningún momento las 800 partes por millón (ppm). En caso de superarse, se indica que, o bien se incrementa la ventilación, o debe disminuirse el aforo hasta situarse por debajo de este nivel. Similares medidas se plantean en otras regiones, como por ejemplo la Comunidad de Madrid, donde recientemente se ha publicado una guía de buenas prácticas de ventilación en el sector hostelero [4], recomendando también no superar en ningún momento las 800 ppm.

En este contexto, se plantea el presente estudio piloto sobre la calidad del aire interior de dos establecimientos hosteleros, la sala Chocolat y el bar Canterbury-Salamero, en el marco de un convenio de colaboración con el Ayuntamiento de Zaragoza. La elección de estos locales se basa en su representatividad dentro de dos tipologías existentes en el vasto conglomerado de locales hosteleros de la ciudad, siendo el primero una sala de baile de unos 130 m² de superficie, y el segundo un pub-cafetería de más de 290 m². Este estudio plantea una caracterización detallada de los sistemas de renovación de aire existentes en estos dos establecimientos, variable fundamental para la obtención de un ambiente saludable. Por ello, como se detallará más adelante, se han realizado pruebas con el objetivo de estudiar la capacidad de los sistemas de ventilación forzada de cada



establecimiento a la hora de renovar el aire, tanto en circunstancias de ocupación elevada, como con el local vacío.

El registro de los niveles de CO₂ en distintas zonas del local y bajo varias condiciones permitirá obtener información detallada acerca del proceso de ventilación de estos establecimientos, así como estimar su adecuación en cuanto a la minimización del riesgo de contagio en interiores. Ante la ausencia de estudios previos de este tipo orientados a la prevención COVID, ha sido necesario desarrollar y aplicar una metodología propia, tanto para la adquisición de las medidas como para el análisis de resultados.

Referencias

[1] Minguillón, M. C., Querol, X., Felisi, J. M., & Garrido, T. (2020). Guía para ventilación de las aulas. IDAEA-CSIC y Mesura. Disponible en:

https://www.csic.es/sites/default/files/guia_para_ventilacion_en_aulas_csic-mesura.pdf

[2] Ventilación natural en las aulas: guía práctica (2020). LIFTEC, CSIC - Universidad de Zaragoza. Disponible en:

<https://www.tinyurl.com/GuiaVentilacion>

[3] Acuerdo del Consejo De Gobierno de las Islas Baleares de 27 de noviembre de 2020, por el que se establecen los niveles de alerta sanitaria y se aprueba el nuevo plan de medidas excepcionales de prevención, contención y coordinación para hacer frente a la crisis sanitaria ocasionada por la COVID-19 (2020). Boletín Oficial de las Islas Baleares Número 201, Fascículo 204, sección III, p. 40785.

[4] Guía de buenas prácticas de ventilación en el sector de la hostelería (2021). Consejería de Sanidad de la CCAA de Madrid. Disponible en:

https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/sanidad/samb/guia_ventilacion_hosteleria.pdf

Metodología

2.1 Analizadores de CO₂

Para la realización de este estudio se han utilizado analizadores de CO₂ Aranet 4 Pro, los cuales basan su funcionamiento en la tecnología NDIR (infrarrojo no dispersivo). Este modelo es capaz de registrar 1 dato cada minuto, con una respuesta notablemente rápida ante cambios bruscos de concentración de CO₂, motivo por el cual se considera un sensor de bajo coste especialmente indicado para este estudio. En la Figura 1 se muestra una imagen de uno de estos sensores, así como su instalación sobre trípodes en el interior de la sala Chocolat.



Figura 1. Analizador Aranet4 Pro (izquierda) y ejemplo de su montaje sobre trípodes en la sala Chocolat (derecha).

Respecto al registro de datos, estos analizadores cuentan con conectividad por radio, lo cual les permite transmitir la información a una base que, conectada a un PC, representa en tiempo real y almacena la lectura de hasta 12 analizadores. Para la realización de las pruebas de este estudio se utilizaron un total de 24 sensores, junto con 2 bases.



2.2 Tipos de pruebas

Para la consecución de sus objetivos, el presente estudio plantea dos tipos de pruebas, cada una de ellas basada en una metodología distinta.

2.2.1 Medidas con hielo seco

Este tipo de medidas tienen como objetivo evaluar la capacidad de renovación de aire de los sistemas de ventilación forzada de cada local. En este punto parece indicado apuntar que estos sistemas de ventilación de aire disponen de una serie de características técnicas que permitirían, de forma teórica, estimar las renovaciones de aire por hora alcanzables para cada nivel de potencia del sistema. Sin embargo, en este estudio se ha preferido medir experimentalmente este parámetro, comprobando de esta forma posibles derivas o discrepancias entre el funcionamiento real del sistema de ventilación y aquel especificado en el momento de su instalación.

Para lograr este objetivo, una buena opción consiste en disponer de un ambiente de elevada concentración en CO₂, pero sin ocupación de personas y, por consiguiente, sin ninguna fuente emisora de este gas. La activación de los sistemas de extracción de aire en esta situación debería conseguir la progresiva renovación del aire del local mediante la salida de aire interior (rico en CO₂) y la entrada de aire externo (con la concentración de CO₂ habitual en la calle, cercana a 416 ppm). La monitorización del nivel de CO₂ del interior del local por medio de los analizadores descritos en el apartado anterior permitiría, por tanto, la estimación de la tasa de renovación de aire real del local.

Este tipo de pruebas requieren de una concentración inicial de CO₂ relativamente elevada (p.ej., en el entorno de 2000-2500 ppm), de forma que pueda apreciarse con claridad el efecto de la ventilación a la hora de reducir estos niveles mediante la entrada de aire exterior. Para conseguir este nivel, la mejor opción es el sembrado con CO₂ artificial. En concreto, se ha utilizado CO₂ en estado sólido, comúnmente llamado hielo seco. Tras distribuir los pellets de hielo seco en distintos puntos del local, éstos pasan rápidamente a estado gas debido a la baja temperatura de sublimación del CO₂ (-78 °C a presión atmosférica). Una vez ha sublimado la cantidad necesaria de CO₂, éste se distribuye por toda la estancia mediante el uso de ventiladores. Finalmente, cuando se consigue un ambiente homogéneo y rico en CO₂, se conecta el sistema de ventilación forzada del local, con el objetivo de registrar cómo de rápido es capaz de sustituir el aire de la estancia por aire externo.

2.2.2. Medidas con ocupantes

Un segundo tipo de prueba consiste en la evaluación de una situación real, en la cual el establecimiento se encuentra ocupado. Idealmente, la ocupación en estas pruebas debería ser elevada aunque, en todo caso, será siempre inferior al aforo máximo



permitido. La presencia de personas en el interior de la estancia cambia la situación respecto al primer tipo de pruebas, ya que en este caso cada persona actúa como una fuente de CO₂. Este hecho provoca que el sistema de extracción consiga una disminución más lenta del nivel de CO₂ en el interior del local, debido a la generación de CO₂ por la respiración de cada ocupante. Puesto que esta es la situación de funcionamiento real de estos establecimientos, las medidas con ocupantes resultan de indudable interés a la hora de evaluar la calidad del aire existente en cada local bajo la serie de condiciones aplicadas en cada caso. Al igual que en las medidas con hielo seco, cada uno de los dos establecimientos se caracterizará detalladamente mediante medidas de CO₂, incluyendo posibles diferencias en cuanto a zonas del local.

Medidas en la sala Chocolat

Los días 23/12/2020 y 29/12/2020 se realizaron medidas en la sala Chocolat, ubicada en la calle María Lostal 25, Zaragoza. Se presenta a continuación una breve descripción del local, así como de las medidas que allí se llevaron a cabo.

La sala Chocolat dispone, según planos recibidos, de una superficie útil total de 164 m². Sin embargo, parte de esta superficie corresponde a zonas de oficina, almacén, etc. Para realizar el estudio de la ventilación del local, interesa fundamentalmente el espacio compartido por los ocupantes del establecimiento. Por tanto, durante las pruebas, todas las puertas de estos espacios se cerraron para aislarlos del recinto principal. Esto puede observarse claramente en la Figura 2, donde se ha delimitado con trazo rojo la superficie correspondiente a este área principal, consistente en la zona de púbblico, las dos zonas de barras y el espacio del discjockey, dando una superficie total de 129 m². En cuanto a la altura del recinto, ésta varía en sus distintas zonas, estimándose una altura promedio de unos 3.9 metros. Esto proporcionaría un volumen estimado de 506 m³ para la zona de realización de las pruebas.

Respecto a la instalación de ventilación y climatización, la sala Chocolat dispone de dos circuitos independientes:

- Circuito de extracción: marcado en la Figura 2 con trazo azul. Este sistema tiene una capacidad estimada de 4000 m³/h, y aspira el aire del local a través de 8 rejillas situadas a lo largo del conducto indicado en la Figura 2. Este aire aspirado es conducido a una pequeña cabina situada en la planta superior, que actúa como plenum y dispone de aberturas que conectan con la calle.
- Circuito de climatización: este sistema trabaja con recirculación por lo que, en principio, no aporta aire exterior. Por este motivo no ha sido incluido en la Figura 2, ya que no afecta a la ventilación del local. Sin embargo, se ha comprobado la



existencia de cierta conexión en el plenum con la instalación de extracción, por lo que la puesta en marcha de la climatización podría aportar una cierta cantidad desconocida de aire exterior.

No se han localizado otras aberturas que permitan el intercambio de aire con el exterior, más allá de aquellas descritas para el plenum. Esto, como se detallará más adelante, puede suponer una restricción para el sistema de extracción, que dispone de rejillas para expulsar aire al exterior, pero no cuenta con ninguna entrada de aire externo que reemplace el aire expulsado.

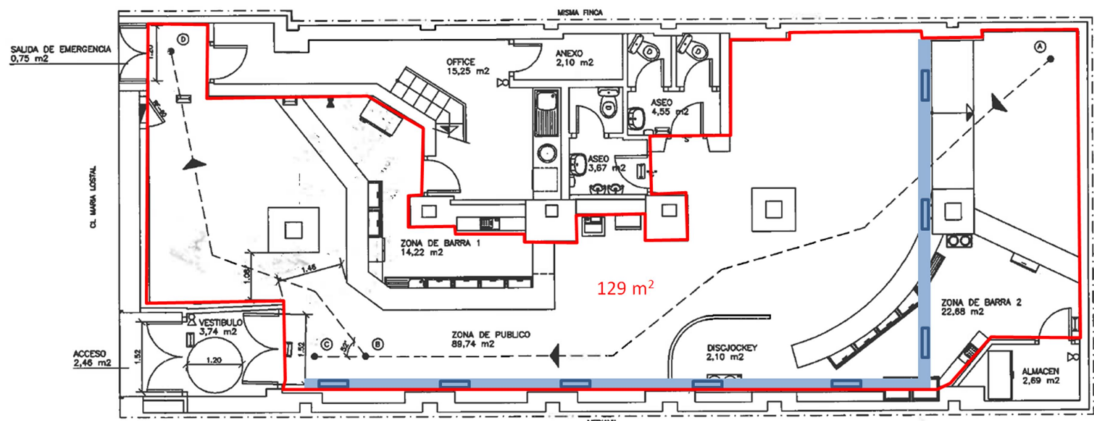


Figura 2. Plano de la sala Chocolat, donde se ha añadido en trazo azul el circuito de extracción (con la posición de las 8 rejillas marcadas con rectángulos). La superficie estudiada en estas pruebas se ha delimitado con trazo rojo, comprendiendo un total de 129 m².

3.1 Prueba sin ocupantes

El día 23/12/2020 se llevó a cabo una prueba sin público en la que se trató de evaluar cómo de efectiva es la ventilación del local en cuestión. Para ello se realizaron cuatro ensayos diferentes en los que se sembró en repetidas ocasiones con CO₂ el local hasta una concentración superior a la existente en la atmósfera. Seguidamente, se activaron en distintas condiciones los sistemas de ventilación con los que cuenta el local. A través de la evolución temporal de la concentración de CO₂ se puede saber cómo de efectiva es la ventilación del local. En este caso, esto se cuantifica calculando el caudal de aire que mueve dicha ventilación.

3.1.1 Situación de los sensores

Para esta primera prueba se emplearon un total de 23 analizadores, que se distribuyeron por el establecimiento de acuerdo con lo indicado en la Figura 3. Como puede observarse, 6 analizadores se colocaron a la altura del techo (algunos de ellos en



las rejillas de extracción), siendo el resto instalados sobre trípodes (2.1 metros de altura, aproximadamente) o sobre mesas y estanterías. Adicionalmente, el sensor L1 se colocó en la cabina del plenum, y el L8 en el exterior del local, cerca de la puerta de acceso.

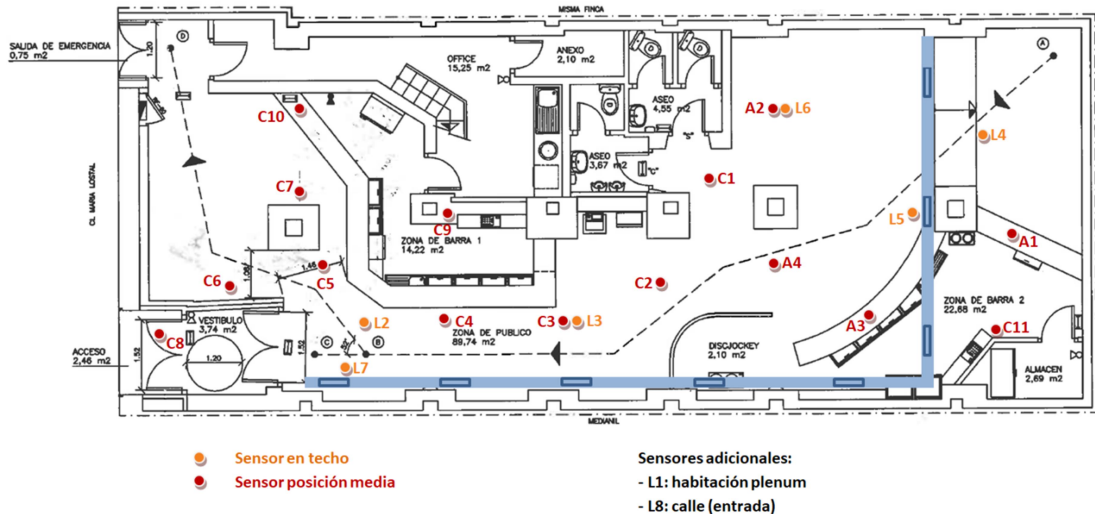


Figura 3. Plano de la sala Chocolat con la localización de todos los sensores empleados en las medidas del 23/12/2020.

3.1.2 Matriz de ensayos

En esta primera sesión se llevaron a cabo 4 pruebas diferentes, las cuales se detallan a continuación.

- 1.1 Extracción funcionando, puerta cerrada y todas las rejillas de aspiración abiertas.
- 1.2 Extracción funcionando, puerta abierta y todas las rejillas de aspiración abiertas.
- 1.3 Extracción funcionando, puerta cerrada y la mitad de las rejillas de aspiración cerradas.
- 1.4 Extracción funcionando, puerta abierta y la mitad de las rejillas de aspiración cerradas.

3.1.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en los 4 ensayos llevados a cabo sin ocupantes en el establecimiento. En realidad, se encontraban presentes personal del local y el equipo del LIFTEC, pero dado que es un número muy inferior al del aforo máximo, no afecta significativamente a los resultados (en cualquier caso, éstos podrían corregirse teniendo en cuenta la emisión de CO₂ de las personas presentes).



En los 4 ensayos se llevó a cabo una siembra de CO₂ para después, una vez homogeneizado el ambiente, conectar los diferentes sistemas de extracción y ventilación disponibles con la puerta del local cerrada o abierta.

A continuación, se muestra la evolución temporal de la concentración de CO₂ durante dichos ensayos.

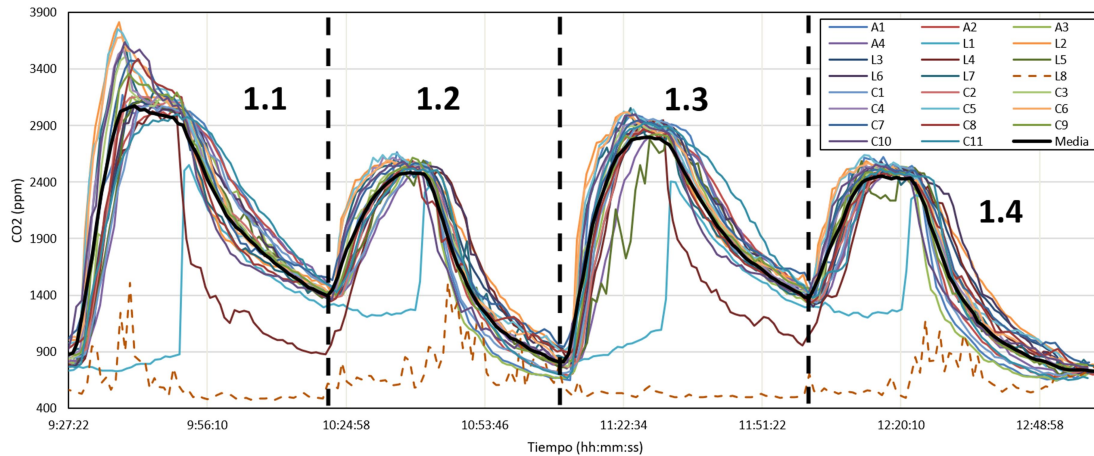


Figura 4. Evolución temporal de la concentración de CO₂ durante los ensayos llevados a cabo el día 23/12/2020.

En la Figura 4 se muestra el registro obtenido para todos los analizadores de CO₂ a lo largo de toda la mañana, donde pueden distinguirse claramente las cuatro pruebas realizadas. Dentro de cada una de ellas se aprecia una secuencia análoga en todos los casos, que consta de 3 partes diferenciadas: la siembra del CO₂, la estabilización y homogenización, y finalmente el descenso. Es precisamente en esta última etapa del ensayo donde se obtienen los datos de caudal y renovaciones por hora que se comentan más adelante.

En general, el comportamiento de los medidores es bastante homogéneo y según lo esperado. Cuando se siembra sube el CO₂ en todos los analizadores, siendo esta subida más acusada en los más cercanos a las bandejas de hielo seco. Cuando se retira el CO₂ y se mantienen los ventiladores encendidos se homogeniza el ambiente y con él el CO₂. Cuando se enciende la extracción, la concentración de CO₂ comienza a descender.

Pese a que la mayoría de los sensores siguen el mismo comportamiento, se observan algunas excepciones, que comentamos a continuación:

- L8: Este sensor se ubica en la calle, para disponer del dato de referencia que correspondería a un ambiente totalmente limpio. Cabría esperar que mostrase una concentración prácticamente constante, pero no ha sido así. En torno a las 9:40, 10:50 y 12:30 registra subidas significativas que se corresponden con momentos en los que se abre la puerta del local. Esto indica que, aunque la extracción está funcionando y genera una entrada de aire a través de la puerta,



también se produce cierto reflujo hacia el exterior (de hecho, con un mechero parecía apreciarse que en la parte superior de la puerta el flujo salía hacia la calle). Este flujo saliente dio lugar a las subidas que se aprecian en el registro de este analizador.

- L1: Este sensor se ubica en la cabina del plenum, donde se encuentra alojado el ventilador de extracción. Esta cabina está situada en el piso superior y sin conexión con el local, que es donde se libera el CO₂. Por lo tanto, hasta que no se enciende la extracción y le empieza a llegar el CO₂ que se ha sembrado, este no reacciona. Una vez enciende la extracción sigue la misma tendencia que el resto de sensores, al estar midiendo el mismo ambiente.
- L4: El comportamiento de este sensor resultó muy peculiar. Es un sensor ubicado en el espacio que se encuentra al fondo del local (ver Figura 3). En principio, se consideraba que era una zona que se ventilaría mal, por estar en un extremo y a cierta distancia de las rejillas de extracción. Sin embargo, cuando se enciende la extracción, y la puerta está cerrada (pruebas 1.1 y 1.3 en Figura 4), la concentración de CO₂ en este punto cayó muy por debajo del resto. En cambio, en las pruebas realizadas con la puerta abierta tiende a superar la concentración del resto de la sala. La explicación que se propone para este comportamiento aparentemente contradictorio es la siguiente. Según se comentó, el techo de ese espacio da a un patio de luces. Al activar la extracción con la puerta cerrada se genera una depresión que, si existe alguna fuga, tiende a aspirar aire exterior en esa zona, bajando la concentración de CO₂ por debajo del resto del local. En cambio, al abrir la puerta deja de haber depresión en el local y desaparece ese efecto. En estas condiciones parece verificarse que, efectivamente, este extremo de la sala está peor ventilado, por lo que la concentración de CO₂ se reduce más lentamente.

En la Figura 4 se ha trazado la concentración media de CO₂ en la sala, calculada a partir de todos los sensores instalados en el local, a excepción de L8 y L1, que se encuentran fuera del establecimiento.

3.1.3.1 Tasa de ventilación global

La tasa de ventilación del local puede estimarse a partir de la caída registrada en la concentración de CO₂, mediante un balance de materia. En la Tabla 1 se muestran los resultados que se han obtenido analizando la evolución temporal de la concentración de CO₂ en esta última etapa de los ensayos.



Tabla 1. Resultados del análisis temporal de los registros de CO₂ en cada uno de los cuatro ensayos realizados.

Ensayo	1.1	1.2	1.3	1.4
ACH	1,80	3,96	1,89	3,65
Q (m ³ /h)	909	2005	955	1848

A partir de la curva de caída del CO₂ promedio se calculó el número de renovaciones de aire por hora, ACH (*Air changes per hour*). Y para un volumen total del local estimado de 506 m³, se puede estimar el caudal real que mueve el sistema de extracción en cada una de las condiciones ensayadas.

Se tenía como referencia un caudal de extracción teórico de 4000 m³/h, pero como puede apreciarse, los caudales determinados por este método son muy inferiores a este valor en todos los casos.

En el primero de los ensayos (1.1), con la puerta cerrada, la extracción mueve del orden de 909 m³/h. Si comparamos estos resultados con los del segundo ensayo (1.2), en el que la puerta está abierta, vemos que el caudal aumenta hasta los 2005 m³/h. Valores muy similares se obtuvieron en los ensayos 1.3 y 1.4, ambos con la mitad de las rejillas cerradas, el primero con la puerta abierta y el segundo con la puerta cerrada. Puede concluirse, por tanto, que:

- El solo hecho de abrir la puerta aproximadamente duplica el caudal extraído.
- Cerrar la mitad de las rejillas prácticamente no tiene ningún efecto sobre la capacidad de la extracción.

El efecto de la puerta es significativo, y se considera que tiene una explicación muy clara: no existe en el local ninguna entrada de aire, por lo que el caudal extraído es remplazado por aire exterior que únicamente puede entrar por las rendijas de la puerta, tal vez también por la puerta que da al piso superior y no se sabe si puede existir alguna otra entrada en baños u otros puntos del local. En cualquier caso, la sección total de las entradas de aire es muy reducida, lo que restringe de manera importante la capacidad del sistema de extracción. Al abrir la puerta se elimina esta restricción, de manera que el ventilador trabaja en un punto en el que se le requiere un menor salto de presión y, por tanto, proporciona mayor caudal de aire. Una primera conclusión, por tanto, sería la necesidad de disponer en el local de, al menos, un punto de entrada de aire.

Por otro lado, el cierre de la mitad de las rejillas no produce efectos apreciables en ninguna de las dos pruebas. Esto sugiere que las rejillas no son un factor limitante, sino que el bajo caudal obtenido debe proceder de otro punto del circuito. Con los datos disponibles no puede determinarse si la limitación procede del propio ventilador de



extracción, cuya curva de presión no es adecuada para el caudal previsto, o si en algún punto del circuito existe alguna restricción al flujo que hace que, aunque el extractor tuviera capacidad suficiente, éste tenga que trabajar con un salto de presión excesivo que limite el caudal alcanzable. Sería necesario por tanto conocer las características del ventilador y del circuito para realizar algún tipo de diagnóstico en este sentido.

3.1.3.2 Diferencias entre sensores y zonas

Para tener un análisis pormenorizado de cómo funciona la ventilación del local en cada zona conviene hacer un análisis de cada uno de los sensores. Por ello, a continuación, se muestra una tabla con las renovaciones de aire por hora (ACH) estimadas a partir de cada uno de los sensores.

Tabla 2. ACH medida por cada sensor en orden descendente. En azul los sensores ubicados al fondo del local, en rojo los ubicados en la zona central, en verde los ubicados entrando a la izquierda, finalmente en color naranja claro el sensor L1, el cual estaba en la cabina de los equipos de ventilación.

Ensayo	1.1	1.3	Ensayo	1.2	1.4
A1	2,39	2,49	C11	5,57	4,92
A3	2,28	2,25	A2	5,01	4,37
L5	2,07	2,20	A1	5,14	4,14
L6	2,18	2,04	A3	5,00	3,85
C11	2,04	2,17	L6	4,31	4,32
A2	2,00	2,14	A4	4,43	4,20
A4	1,69	2,14	L5	4,60	3,90
C1	1,91	1,90	C1	4,28	3,68
L3	1,80	1,98	L1	4,08	3,84
C2	1,87	1,90	C3	3,94	3,70
C3	1,83	1,87	Promedio	3,96	3,65
Promedio	1,80	1,89	C4	3,79	3,77
L1	1,76	1,89	C9	4,03	3,49
C4	1,76	1,77	C2	4,04	3,39
C6	1,72	1,76	L7	3,81	3,51
L7	1,57	1,79	L3	3,57	3,35
C9	1,70	1,64	L2	3,38	3,41
C5	1,56	1,59	C6	3,09	3,21
C7	1,36	1,67	C7	2,70	2,80
C10	1,25	1,35	C5	2,75	2,49
L2	1,07	1,35	C10	2,68	2,21



Tabla 3. Promedio de ACH registrado por zonas

Ensayo	1.1	1.2	1.3	1.4
Entrada	1,44	2,83	1,59	2,74
Centro	1,65	3,66	1,74	3,39
Fondo	2,08	4,74	2,14	4,19
Promedio Local	1,80	3,96	1,89	3,65

Al comparar los ensayos con puerta cerrada (1.1 y 1.3) con los que se realizaron con la puerta abierta (1.2 y 1.4) se obtiene, para todas las zonas, un resultado similar que para el promedio del local: al abrir la puerta, aproximadamente se duplica la tasa de ventilación, independientemente de la zona considerada. Por una parte, esto confirma las conclusiones apuntadas en el apartado anterior en cuanto a la gran influencia de la puerta, al facilitar la entrada de aire exterior. Pero, por otra parte, podría resultar llamativo el hecho de que la puerta afecte a todas las zonas por igual. Por ejemplo, no resulta especialmente favorecida la zona de la entrada, puesto que la tasa de ventilación en esa zona aumenta aproximadamente en la misma medida que en el resto; dado que la puerta aporta el aire a través de esta entrada, podría haberse esperado que la concentración de CO₂ se redujera de forma significativamente más rápida en esta zona.

Más aún, comparando entre sí las distintas zonas, los resultados indican que la renovación del aire es más lenta en la entrada, seguida por la zona central y obteniendo una tasa de ventilación más elevada en el fondo de la sala. Como se ha indicado, resulta un comportamiento sorprendente, dado que el aire fresco llega a la sala a través de la entrada.

Estos resultados sugieren que el aire no se desplaza de forma uniforme hacia el fondo, sino que puede seguir un camino preferente que permite que el aire fresco pueda llegar hasta el otro extremo de la sala sin diluirse completamente a su paso. Si fuera así, la mayor cantidad de rejillas (5) que hay entre la cabina del diskjockey y la pared del fondo, frente a solamente 3 en el resto del local seguramente explicaría este efecto.

Cabe apuntar aquí también que se observó que no se producía una entrada de aire en toda la sección de la puerta, sino que parecía entrar por la parte inferior, mientras que salía aire del local por la parte superior. De hecho, el sensor de CO₂ situado en la zona de la entrada, a unos 2 m de altura, marcaba valores altos de CO₂ al abrir la puerta. Esto sugeriría que el aire podría moverse hacia el interior por la zona inferior del local, que podría motivar esa llegada de aire fresco hasta el fondo que, junto a una mayor cantidad de rejillas, explique que el aire se renueve incluso antes que en la zona de la entrada.

En cualquier caso, deben considerarse solamente conjeturas a la vista de los resultados y sería necesario un estudio más detallado de los datos, y tal vez algún ensayo adicional, para poder proponer una explicación más fundamentada.



3.2 Prueba con ocupantes

El día 29/12/2020 se realizó una segunda prueba, en este caso con el local ocupado por un máximo de 38 personas. Tal como se describe en el capítulo de metodología, el objetivo de estas pruebas es evaluar la calidad del aire bajo condiciones realistas de operación. La existencia de ocupantes en el establecimiento supone la introducción de una fuente de generación continua de CO₂, que el sistema de extracción debe ser capaz de evacuar con la suficiente rapidez para conseguir niveles saludables dentro del recinto.

3.2.1 Situación de los sensores

En la segunda prueba se emplearon un total de 24 analizadores, que se distribuyeron por el establecimiento de acuerdo con lo indicado en la Figura 5. Como puede observarse, la disposición de la mayoría de ellos coincide con la descrita en la Figura 3 para las medidas del 23/12/2020. Adicionalmente, se colocó el sensor A6 sobre un trípode cerca de la entrada.

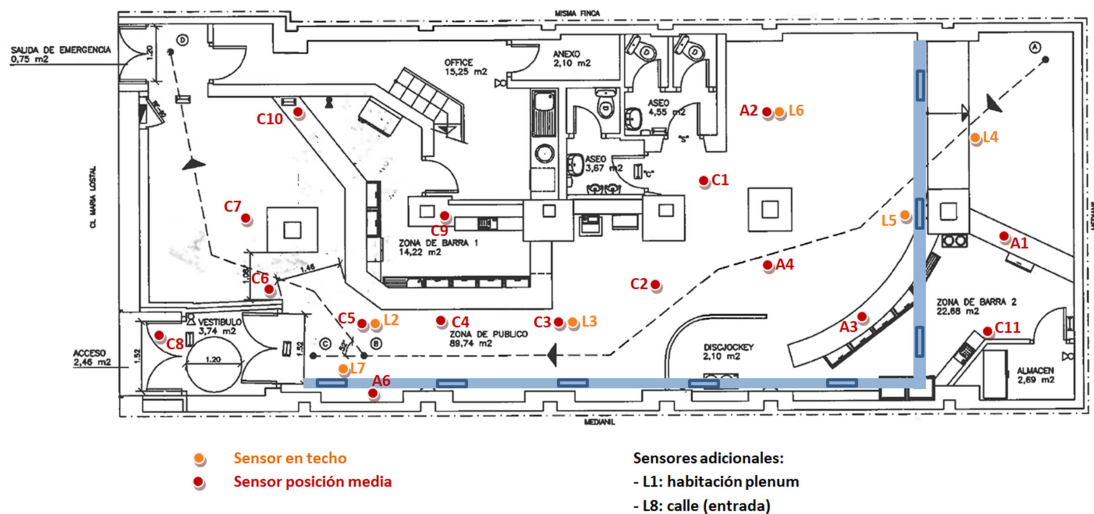


Figura 5. Plano de la sala Chocolat con la localización de todos los sensores empleados en las medidas del 29/12/2020.

3.2.2 Matriz de ensayos

En esta segunda sesión se llevaron a cabo nuevamente 4 pruebas diferentes, las cuales se detallan a continuación.

- 2.1 Extracción funcionando, puerta cerrada y 38 personas.
- 2.2 Extracción funcionando, puerta abierta y 38 personas.
- 2.3 Extracción funcionando, puerta abierta y 22 personas.



- 2.4 Extracción funcionando, puerta abierta, 22 personas y recirculación encendida.

3.2.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en los 4 ensayos llevados a cabo con ocupantes en el local. En esta ocasión no fue necesaria la siembra de CO₂ en el local, pues este ya es exhalado por las personas.

A continuación, se muestra en la Figura 6 el registro completo de todos los sensores instalados en el local. Como se puede apreciar en el apartado 3.2.1, la ubicación de estos es muy similar a la que hubo el día 23/12/2020.

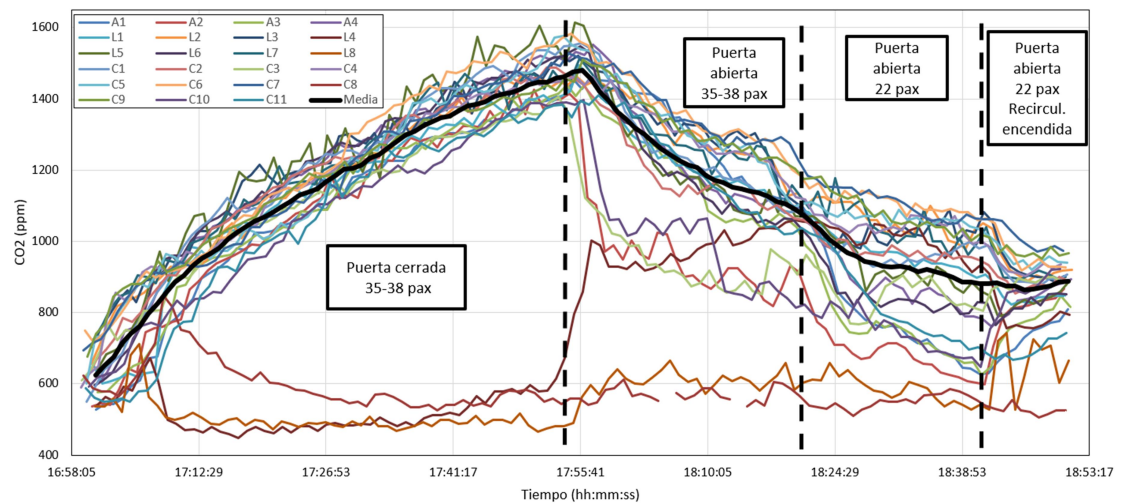


Figura 6. Evolución temporal de de la concentración de CO₂ en todos los sensores durante los ensayos del día 29/12/2020.

Antes de las 17:00 fueron llegando al local las personas que participaron en la prueba, de manera que entre las 17:00 y las 18:20 se mantuvo una ocupación prácticamente constante, de entre 35 y 38 personas. Esto permitió realizar la prueba en condiciones controladas, puesto que la generación de CO₂ durante todo ese periodo permaneció casi invariable, lo cual facilita comparar distintas condiciones de ventilación.

A las 17:07 se activó el circuito de extracción, manteniendo la puerta cerrada (prueba 2.1). Como se ha indicado en el apartado anterior, esto proporciona un caudal de aire fresco en torno a 900 m³/h. La gráfica muestra claramente que es insuficiente para evacuar todo el CO₂ emitido por las personas, puesto que la concentración aumenta continuamente hasta las 17:55, y hubiera seguido aumentando de no cambiar las condiciones de la prueba. Como se verá más adelante, la magnitud y la evolución del nivel del CO₂ es coherente con la ocupación y la tasa de ventilación que existe en esta primera parte de la prueba.



También es importante notar que la concentración de CO₂ no es homogénea en todo el local, sino que varía en función de la localización de los sensores. Esto es el resultado combinado de dos efectos. Por una parte, como se ha apuntado previamente, la tasa de ventilación no es la misma en todo el local. Por otra parte, los resultados también dependen de cómo están distribuidas las personas en el establecimiento. Es difícil valorarlo con precisión, pero se considera que la colocación de las personas se correspondería aproximadamente con la que existiría en funcionamiento normal. De ser así, los niveles de CO₂ serían representativos de los que cabe esperar en las distintas zonas del local. Más adelante se volverá sobre este aspecto.

A partir de las 17:55 se abrió la puerta (prueba 2.2), con lo que el caudal de extracción aproximadamente se duplica. El efecto es visible e inmediato: la concentración de CO₂ deja de aumentar y empieza a caer en todo el local (también, con distinta intensidad según el punto considerado).

A las 18:20 salieron parte de los ocupantes, quedando 22 personas en el interior. La consecuencia es una bajada más rápida del CO₂, puesto que aumenta la proporción entre renovación de aire (que no ha cambiado) respecto a la emisión de CO₂ (que se ha reducido al 58%).

Finalmente, a las 18:40 se puso en marcha la recirculación de aire a través del sistema de climatización, manteniendo invariable la extracción y la cantidad de personas. La única consecuencia es una homogenización gradual de la concentración de CO₂, sin variación apreciable de su valor promedio.

Una valoración global de estos resultados podría ser la siguiente, considerando las capacidades actuales del sistema de ventilación:

- Con la puerta cerrada, los niveles de CO₂ son claramente excesivos para una ocupación de 38 personas. Faltaría esperar a que se estabilizara, pero la tendencia sugiere que excederá ampliamente las 1500 ppm.
- Al abrir la puerta, la situación mejora considerablemente. Aunque por limitaciones de la prueba no se pudo esperar a alcanzar un estado estacionario, la evolución sugiere que se estabilizaría en torno a 1000 ppm (ver estimación teórica más abajo) con una ocupación de 38 personas.
- Al reducir la ocupación a 22 personas (siempre con la puerta abierta), el nivel de CO₂ se reduce en unas 200 ppm, y los resultados indican que la concentración se podría quedar en unas 800 ppm.
- La recirculación, como cabe esperar, no reduce la concentración de CO₂, ya que no introduce aire exterior. Una ventaja es que reduce los valores máximos que se dan en algunas zonas del local. No obstante, habría que tener en cuenta que, en



caso de utilizar la recirculación, se aconseja instalar un filtro en el sistema (preferiblemente de categoría F7 o superior).

3.2.3.1 Diferencias entre sensores y zonas

Debido a las diferencias observadas entre sensores de CO₂ durante esta tanda de ensayos, puede ser interesante hacer un análisis pormenorizado del comportamiento de cada sensor en función de la zona del local en la que estaba ubicado.

Como ya se ha hecho en un apartado anterior, se ha dividido el local en tres zonas: entrada, centro y fondo. En cada una de ellas se ha calculado la concentración media de CO₂, promediando las lecturas de los sensores existentes en cada zona. Las curvas resultantes se representan en la siguiente figura, junto con el promedio global del establecimiento.

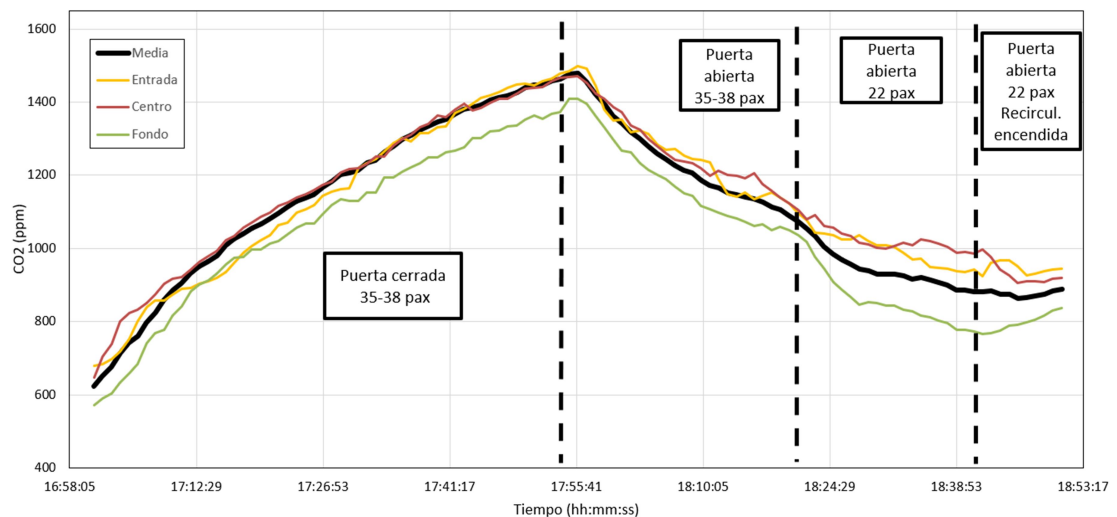


Figura 7. Evolución temporal de la concentración de CO₂ por zonas en el local medida el día 29/12/2020.

Como se puede ver en la Figura 7 la concentración de CO₂ sigue la misma tendencia en todo el local pero varía ligeramente su valor en función de la zona del mismo. En todo momento, la concentración de CO₂ resulta ser inferior en el fondo del local. Suponiendo que este resultado no esté afectado por la distribución de los ocupantes, viene a confirmar el comportamiento que parecía observarse en la prueba sin ocupantes: la tasa de ventilación es mayor en la zona del fondo que en la entrada o en la zona central donde se encuentra la barra.

A continuación se representan por separado los analizadores en cada zona, incluyendo también el promedio calculado en esa zona.



En la entrada, el analizador C10 se desvía del comportamiento general, como puede observarse en la Figura 8. Este analizador se encontraba en el extremo de la barra (ver Figura 5), posiblemente en una zona con muy poca circulación de aire y tal vez alguna pequeña infiltración de aire desde la puerta cercana, lo cual justificaría que se encuentre por debajo del valor medio en esa zona. Al activar la recirculación (18:40), se intensifica la mezcla y alcanza valores similares al resto.

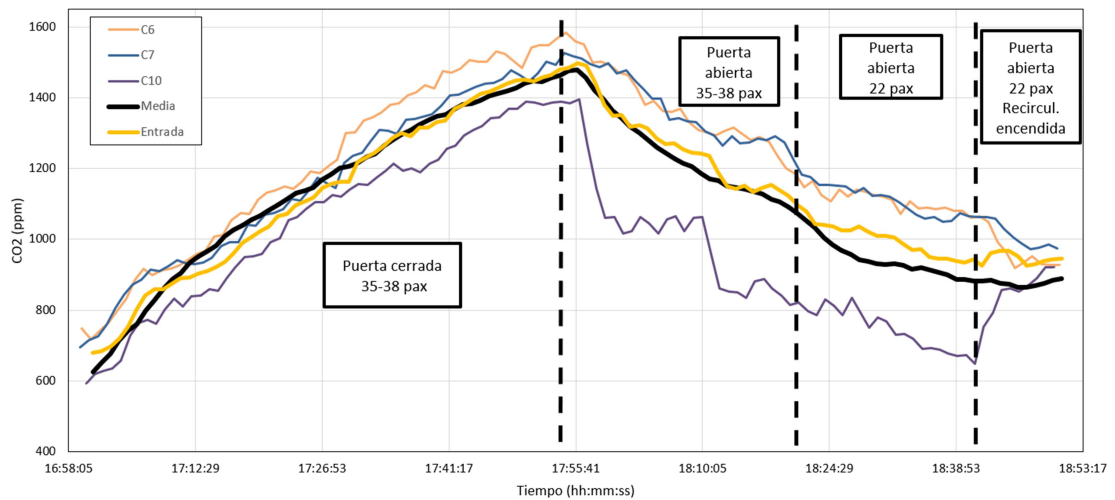


Figura 8. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en la zona de la entrada.

En la parte central, representada en la Figura 9, los menores valores se registraron en los analizadores C2 y C3. Ambos se encuentran instalados a media altura en el espacio que hay entre la barra y la pared (Figura 5). Aunque no se dispone de datos suficientes, no se descarta que estas bajas concentraciones puedan estar relacionadas con una entrada de aire exterior desde la puerta hacia el fondo, según la posible explicación que se ha apuntado previamente. Otros sensores en esa zona, pero a mayor altura, dan valores más altos, lo que también sería consistente con este comportamiento. Por ejemplo, el sensor L3, situado exactamente en la misma posición que el C3 pero a mayor altura, da niveles de CO₂ significativamente más elevados. El C9, situado en la estantería dentro de la barra, dio lecturas relativamente elevadas, indicando que es una zona peor ventilada que el promedio en esa zona.

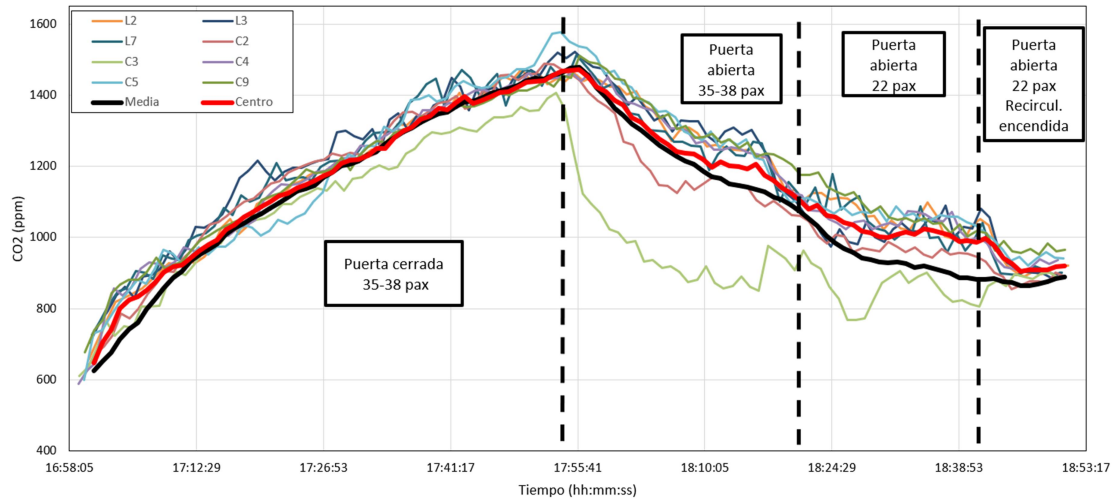


Figura 9. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en la zona central.

En el fondo, como se ha indicado, se registraron en promedio valores más bajos que en las otras zonas. Pero también aquí algunos analizadores mostraron comportamientos peculiares, como puede observarse en la Figura 10. El analizador L4 es el que más se desvía del promedio, confirmando lo ya apuntado en el apartado anterior. Cuando la puerta está cerrada, se mantiene en valores bajos, coherentes con una posible entrada de aire por alguna rendija, debido a la depresión que se crea en el local. Al abrir la puerta da resultados similares al promedio del local, aunque con algunas diferencias respecto al resto de analizadores, seguramente porque hay poco movimiento de aire en esa zona. Solamente converge con las demás curvas cuando la mezcla se intensifica mediante la recirculación durante la prueba 2.4. Los sensores A2 y, en mucha menor medida, L6 dieron valores inferiores al resto. Podría deberse a que no había personas en ese rincón, o a que pudiera haber alguna pequeña entrada de aire no identificada en esa zona.

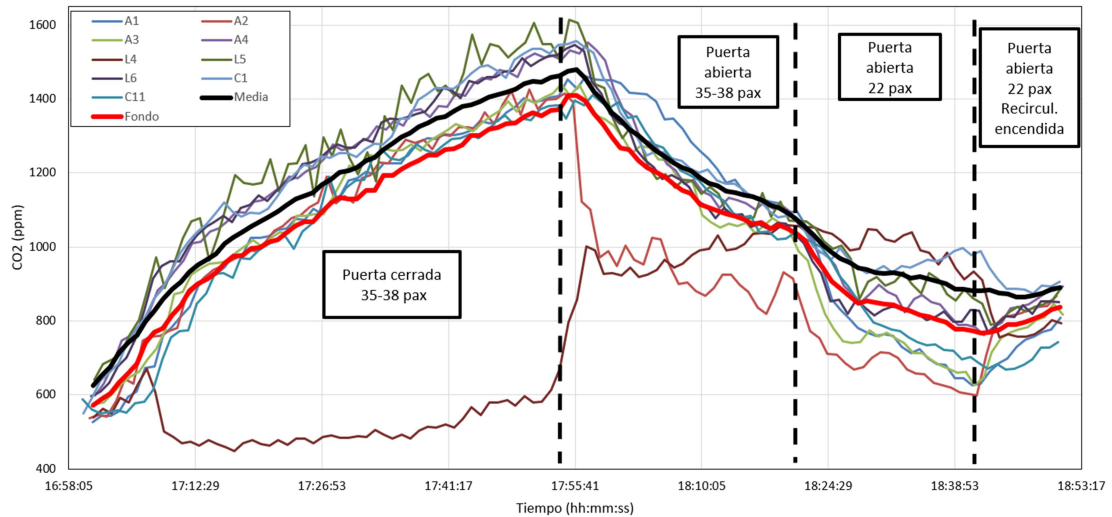


Figura 10. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en el fondo del local.

3.2.3.2 Comparación con simulaciones

Suponiendo que existe una mezcla perfecta en el local, pueden realizarse algunas estimaciones, a partir de la tasa de ventilación que se determinó en las pruebas con hielo seco, de los datos de ocupación y de las curvas de CO₂ registradas durante estas pruebas.

La curva 1 de la Figura 11 muestra resultados de la simulación de la evolución de CO₂ en la sala, con los siguientes supuestos:

- 38 ocupantes, con una tasa de emisión de CO₂ por persona ajustada para reproducir el comportamiento que se observó durante la prueba. Esto supuso aumentar en un 30% la tasa de emisión que propone la guía publicada por la Escuela de Salud Pública de Harvard para un adulto medio. Tras ajustar este dato, lo cierto es que los resultados coinciden muy bien con las curvas promedio medidas en la prueba. Notar que este ajuste podría servir también para compensar otros valores que no se conocen con total precisión, como es la tasa de ventilación o el volumen de la sala.
- Durante la primera hora, se ha considerado ventilación con aire fresco a razón de 900 m³/h, tal y como se estimó en la prueba inicial. Tras esta hora se alcanza un pico de 1500 ppm, que coincide muy bien con las medidas.
- A continuación, se aumenta la ventilación a 2000 m³/h, que correspondería al caudal extraído con la puerta abierta. Nuevamente, la caída ajusta muy bien con las medidas. Según esta simulación, con este nivel de ventilación y 38 ocupantes, la concentración de CO₂ se estabilizaría en 1000 ppm.



La Figura 11 incluye también otros supuestos, que permiten valorar la sensibilidad de la concentración de CO₂ a distintos parámetros:

- En el caso 2 se ha supuesto que en la segunda hora la ventilación aumenta a 4000 m³/h, que es el valor teórico del sistema. En este caso, con 38 ocupantes, la concentración de CO₂ se estabilizaría en 724 ppm.
- En el caso 3 se ha supuesto que desde el principio se dispone de una tasa de ventilación de 5000 m³/h, también con 38 ocupantes y se analiza la evolución desde que estos entran al local. El valor de CO₂ alcanzaría en este caso 670 ppm
- El caso 4 es similar al anterior, pero aumentando el caudal de aire fresco hasta 8000 m³/h, con lo que el nivel se estima que bajaría hasta 587 ppm.
- Finalmente, en el caso 5 se mantiene el caudal de 8000 m³/h, aumentando la ocupación hasta 80 personas. Los cálculos indican que la concentración de CO₂ en este caso se mantendría en torno a 739 ppm.

Este abanico de casos puede dar una idea de los resultados que cabría esperar con distintas tasas de ventilación y aforos, suponiendo que la ocupación permanece fija durante todo el periodo. Si la ocupación fluctúa, siendo inferior durante una parte del tiempo, la concentración de CO₂ bajaría en alguna medida. También hay que tener en cuenta que estas estimaciones hacen referencia a los niveles promedio de CO₂ en el local, pudiendo existir zonas peor ventiladas con concentraciones ligeramente superiores a estos valores.

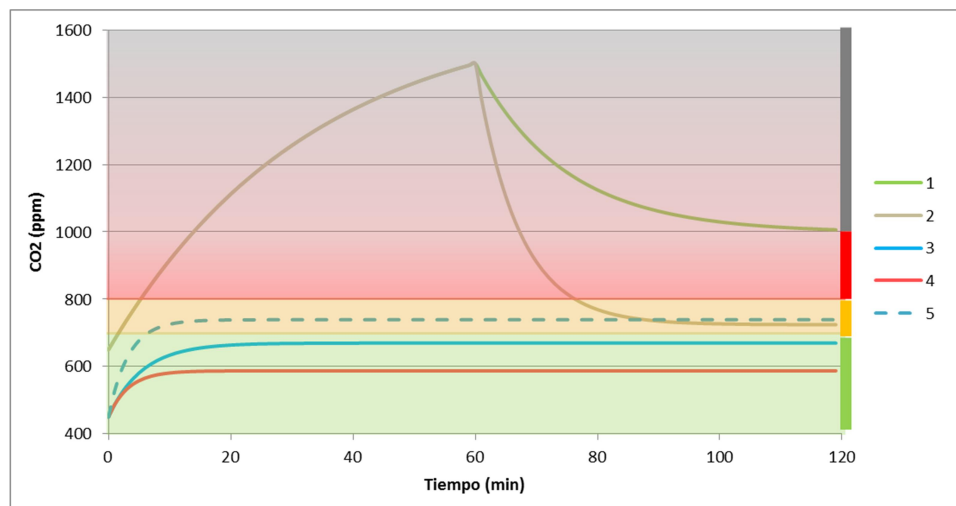


Figura 11. Resultados de las simulaciones.



3.3 Resumen y conclusiones

Las dos series de pruebas que se han realizado en la sala Chocolat han proporcionado resultados complementarios sobre las condiciones actuales de ventilación.

Las medidas con hielo seco permitieron estimar la capacidad real del sistema de extracción. En condiciones de funcionamiento normal, con la puerta cerrada, se ha determinado que circulan en torno a 900 m³/h, claramente por debajo de los 4000 m³/h nominales de la instalación. Se sospechó que esto podía deberse en parte a la falta de accesos que faciliten la entrada de aire al local, por lo que se realizó una segunda prueba abriendo la puerta de acceso al establecimiento. Esta simple operación permitió duplicar el caudal extraído, aunque seguía estando por debajo del esperado.

Esta primera prueba también parecía indicar que, contrariamente a lo que por lógica se esperaría, la zona mejor ventilada es el fondo del local, en el extremo más alejado de la puerta. Se observaron también algunos comportamientos peculiares en algunos puntos, como es el caso del sensor instalado en la habitación situada más al fondo (L4). La existencia de una pequeña fuga en el techo podría justificar la baja concentración registrada en algunos casos en esa zona.

En las pruebas con ocupantes se ha intentado valorar el nivel de contaminación del ambiente en una situación realista, para distintos ajustes del sistema de ventilación. Aunque la ocupación era relativamente baja (38 personas), al utilizar el sistema de extracción con puerta cerrada el nivel de CO₂ alcanzó niveles muy elevados. Al abrir la puerta, la situación mejora sustancialmente, aunque para esta ocupación se estabiliza en torno a 1000 ppm.

El circuito de climatización, en teoría de circuito cerrado, no tiene más efecto que uniformizar la concentración de CO₂ en el local. Es posible que esté introduciendo cierta cantidad de aire exterior, debido a que la cabina donde se encuentran los equipos tiene conexión con la calle, pero no se ha apreciado que modifique significativamente el nivel de CO₂.

Las medidas de CO₂ en distintos puntos tienden a confirmar el comportamiento peculiar que se adivinaba en las pruebas con hielo seco: en el fondo del local existe una tasa de ventilación mayor que en la entrada o en la zona central. Las lecturas de algunos medidores parecen indicar que el aire exterior consigue llegar hasta el fondo sin mezclarse completamente con el aire del local a lo largo de su recorrido.

Algunas conclusiones que puede extraerse a partir de estas mediciones, complementadas con estimaciones teóricas:

- Para una ocupación de 38 personas, la ventilación actual resulta insuficiente. Sería necesario aumentar por encima de los 4000 m³/h teóricos para mantener concentraciones de CO₂ en torno a 700 ppm con esta cantidad de personas.



- Si la ocupación aumenta a 80 personas, con 8000 m³/h se han estimado 739 ppm. Por tanto, el sistema debería diseñarse incluso por encima de ese caudal.
- Parece conveniente revisar la configuración del circuito de extracción para mejorar la ventilación en la zona de la entrada. En promedio, la concentración de CO₂ ha mostrado en estas pruebas diferencias de entre 100 y 200 ppm entre las distintas secciones.
- La dispersión entre sensores es incluso superior, con diferencias de hasta 500 ppm en algunos casos. Por este motivo, es importante asegurar una ventilación relativamente homogénea en todo el local para evitar zonas con niveles de CO₂ significativamente por encima del promedio.
- En caso de monitorizar el CO₂ en este establecimiento, sería necesario disponer al menos de 2 medidores, instalados en los espacios situados en ambos extremos de la sala.

Medidas en el local Canterbury

Los días 16/01/2021 y 21/01/2021 se realizaron medidas en el establecimiento Canterbury, ubicado en la avenida César Augusto nº 30, Zaragoza. Se presenta a continuación una breve descripción del local, así como de las medidas que se llevaron a cabo.

El establecimiento consta de una planta baja y una entreplanta, conectadas ambas mediante dos escaleras. Los planos de estas dos plantas se muestran en la Figura 12 y Figura 13 respectivamente. Como allí puede observarse, la mayoría de la superficie útil (de 431 m²) se encuentra en la planta baja, donde se localiza la zona de público. Al igual que ocurría en la Sala Chocolat, no toda esta superficie útil es de interés para el presente estudio, ya que el objetivo es caracterizar la ventilación de los espacios compartidos por los ocupantes del establecimiento. Por tanto, durante las pruebas se cerraron las puertas que comunican con oficinas, almacenes y salas de maquinaria, de forma que estos espacios quedasen aislados del recinto principal. La superficie resultante estimada para este recinto principal es de 290 m². Se ha estimado que el recinto tiene una altura promedio de 4.25 m, dando como resultado un volumen de 1230 m³ para la zona de realización de las pruebas.

En cuanto a los sistemas de ventilación y climatización, éstos se ilustran de forma esquemática en la Figura 14. Como puede observarse, el local dispone de dos sistemas de ventilación forzada, de 5100 y 3000 m³/h respectivamente. Estos circuitos están indicados en verde, y consisten en sistemas de extracción de aire. Tal como se detallará más adelante, las pruebas revelaron que el primero de estos sistemas de extracción (V1) no funciona conforme a lo esperado, ya que no se detectó aspiración a través de sus rejillas. Los resultados de las pruebas indicaron que, además, podría disponer de algún tipo de entrada externa no indicada en este esquema, o de interconexión con el sistema de climatización. Por este motivo, esta línea (verde continua) ha sido tachada de la



Figura 14. En vista de estos resultados, el establecimiento habilitó para la segunda jornada de pruebas una línea alternativa de extracción, indicada en la Figura 14 mediante trazo verde discontinuo.

En lo que respecta al sistema de climatización, tan solo la unidad número 2 (U.I.2 en Figura 14), con un caudal máximo nominal de 11000 m³/h, dispone de un modo de funcionamiento que le permite introducir aire exterior. La U.I.1, por el contrario, tan solo puede trabajar en modo recirculación. Por tanto, los medios disponibles para ventilar el local con aire exterior incluyen las dos líneas de extracción, así como la línea de climatización conectada a la U.I.2.

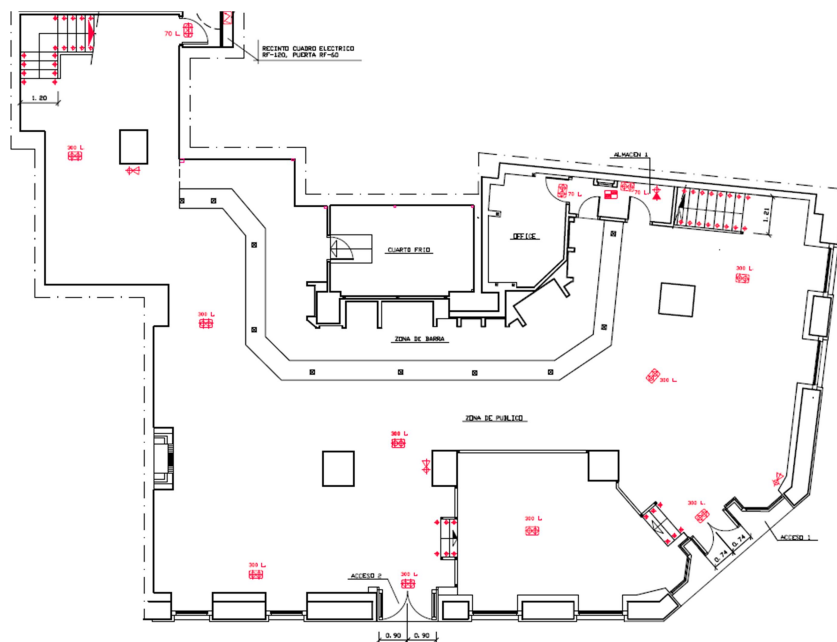


Figura 12. Plano de la planta baja del local Canterbury. Nótese que el plano no se encuentra completo, ya que se han eliminado estancias de almacenaje y oficinas (que no son de interés para este estudio) de su parte superior.



4.1 Prueba sin ocupantes

El día 16/01/2020 se llevó a cabo una prueba sin público, en la que se trató de evaluar cómo de efectiva es la ventilación del local. Para ello, se realizaron estudios análogos a los presentados en el capítulo anterior para la Sala Chocolat, utilizando hielo seco para sembrar con CO₂ el local, activando a continuación los sistemas de ventilación y climatización bajo distintas condiciones. Mediante la evolución temporal de la concentración de CO₂ en el local (obtenida de los registros de los distintos analizadores) puede estimarse cómo de efectiva es la ventilación del establecimiento, cuantificando asimismo el caudal de aire que ésta es capaz de mover.

4.1.1 Situación de los sensores

Para esta primera prueba se emplearon un total de 20 analizadores, que se distribuyeron por el establecimiento de acuerdo con lo indicado en la Figura 15. Como puede observarse, cuatro analizadores (L1, L2, L3 y L4) se colgaron de la balaustrada de la entraplanta. También a mayor altura se situaron los sensores C1, C2, C3 y C4, que se instalaron frente a las rejillas de las dos líneas de ventilación (V1 y V2 en Figura 14). El resto de los sensores se distribuyeron en la planta baja, tanto sobre trípodes como fijados a distintas zonas del local.

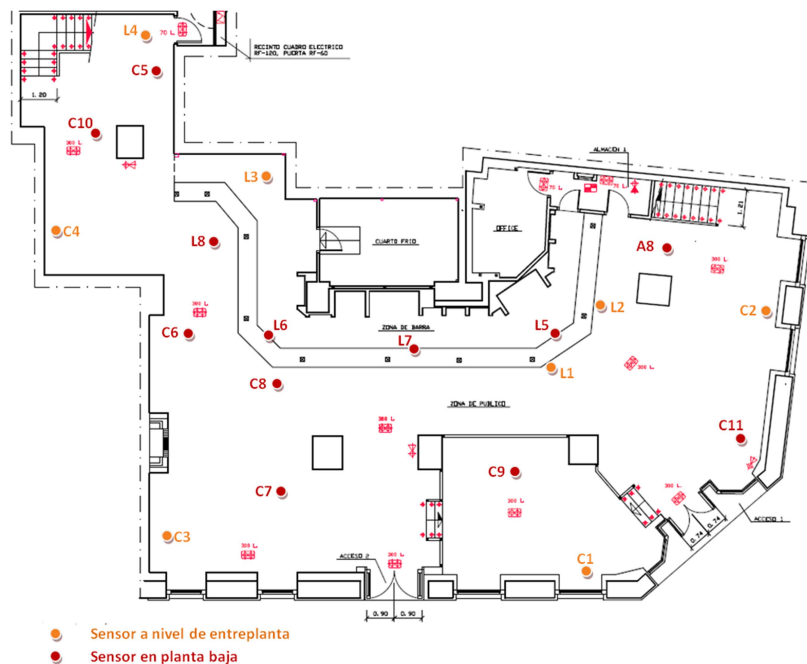


Figura 15. Plano del local Canterbury (planta baja), con la localización de todos los sensores empleados en las medidas del 16/01/2021.



4.1.2 Matriz de ensayos

En esta primera sesión se llevaron a cabo 3 pruebas diferentes:

- 1.1 Las dos extracciones funcionando.
- 1.2 Recirculación funcionando.
- 1.3 Las dos extracciones y la climatización con aire exterior.

4.1.3 Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los 3 ensayos llevados a cabo sin ocupantes en el local. En realidad, se encontraban presentes personal del local y el equipo del LIFTEC, pero dado que es un número muy inferior al del aforo máximo, no afecta significativamente a los resultados (en cualquier caso, estos podrían corregirse teniendo en cuenta la emisión de CO₂ de las personas presentes).

Para los 3 ensayos se llevaron a cabo dos siembras de CO₂ para después, una vez homogeneizado el ambiente, conectar los diferentes sistemas de extracción y ventilación disponibles con la puerta del local cerrada o abierta.

A continuación, se muestra la evolución temporal de la concentración de CO₂ durante dichos ensayos.

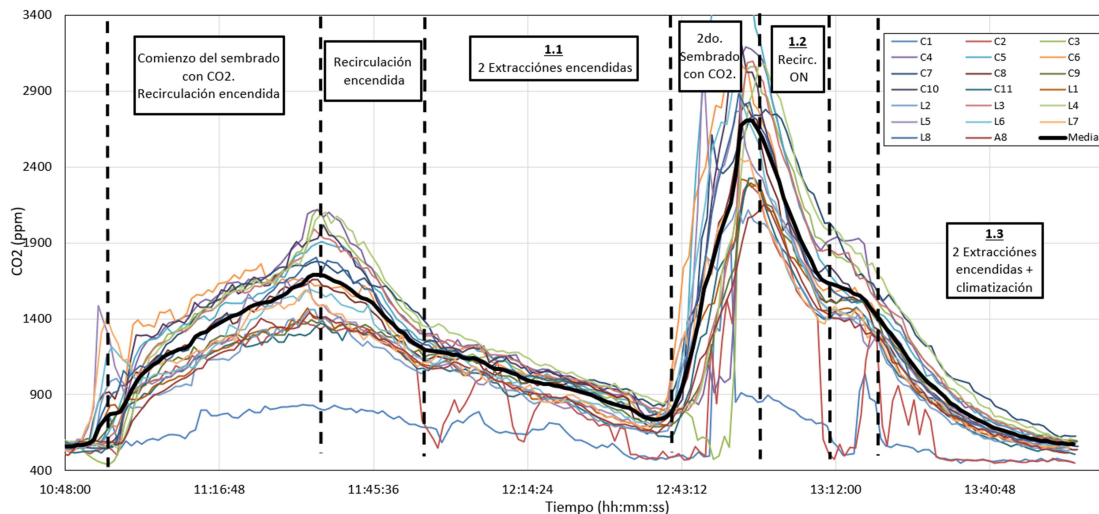


Figura 16. Evolución temporal de la concentración de CO₂ registrada por los sensores durante los ensayos del día 16/01/2021.

En la Figura 16 se muestra el registro obtenido para todos los analizadores de CO₂ a lo largo de toda la mañana, donde se identifican, separados por barras verticales los intervalos de tiempo correspondientes a los distintos ensayos. Una vez más, se puede distinguir la secuencia que consta de 3 partes diferenciadas: la siembra del CO₂, la estabilización y homogeneización, y finalmente el descenso que se produce al activar la



ventilación. Es precisamente en esta última etapa del ensayo donde se obtienen los datos de caudal y renovaciones por hora que se comentan a continuación. En este caso, en la última bajada se han llevado a cabo 2 ensayos, como se detalla más adelante.

Al comienzo de los ensayos, a las 11:00, se conectó la recirculación del circuito de climatización para homogeneizar el ambiente del local, a la vez que se sembraba CO₂ con bandejas de hielo seco. Cabría esperar que el nivel de CO₂ subiera al mismo ritmo en todos los analizadores, puesto que se está mezclando mediante esta recirculación. Sin embargo, el ritmo de subida resultó más lento de lo que cabría esperar en relación al hielo seco sublimado. Cuando se retiró el hielo seco, se dejó la recirculación funcionando unos minutos con el fin de homogeneizar el ambiente para que la concentración de CO₂ fuese similar en todos los medidores antes de comenzar el ensayo. En esta fase de estabilización, el CO₂ comenzó a bajar de forma acusada, en lugar de mantenerse estable. Esto indicaba claramente que el circuito de aire acondicionado poseía alguna conexión con el exterior, cuando se suponía que estaba ajustado para recircular sin entrada de aire exterior. Este extremo fue posteriormente confirmado por la empresa de climatización, que realizó las modificaciones oportunas, de manera que en la segunda prueba, con ocupantes, podía recircularse sin entrada de aire de la calle.

En general, puede observarse una dispersión apreciable entre las lecturas de los distintos sensores. Esto puede deberse en parte a la distinta cantidad de CO₂ generado en cada zona, pero tiende a reflejar también variaciones en la intensidad de ventilación en las diversas partes del local. En cualquier caso, puesto que la tasa de ventilación no se evalúa a partir del valor de CO₂ sino de su evolución temporal, estas diferencias no afectan a los resultados obtenidos en esta primera prueba.

Pese a que la mayoría de los sensores siguen el mismo comportamiento, se observan algunas excepciones, como es el caso de C1 y C2. Estos sensores estaban ubicados junto a rejillas que se suponía que pertenecían al circuito de extracción V1 (ver Figura 14), con el fin de tomar una lectura que pudiera ser representativa de toda la zona de la que se extrae el aire. Sin embargo, la aparente e inesperada interconexión entre V1 y la línea de climatización U.I.2 hizo que estas rejillas resultaran ser impulsiones del aire acondicionado. Puesto que la U.I.2, como se ha comentado, aporta cierta cantidad de aire exterior, esto explica las bajas concentraciones de CO₂ que se midieron al activar la recirculación.

4.1.3.1 Tasa de ventilación global

Como ya se ha visto en repetidas ocasiones, la tasa de ventilación del local puede estimarse a partir de la caída registrada en la concentración de CO₂, mediante un balance de materia. En la Tabla 4 se muestran los resultados que se han obtenido



analizando la evolución temporal de la concentración de CO₂ en esta última etapa de los ensayos.

Tabla 4. Resultados del análisis temporal de los registros de CO₂ en cada uno de los tres ensayos realizados.

Ensayo	1.1	1.2	1.3
ACH	1,09	3,21	3,86
Q (m ³ /h)	1340	3947	4745

A partir de la curva de caída del CO₂ promedio se calculó el número de renovaciones de aire por hora, ACH (*Air changes per hour*). Y para un volumen total del local estimado de 1230 m³, se puede estimar el caudal real que mueve el sistema de extracción en cada una de las condiciones ensayadas. Debe indicarse que, debido a la fuerte asimetría que existe en la extracción (solamente actúa en el lado izquierdo), esta operación de promediado sobre las medidas de todo el local puede conllevar un incertidumbre importante.

En el ensayo 1.1 se evalúa el caudal de ventilación que mueve la extracción. Se tenía como referencia un caudal de extracción teórico de 5100 m³/h, dado que solamente funciona la extracción izquierda. Los resultados indican que el caudal real extraído podría situarse en torno a 1340 m³/h. Incluso con la alta incertidumbre que se ha mencionado, esta estimación sugiere que la capacidad real del sistema se encuentra claramente por debajo de su valor nominal.

Seguidamente, tras este primer descenso en la concentración de CO₂, en torno a las 12:43 se vuelve a sembrar CO₂. Al conectar la recirculación durante unos cuantos minutos (prueba 1.2 en Figura 16) se observa una abrupta caída, de la cual se puede estimar un caudal de 3947 m³/h (cuando este caudal debería ser de 0 m³/h debido a que la recirculación no debería modificar la composición del ambiente interior).

Finalmente, en la última bajada (prueba 1.3 en Figura 16), se evalúa el combinado de la extracción que funciona (V2) y del climatizador que es capaz de introducir aire exterior (U.I.2). En esta configuración el caudal movido es de 4745 m³/h. Si restamos el caudal estimado para la extracción en la prueba 1.1 (1340 m³/h.), el caudal que movería la climatización con aire exterior sería de 3405 m³/h, que no es muy distinto del valor estimado sin extracción en la prueba 1.2 (3947 m³/h).



4.1.3.2 Diferencias entre sensores y zonas

Una vez más, para tener un análisis pormenorizado de cómo funciona la ventilación del local en cada zona conviene hacer un análisis de cada uno de los sensores y zonas. Para ello, se muestra en la Figura 17 la segmentación del local en 3 zonas diferenciadas:

- Ala Derecha: la ubicada a la derecha de la puerta de entrada central del local.
- Ala Izquierda: la ubicada a la izquierda de la puerta de entrada central del local.
- Fondo: la zona ubicada al fondo, a la izquierda del local.

Atendiendo a esta división del establecimiento en zonas, en la Tabla 5 se muestran las renovaciones de aire por hora (ACH) medidas por cada uno de los sensores.

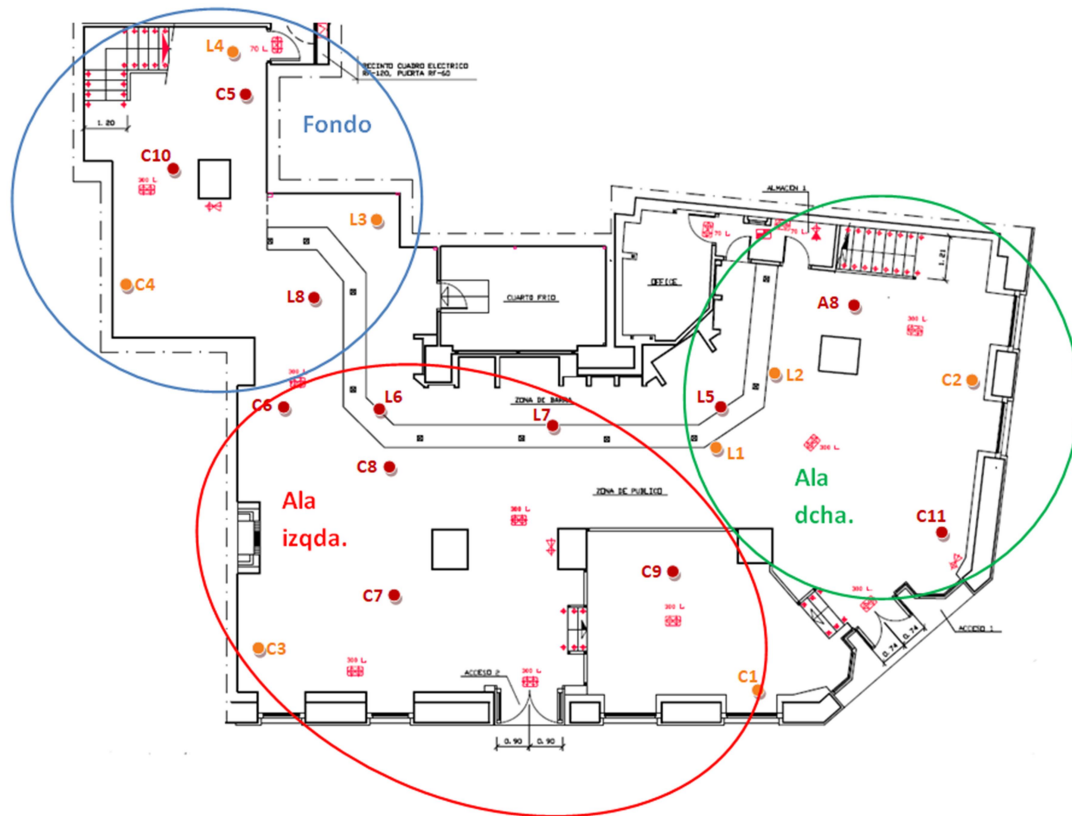


Figura 17. Segmentación de los analizadores instalados en local el 16/01/2021 en tres zonas: fondo (azul), ala izquierda (rojo) y ala derecha (verde).



Tabla 5. ACH medida por cada sensor en orden descendente. En azul los sensores ubicados al fondo del local, en rojo los ubicados en el ala izquierda, en verde los ubicados en el ala derecha. (C1 y C2 excluidos).

Ensayo	1.1	Ensayo	1.2	Ensayo	1.3
L2	1,48	C6	4,13	C11	4,36
A8	1,36	C10	4,11	C10	4,10
L6	1,35	C5	4,08	L1	4,08
L5	1,33	L8	3,90	L2	4,05
L7	1,31	C4	3,90	L8	3,99
L1	1,28	C8	3,67	C8	3,93
C11	1,26	L7	3,45	C6	3,92
Promedio	1,09	C11	3,36	L7	3,92
C3	1,07	L6	3,34	L6	3,90
L4	1,03	L3	3,26	A8	3,89
C5	1,02	Promedio	3,21	Promedio	3,86
C4	1,01	A8	3,12	C4	3,86
L3	1,00	L2	3,08	L5	3,84
L8	0,96	L1	2,76	L3	3,76
C6	0,93	C3	2,70	C5	3,70
C10	0,86	L5	2,58	C9	3,69
C9	0,85	L4	2,56	L4	3,68
C8	0,76	C9	2,49	C3	3,61
C7	0,75	C7	1,29	C7	3,14

Como se puede ver en la Tabla 5, cuando la extracción está encendida (ensayo 1.1) la zona del ala derecha presenta una mejor ventilación que el resto de la sala, llegando a ser estas diferencias superiores al 50% en muchos casos. Anteriormente se ha comentado que parecía ser que el circuito de extracción del ala derecha parecía no funcionar. Sin embargo, esta zona parece que ventila mejor que el resto. Esto puede ser debido a que es por esta zona por donde entra el aire exterior a la sala, como se ha comentado al analizar el comportamiento de los sensores C1 y C2.

En la prueba 1.2, cuando únicamente funciona la recirculación, la zona mejor ventilada parece ser el fondo del local, cuyos sensores presentan las tasas de ventilación más altas. Las más bajas recaen en la zona del ala derecha, junto con algún sensor de las otras dos zonas. No se ha encontrado una explicación clara para este comportamiento.

Por último, cuando se suman los efectos de la extracción y la climatización con aire exterior, la zona mejor ventilada vuelve a ser el ala derecha del local. Sin embargo, en esta ocasión las diferencias relativas son bastante menores entre zonas y sensores. Una explicación simple a estos resultados es que, al ser el ensayo en el que más caudal de aire se mueve, el ambiente está mejor mezclado. De hecho, si se vuelve a la Figura 16,



se puede observar que en este ensayo las diferencias entre las medidas de los sensores son menores.

Cabe destacar el comportamiento del sensor C7 que en todos los ensayos registra el menor nivel de renovaciones por hora, sin encontrarse una explicación clara a este resultado.



4.2 Prueba con ocupantes

El día 21/01/2021 se realizó una segunda prueba, en este caso con el local ocupado por un máximo de 101 personas. Tal como se describe en el capítulo de metodología, el objetivo de estas pruebas es evaluar la calidad del aire bajo condiciones realistas de operación. La existencia de ocupantes en el establecimiento supone la introducción de una fuente de generación continua de CO₂, que el sistema de extracción debe ser capaz de evacuar con la suficiente rapidez para conseguir niveles saludables dentro del recinto. En vista de los resultados del 16/01/2021, para esta segunda prueba se habilitó una línea de extracción alternativa a la V1 original. Esta línea alternativa se indica en la Figura 14 mediante trazo verde discontinuo. Debido a estos cambios, las conclusiones obtenidas acerca de la cantidad y distribución de la ventilación en la prueba sin ocupantes no son aplicables en estas mediciones.

4.2.1 Situación de los sensores

En la segunda prueba se emplearon 20 analizadores, con una distribución ligeramente distinta a la mostrada para el 16/01/2021. En este caso:

- 9 sensores se instalaron en las paredes. Entre ellos, la mayor parte se colocaron a una altura de 2.5 metros: C1, C2, C3, C4, C5, C6 y C7. El analizador C11 se colocó a una altura de más de 3 metros sobre el suelo de la planta baja, mientras que el A8 se instaló a unos 4.5 metros de altura, cercano al techo de la entreplanta.
- Asimismo, otros 4 analizadores se colgaron de la balaustrada de la entreplanta: L2, L4, L6 y L7.
- El C8 se posicionó dentro de la barra, a una altura inferior a 2 metros.
- Finalmente, 6 sensores se colocaron sobre trípides en la planta baja: L1, L3, L5, L8, C9 y C10.

Como puede observarse, en esta prueba se instaló un mayor número de sensores a elevada altura, con el objetivo de tratar de minimizar la posible influencia de la respiración cercana de los ocupantes en los niveles de CO₂ medidos por los analizadores.

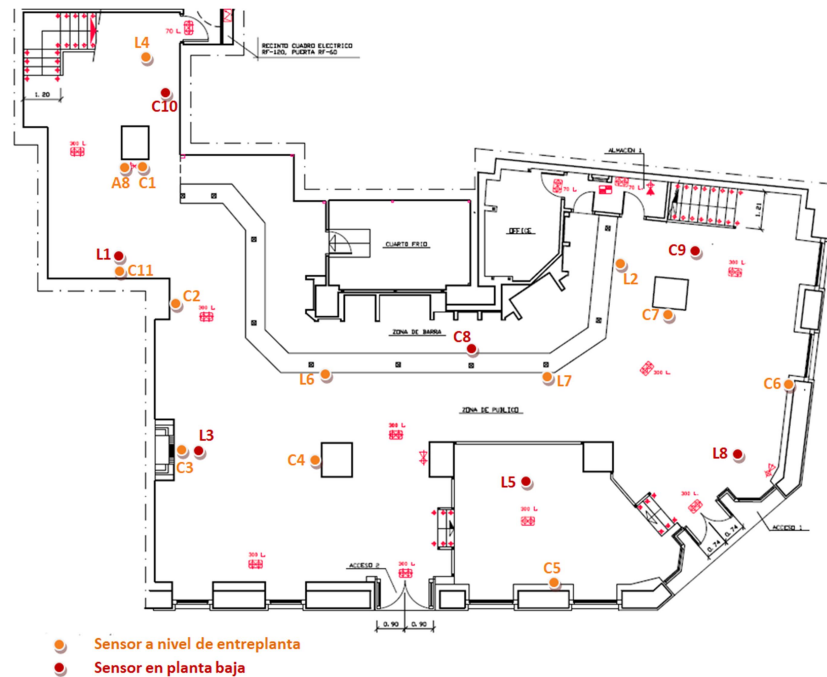


Figura 18. Plano del local Canterbury (planta baja), con la localización de todos los sensores empleados en las medidas del 21/01/2021.

4.2.2 Matriz de ensayos

En esta ocasión, debido a que la prueba se realizó durante el funcionamiento normal del local, los ensayos no se pueden considerar como pruebas independientes. Simplemente se cambió el modo de funcionamiento de los diferentes sistemas de ventilación del local.

- 2.1 Climatización en modo automático a 22 °C, sin entrada de aire exterior, puertas cerradas.
- 2.2 Ambas extracciones funcionando con puertas cerradas.
- 2.3 Ambas extracciones funcionando, climatización con aire exterior y puertas cerradas.
- 2.4 Ambas extracciones funcionando, climatización con aire exterior y puertas abiertas.
- 2.5 Ambas extracciones funcionando con puertas cerradas.



4.2.3 Resultados

En este apartado se comentan los resultados obtenidos en términos globales. En la Figura 19 se muestra la evolución temporal de la concentración de CO₂ así como el número de ocupantes que hay en el interior del local en todo momento.

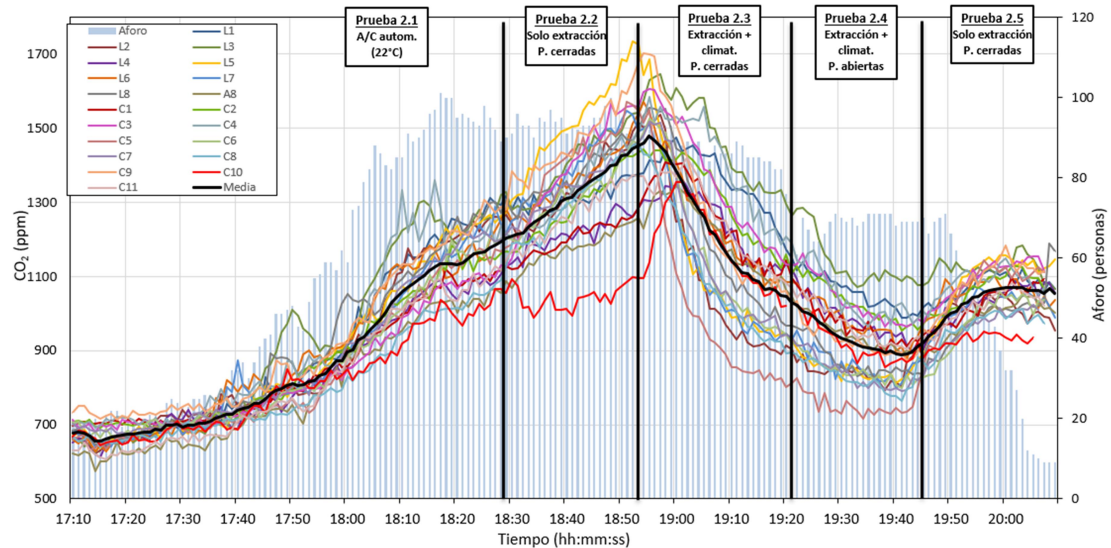


Figura 19. Evolución temporal de la concentración de CO₂ y número de personas en el interior del local durante los ensayos llevados a cabo el día 21/01/2021.

En líneas generales, tal y como se puede ver en la Figura 19, el comportamiento es relativamente homogéneo entre sensores, no siendo así las concentraciones registradas, que en algunos tramos presentan diferencias de hasta 400 ppm.

Al comienzo de la sesión de ensayos, mientras la climatización está en modo automático a 22 °C (prueba 2.1), el número de personas comienza a subir progresivamente y con él la concentración de CO₂, tal y como cabría esperar. A diferencia de los ensayos con aforo constante en la sala Chocolate, la curva que define la evolución temporal es cóncava en vez de convexa, debido a que el número de personas se va incrementando con el tiempo. La tendencia empieza a cambiar cuando deja de aumentar el número de personas sobre las 18:15. A partir de este punto, si se esperase el tiempo suficiente sin cambiar condiciones llegaría a alcanzarse un valor constante, dado por el equilibrio entre el CO₂ emitido y el retirado por la ventilación.

Más adelante en el tiempo, a las 18:26, se desconecta la climatización y se conectan las dos extracciones, comenzando la prueba 2.2. La concentración de CO₂ sigue aumentando a buen ritmo, demostrando que la tasa de ventilación resulta insuficiente para renovar el aire del recinto a un ritmo suficiente. Al mismo tiempo, las curvas de los distintos sensores se separan, dado que la circulación de aire fresco es diferente entre las distintas zonas del local, como se discute más adelante.



Tras un tiempo suficiente para constatar que la extracción por sí sola no permite estabilizar los niveles de CO₂, se conecta la climatización con aire exterior, sin quitar la extracción. En teoría, el sistema está dimensionado para aportar un caudal de aire fresco de 11000 m³/h a través de la U.I.2 (Figura 14), pero sería necesario realizar alguna comprobación para comprobarlo. En cualquier caso, el caudal de aire exterior que se aporta es suficiente para hacer bajar la concentración de CO₂ de forma acusada, como puede corroborarse en la Figura 19 para el tramo correspondiente a la prueba 2.3. Además, durante este ensayo el número de personas se mantuvo constante, por lo que puede establecerse una comparación válida con el ensayo 2.2.

A las 19:20, se abren las puertas del local, además de una reducción del número de personas de unas 20. Estas condiciones corresponden a la prueba 2.4, en la cual no se percibe un cambio de tendencia o un punto de inflexión. Esto posiblemente sea debido a que, al contrario que en el caso de la sala Chocolate, las puertas no supongan una restricción importante a la entrada de aire exterior cuando la extracción funciona. Parece confirmar que, o bien las rendijas que dejan las puertas permiten la entrada de flujo, o bien que existe algún otro punto por el que puede entrar aire del exterior.

Para terminar, a las 19:42 se desconecta la climatización y se cierran las puertas (prueba 2.5). El resultado inmediato es que la concentración de CO₂ comienza a subir con fuerza. Esta subida se ve detenida por un rápido descenso en el número de personas presentes en el local.

Junto a este comportamiento general, se han apreciado algunas diferencias significativas entre sensores, que se comentan en el siguiente apartado, donde se compara el comportamiento de las distintas zonas del local.

4.2.3.1 Diferencias entre sensores y zonas

En este apartado se vuelven a estudiar las diferencias encontradas entre sectores del local. Análogamente a la segmentación realizada en las medidas del 16/01/2021, aquí se vuelven a estudiar 3 zonas: fondo, ala izquierda y ala derecha. La distribución de los distintos sensores en estas 3 zonas se muestra en la Figura 20.

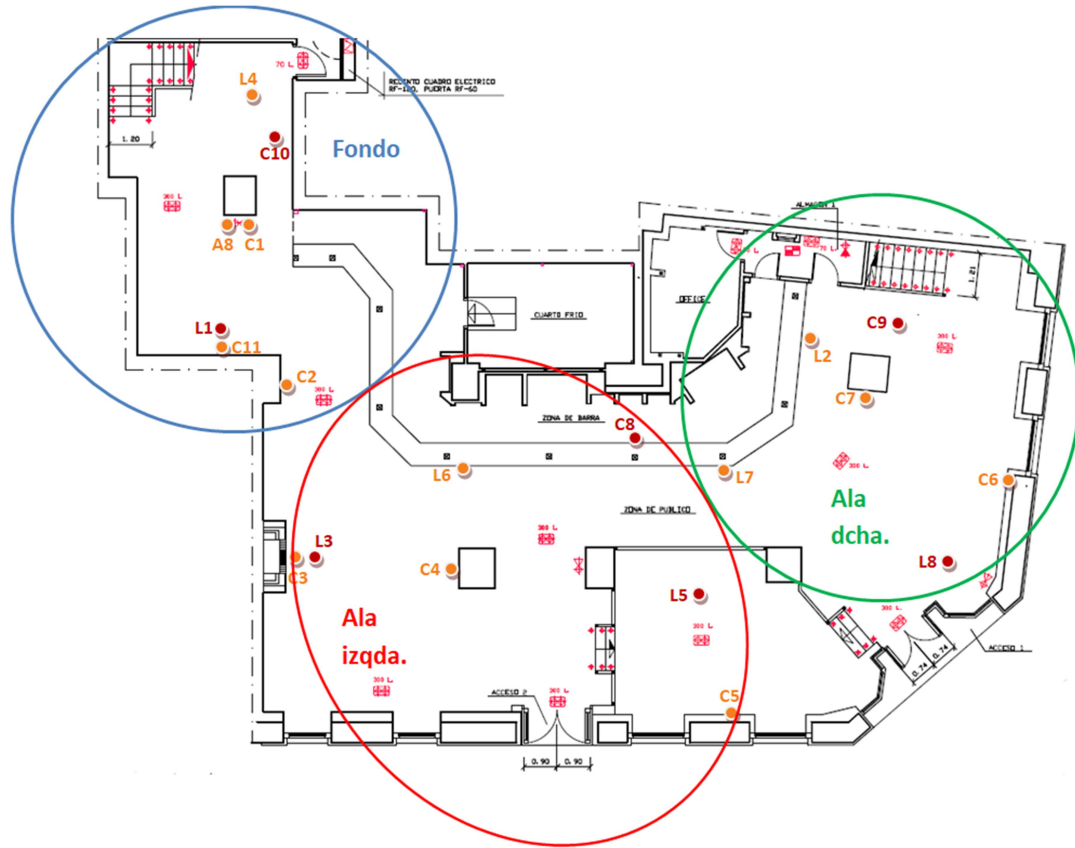


Figura 20. Segmentación de los analizadores instalados en local el 21/01/2021 en tres zonas: fondo (azul), ala izquierda (rojo) y ala derecha (verde).

Si se promedian los resultados dados por los analizadores de cada una de estas zonas se obtienen las curvas representadas en la Figura 21. Como puede observarse, el comportamiento relativo de cada zona cambia significativamente en función de los ajustes de la ventilación.

Durante la prueba 2.1, donde no hay ventilación exterior, las menores concentraciones se dan en el fondo, mientras que en el lado derecho se supera la media. Seguramente se debe simplemente a la distribución de los clientes, con más densidad por metro cuadrado en la parte derecha.

Al activar la extracción en la prueba 2.2, el fondo resulta claramente beneficiado, mientras que las otras dos zonas quedan por encima del promedio en el local. La mayor potencia de la línea izquierda de extracción, junto con una menor densidad de personas en la zona del fondo seguramente justifican esta distribución.

La posición relativa se invierte al activar la entrada de aire exterior a través de la climatización (pruebas 2.3 y 2.4). Se supone que esta instalación es capaz de aportar una cantidad de aire superior a las extracciones (en teoría, hasta 11000 m³/h, aunque se



desconoce cómo quedó su capacidad real en esta segunda jornada de ensayo). Como consecuencia, la tasa de ventilación mejora muy notablemente en el ala derecha y también en el recinto que se encuentra entre las dos puertas.

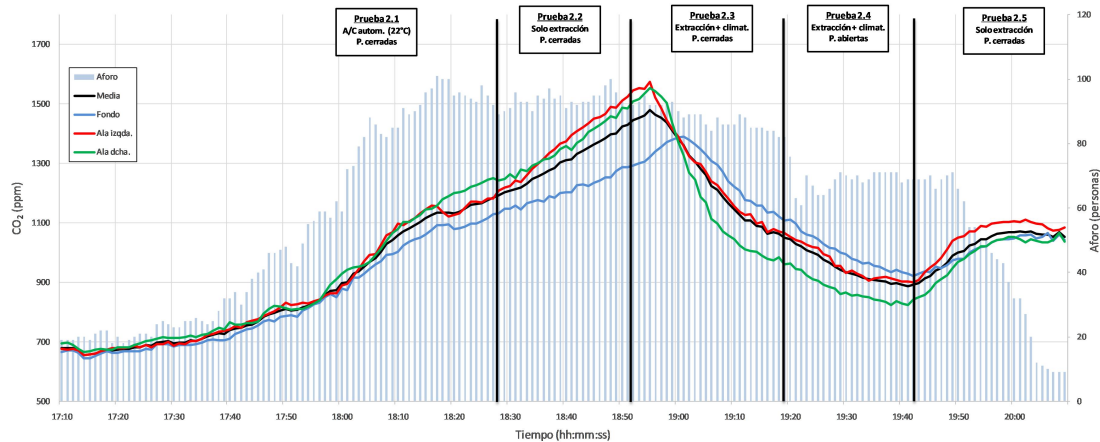


Figura 21. Evolución temporal de la concentración de CO₂ por zonas en el local Canterbury (medidas del día 21/01/2021).

Por otro lado, la Figura 22 analiza en detalle los sensores de la zona fondo del local. En ella puede verse que el sensor C10, situado en el extremo de la barra, muestra los valores más diferenciados. Cuando solamente funciona la extracción, su lectura es notablemente baja, gracias a que esta zona del fondo está bien ventilada, no hay ocupantes cerca del sensor y, además, se encuentra bastante aislado del resto del local.

El resto de sensores de esta zona del fondo siguen el patrón general que ya se ha comentado: valores por debajo de la media del local cuando solamente se activan las líneas de extracción, mientras que lo superan cuando se pone en marcha la climatización con toma de aire exterior.

Por otro lado, el L1 da niveles algo superiores al resto de sensores instalados en el fondo del local. Se cree que esto pueda deberse a su cercanía a grupos de gente. El analizador C11 está situado exactamente en la misma posición que el L1 pero aproximadamente 1 metro por encima, y da niveles de CO₂ significativamente inferiores, más cercanos a la serie promedio. Las diferencias, sin embargo, no son muy significativas.

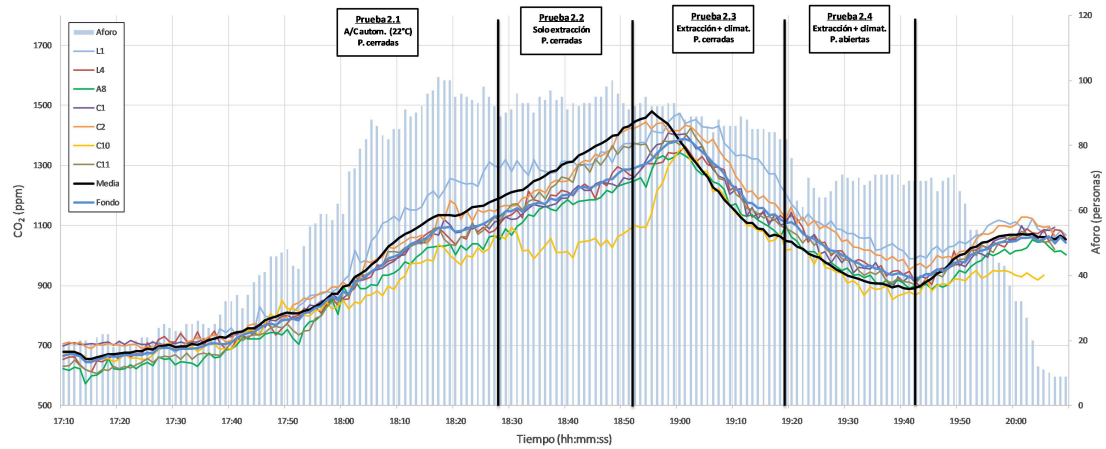


Figura 22. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en la zona del fondo del local Canterbury.

El comportamiento del ala izquierda del local se detalla en la Figura 23. En este caso, las diferencias entre sensores son mayores que las mencionadas para la zona fondo, especialmente durante la prueba 2.3. Se aprecia aquí muy claramente el cambio de tendencia de algunos analizadores al activar la climatización con aire exterior. En la prueba 2.2 el sensor L5, situado en el espacio situado entre las puertas, daba los valores máximos del local. En esa zona no hay prácticamente circulación de aire, puesto que no está cerca de ninguna de las extracciones. En cambio, al activar la entrada de aire exterior con la climatización, ambos sensores, especialmente el L5, pasan a dar lecturas mucho más bajas que el resto.

Una evolución inversa siguen los sensores L3, C3 y C4, situados cerca de la chimenea. Esta zona se ve muy favorecida por la línea de extracción izquierda, pero no recibe el aire exterior que entra con la climatización, con lo que la concentración sube por encima de la media a partir de la prueba 2.3.

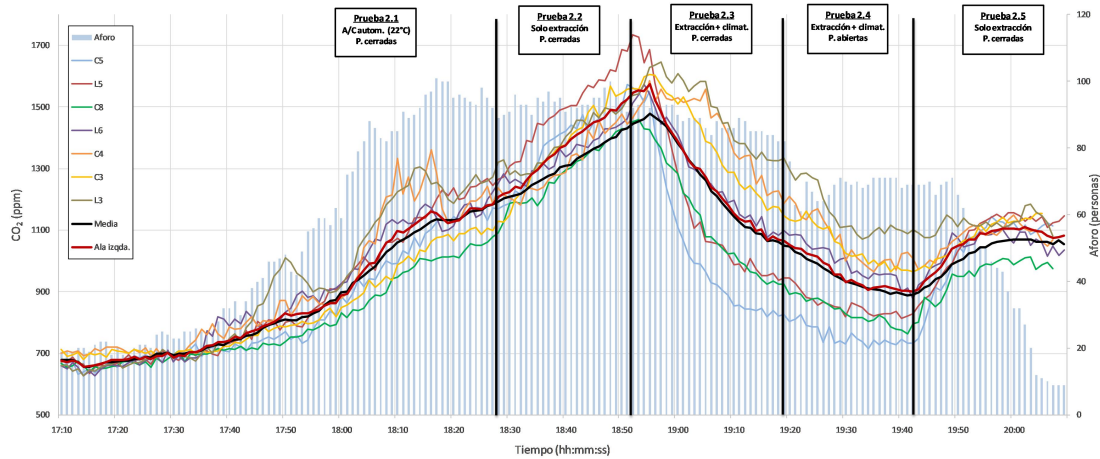


Figura 23. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en la zona del ala izquierda del local Canterbury.

Finalmente, en la Figura 24 se muestra la evolución de todos los sensores pertenecientes al ala derecha del local. Como puede observarse, las diferencias entre ellos son relativamente pequeñas, muy inferiores a las mostradas en la Figura 23 para el caso del ala izquierda. El único que destaca ligeramente por encima del resto es el sensor C9, cuya cercanía a una mesa ocupada y baja altura (se colocó sobre trípode) pueden justificar los mayores niveles registrados. Las tendencias generales nuevamente demuestran que este lado se encuentra muy favorecido por el aire exterior que entra con la climatización, pasando de mostrar valores elevados (en particular C9) en la prueba 2.2 a bajar claramente por debajo de la media del local a partir de 2.3.

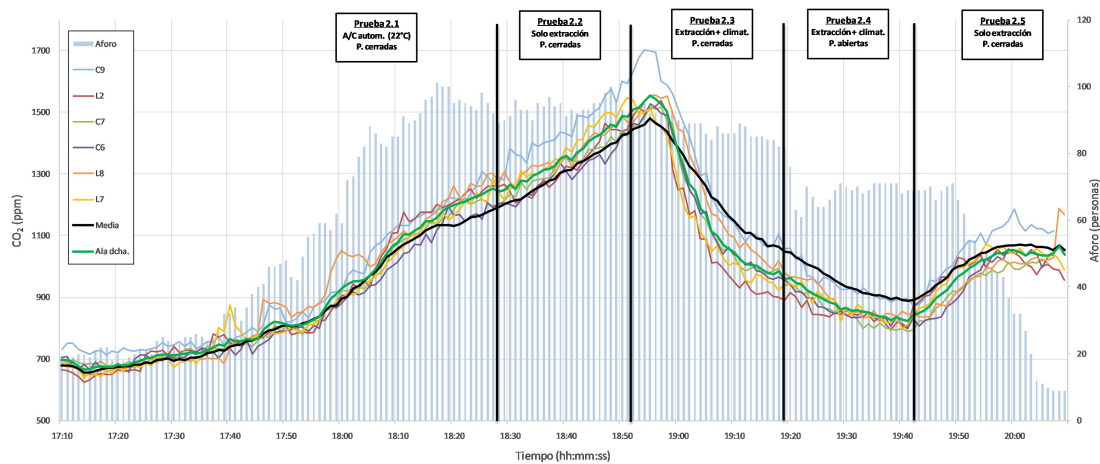


Figura 24. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en la zona del ala derecha del local Canterbury.



4.2.3.2 Comparación con simulaciones

Se han realizado algunas estimaciones teóricas de la evolución de CO₂ en la sala en función de la ocupación, como medio para estimar la tasa de ventilación que daría un resultado similar al promedio obtenido en las medidas. A continuación se indican las estimaciones obtenidas para distintos tramos de pruebas:

- Prueba 2.2 (2 extracciones): La curva de CO₂ durante la media hora que dura esta prueba se correspondería aproximadamente con un caudal de aire exterior de unos 1800 m³/h. Aunque estas estimaciones deben tomarse con precaución, teniendo en cuenta los aproximadamente 1400 m³/h obtenidos para la línea izquierda, indicaría que la extracción que se habilitó para esta prueba en la zona derecha podría estar aportando unos 400 m³/h (tal vez algo más, puesto que con ambas extracciones en marcha, la primera podría estar trabajando con menos caudal).
- Pruebas 2.3 y 2.4 (2 extracciones + climatización con aire exterior): La reducción de CO₂ registrada indica que el caudal total de aire exterior en este periodo puede estar en torno a 4500 m³/h, lo que supone un incremento significativo debido a la climatización, aunque parece claramente inferior a los 11000 m³/h que se supone que debería aportar esta instalación.

En cuanto al dimensionado necesario de la tasa de ventilación con aire exterior necesaria, aplicando los factores de emisión de CO₂ propuestos por la Escuela de Salud Pública de Harvard), y suponiendo una concentración ambiente de 420 ppm, con el caudal de las instalaciones actuales, estimado en 4500 m³/h, para una ocupación estable de 100 personas la concentración de CO₂ se situaría en torno a 905 ppm. Para limitarlo a los niveles de referencia que suelen considerarse, el caudal necesario podría estar en torno a los siguientes valores:

- 5900 m³/h para no superar 800 ppm
- 8000 m³/h para no superar 700 ppm

Estas concentraciones serían los valores promedio estimados en la sala. Puesto que puede haber puntos peor ventilados, podría ser necesario fijar caudales superiores, además de intentar equilibrar la circulación de aire en toda la sala.



4.3 Ensayos en funcionamiento normal

Como complemento al estudio realizado se han añadido una serie de medidas llevadas a cabo con 8 sensores que estuvieron ubicados en diferentes puntos del local durante dos días y medio. Durante estos dos días el número de personas fue anotado cada media hora por personal del local. Los sistemas de ventilación y climatización únicamente se controlaron en la tarde del día 21, que fue cuando se llevaron a cabo las pruebas con ocupantes.

A continuación, se muestra una gráfica que contiene la media de CO₂ medida en cada momento.

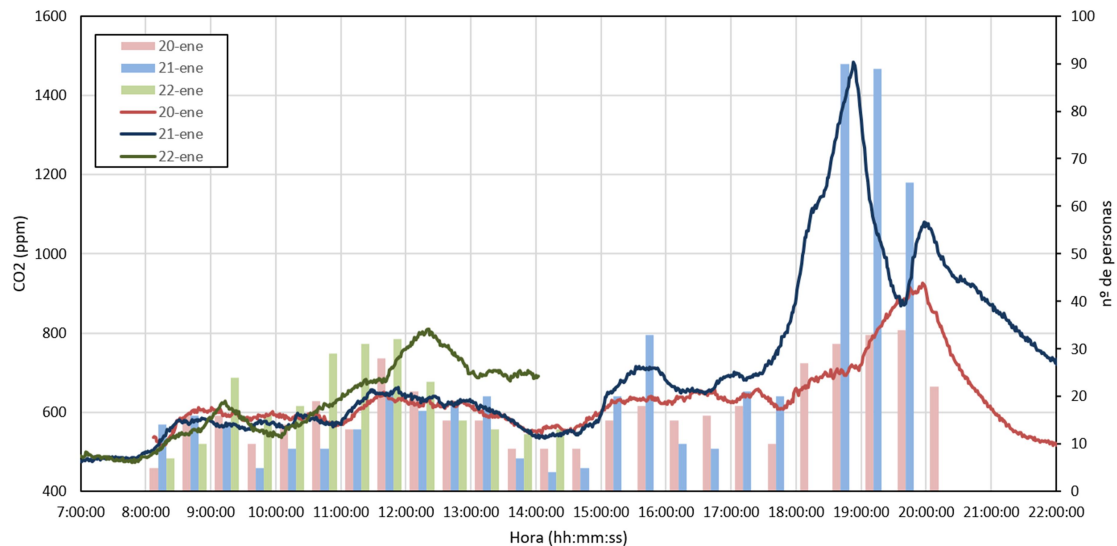


Figura 25. Concentración de CO₂ (líneas) y número de personas (barras) en el local durante los 2 días y medio que duró la prueba.

Como muestra la Figura 25, en general la concentración de CO₂ se mantuvo en valores bajos, superando 800 ppm solamente durante aprox. 1 hora del día 20. Esto es debido a que la ocupación se mantuvo siempre en valores bajos, con picos que superan por muy poco los 30 ocupantes. En general, se observa una buena correlación entre número de personas y concentración de CO₂. Esta correlación es más obvia por las mañanas, sin embargo, en ese momento se desconoce cómo estaba funcionando el sistema de climatización del local.

Por último, puede observarse cómo, a partir de las 20:00 cuando el local cierra, la concentración de CO₂ comienza a descender. A las 7:00, cuando el local lleva toda la noche vacío, la concentración de CO₂ es de 450 ppm, que seguramente coincide con la concentración en el ambiente exterior en esa parte de la ciudad.



4.4 Resumen y conclusiones

En el bar Canterbury se ha seguido el mismo procedimiento que se inició en la sala Chocolat, realizando dos series de medidas que aportan datos complementarios.

En primer lugar, se utilizó hielo seco para estimar la capacidad real del sistema de extracción. Durante las pruebas se detectó que una de las dos líneas de extracción no estaba activa y los resultados indican que la capacidad de la otra se encuentra por debajo de su caudal esperado. También se concluyó que el circuito de climatización aportaba siempre cierta cantidad de aire exterior, incluso cuando se suponía que solamente estaba recirculando. Ambos aspectos se revisaron para la segunda prueba, por lo que los datos obtenidos en la primera no son directamente aplicables para las medidas con ocupantes. En cualquier caso, esta primera prueba resultó muy útil para realizar una primera evaluación del comportamiento de las distintas zonas, así como para estimar el caudal extraído con la línea de extracción del lado izquierdo.

En las pruebas con ocupantes se evaluó el grado de ventilación que puede conseguirse con la instalación actual, para un aforo cercano a 100 personas. A pesar de haber habilitado la segunda línea de extracción, la utilización de ambas resultó insuficiente y, con este nivel de ocupación, se superarían con creces las 1500 ppm de CO₂. Al añadir aire exterior a través del sistema de climatización, la situación mejoró claramente. Se estimó que en conjunto, los sistemas disponibles pueden aportar en torno a 4500 m³/h. Con este caudal y una ocupación continuada de 100 personas, el nivel de CO₂ podría estabilizarse en unas 905 ppm.

Un cálculo conservador (mayorando los coeficientes de emisión de CO₂ por persona) indica que, suponiendo una ocupación estable de 100 personas, para no rebasar los límites de 700 y 800 ppm podrían ser necesarios caudales de hasta 8000 y 5900 m³/h, respectivamente.

Dado el tamaño del local, con cierta separación entre zonas, es importante conseguir una ventilación bien distribuida. Además de la distribución adecuada de caudales entre líneas y de rejillas/difusores, es importante localizar los puntos de entrada y salida de manera que se barran todas las zonas. Por ejemplo, debe evitarse crear zonas muertas como es el recinto situado entre las puertas, donde las líneas de extracción actuales no generan movimiento de aire.

Para monitorizar correctamente la calidad del aire sería necesario contar con analizadores situados en distintas zonas. Serían necesarios al menos 2 sensores, aunque sería preferible contar con 3, uno para cada una de las zonas que se han analizado aquí. Los datos generados en este trabajo pueden ser útiles para identificar las localizaciones óptimas, aunque convendría revisarlos si se va a rediseñar el sistema de ventilación.

Comentarios finales

En este informe se presentan los resultados de pruebas realizadas en dos establecimientos de hostelería, que tenían por objetivo caracterizar las capacidades de los sistemas de ventilación instalados y el nivel de CO₂ que se alcanza en ciertas condiciones de ocupación. Ambos son aspectos muy relevantes en relación al riesgo de transmisión aérea de Covid-19, aceptado de forma generalizada como la vía mayoritaria de contagio en ambientes interiores.

Es importante aclarar que el estudio se centra solamente en la ventilación, como aspecto fundamental pero no el único. No se entra a valorar otras medidas fundamentales de prevención, como son la distancia o el uso de mascarillas, que se da por supuesto que deben respetarse escrupulosamente.

Para este estudio se eligieron dos establecimientos con características y configuraciones distintas para que, aunque de alcance limitado, los resultados puedan dar una idea del rango de situaciones que se pueden encontrar. A falta de metodologías probadas y establecidas, en este estudio se desarrolló y aplicó un procedimiento de medida que se considera que ha proporcionado resultados fiables y razonablemente completos.

En los capítulos anteriores se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los establecimientos, por lo que no es necesario repetirlos aquí. Solamente se anotan a continuación algunas observaciones adicionales que se derivan de este estudio:

- En ambos casos, a pesar de mantener siempre la ocupación dentro de los límites que se permiten actualmente (30%), se alcanzaron niveles de CO₂ por encima de los límites recomendados (700-800 ppm). Debe concluirse, por tanto, que aunque la limitación del 30% puede parecer una garantía suficiente, en realidad no lo es. El criterio no debería ser un límite general de aforo, sin tener en cuenta las particularidades de cada local. Si los medios de ventilación no son adecuados,



no está justificado admitir este nivel de ocupación. En cambio, aquellos que posean una instalación de ventilación suficientemente potente, podrían incluso albergar más personas sin sobrepasar los límites recomendados de calidad de aire como los que, por ejemplo, se han establecido para centros educativos. Es necesario desarrollar criterios basados en los parámetros realmente relevantes (p.ej., concentración de CO₂) para asegurar que el riesgo de transmisión aérea se mantiene dentro de los límites aceptados, buscando compatibilizar adecuadamente y con garantías la seguridad y la actividad.

- La evaluación de un cierto local no puede basarse en las capacidades nominales de sus sistemas de ventilación. De hecho, a lo largo de las medidas realizadas en este estudio, la capacidad real de los sistemas de ambos locales para renovar su aire interior se demostró muy inferior a sus valores nominales. Por tanto, es necesario verificar con mediciones la situación real. El parámetro significativo a este respecto es la concentración de CO₂ que se alcanza para la ocupación considerada y, en función del resultado, podrá valorarse si la tasa de ventilación real es suficiente o si es necesario actualizar o ampliar la instalación.
- En general, los equipos de aire acondicionado pueden operar en modo recirculación o con aire exterior. La recomendación es siempre operar con aire exterior (al final, la combinación de esta aportación de aire exterior junto con los equipos de ventilación conectados al exterior –sea extracción o impulsión– determinará la tasa global de ventilación y, por tanto, el nivel de CO₂ que se puede garantizar en el local). Si opera en recirculación, debe asegurarse que la instalación posee filtros de categoría F7 o superior, así como su correcto estado de mantenimiento, con objeto de eliminar un alto porcentaje de las partículas presentes en el aire, dado que es necesario evitar contribuir a la dispersión de aerosoles infecciosos que pudiera generar un posible individuo contagiado.
- La única forma viable en la práctica de asegurar que la calidad del aire interior es la adecuada es realizar una monitorización continua del CO₂. Esta medida debe ser fiable y representativa. Además, debería estar disponible para posibles agentes de supervisión y, posiblemente, mostrarse en lugar visible. Para ello, debe seleccionarse adecuadamente los puntos de instalación y el número de sensores necesarios para obtener una medida representativa de todo el local.

En general, es necesario desarrollar criterios, procedimientos y normativas para establecer los límites de calidad del aire que deben respetarse en locales abiertos al público, los medios que deben utilizarse para ello y, finalmente, los mecanismos que deben garantizar un cumplimiento correcto y permanente. Parece la vía más sólida para, como primera prioridad, asegurar que los riesgos por transmisión aérea se mantienen dentro de los límites aceptados (criterios simplificados como limitar % de aforo por igual en todos los locales no necesariamente aseguran una buena calidad del aire, como



demuestran las medidas realizadas), y hacerlo compatible con una actividad que respete dichos límites. La ventilación con aire exterior, en sus distintas formas, es un método que parece viable de forma generalizada (incluso, posiblemente, desde el punto de vista económico). También pueden considerarse otras opciones (p.ej., filtrado de alta eficiencia), tal y como se indica en los diversos informes y recomendaciones sobre medidas preventivas de transmisión aérea de Covid-19.

Por supuesto, todas estas observaciones deben tomarse con precaución, dado que proceden de estudios realizados únicamente en dos locales. Dada la enorme casuística que puede encontrarse en este tipo de establecimientos, pueden surgir otros aspectos no considerados aquí y estas conclusiones pueden no ser aplicables de forma generalizada.