

# IMPACTO DEL CONFINAMIENTO POR COVID-19 EN LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE CO2 AL INTERIOR DE LA VIVIENDA DE TIPO SOCIAL EN CHILE

## THE IMPACT OF THE COVID-19 CONFINEMENT ON THE CONCENTRATION LEVELS OF CO2 INSIDE SOCIAL HOUSING IN CHILE

## IMPACTO DO CONFINAMENTO POR COVID-19 NOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE CO2 DENTRO DE HABITAÇÕES SOCIAIS NO CHILE

### **Roxana Guíñez-Viveros**

Magíster Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética  
Egresada Magíster Hábitat, Sustentable y Eficiencia Energética, Escuela de Ingeniería en Construcción  
Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-5054-0502>  
guinezroxana@gmail.com

### **Ariel Bobadilla-Moreno**

Doctor en Ciencias de la Ingeniería  
Director Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC).  
Escuela de Ingeniería en Construcción, Departamento de Ciencias de la Construcción  
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
<https://orcid.org/0000-0003-2781-5325>  
abobadil@ubiobio.cl

### **Cristián Alberto Muñoz-Viveros**

Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética  
Estudiante de Doctorado, Arquitecto e Investigador Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC).  
Departamento Diseño y Teoría, Escuela de Arquitectura, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-0241-7796>  
cmunoz@ubiobio.cl

## RESUMEN

Más que nunca, hasta ahora, la crisis de COVID-19 y la necesidad de permanecer más tiempo en nuestros lugares de residencia ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar la calidad del aire interior (IAQ) y la ventilación, con el objetivo de reducir los riesgos de transmisión de virus en el aire. A la necesidad de mejorar progresivamente el desempeño energético de nuestras edificaciones para alcanzar la carbono neutralidad, se suma esta nueva exigencia, del todo contrapuesta, que obliga a replantear la problemática de la ventilación, de sus estándares y soluciones tecnológicas para mejorar la IAQ y limitar los riesgos de contagio al interior de nuestras viviendas, sin perder de vista las metas que nos impone el cambio climático. Chile se encuentra en la búsqueda de estrategias para generar viviendas sustentables, eficientes energéticamente y confortables, que deben ser replanteadas producto del Covid-19. La mayor permanencia al interior del hogar dejó de manifiesto la precariedad en los modos de vida que enfrentan las familias más vulnerables, al exponerse en ocasiones a ambientes riesgosos para su salud. Esta investigación tuvo por objetivo estimar el impacto del Covid-19 en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire interior, dada la intensidad de uso (ocupación) de la vivienda, considerando envolventes con distintos niveles de hermeticidad. Mediante metodología experimental, basada en simulaciones con el software DesignBuilder, se cuantificaron las concentraciones de CO<sub>2</sub> de cuatro tipos de viviendas de carácter social, emplazadas en la comuna de Coronel, región del Biobío, Chile. Los resultados arrojaron que el confinamiento elevó en un 16,4% los niveles de CO<sub>2</sub>, mientras que el cambio de la condición original de la envolvente a niveles más herméticos generó un alza de más de un 83% en régimen de uso normal y en un 97% para periodos en confinamiento.

### Palabras clave

contaminación del aire, vivienda de interés social, calidad ambiental, simulación energética.

## ABSTRACT

More than ever before, the COVID-19 crisis and the need to spend longer periods of time in our places of residence, have highlighted the need to improve indoor air quality (IAQ) and ventilation to reduce the risks of airborne virus transmission. Added to the need to progressively improve the energy performance of our buildings to achieve carbon neutrality is this completely contrary new requirement, which forces reconsidering the ventilation issue, its standards, and technological solutions to improve IAQ and limit the risks of contagion inside our homes, without losing sight of the goals that climate change imposes on us. Chile is seeking strategies to generate sustainable, energy-efficient, and comfortable housing, which must be reconsidered in light of Covid-19. Greater permanence inside the home revealed the precariousness of the lifestyles the most vulnerable families face; sometimes exposing them to environments that are risky for their health. The objective of this research was to estimate the impact of Covid-19 on CO<sub>2</sub> indoor air concentrations, as a result of the intensity of use (occupation) of the home, considering envelopes with different levels of airtightness. Using an experimental methodology, based on simulations with the DesignBuilder software, the CO<sub>2</sub> concentrations of four types of social housing, located in the commune of Coronel, Biobío, Chile, were quantified. The results showed that confinement increased CO<sub>2</sub> levels by 16.4%, while the change from the original condition of the envelope to more airtight levels generated an increase of more than 83% in normal use and 97% for periods of confinement.

### Keywords

air pollution, social housing, environmental quality, energy simulation

## RESUMO

Mais do que nunca, a crise da COVID-19 e a necessidade de permanecer mais tempo em nossos locais de residência trouxeram à tona a necessidade de melhorar a qualidade do ar interior (IAQ) e a ventilação, com o objetivo de reduzir os riscos de transmissão do vírus pelo ar. Além da necessidade de melhorar progressivamente o desempenho energético de nossos edifícios para alcançar a neutralidade de carbono, surge esta nova exigência, totalmente oposta, que nos obriga a repensar a questão da ventilação, seus padrões e soluções tecnológicas para melhorar o IAQ e limitar os riscos de contágio dentro de nossas casas, sem perder de vista os objetivos impostos pelas mudanças climáticas. O Chile está em busca de estratégias para gerar moradias sustentáveis, energeticamente eficientes e confortáveis, que devem ser repensadas em consequência do Covid-19. A maior permanência dentro do lar revelou a precariedade dos estilos de vida enfrentados pelas famílias mais vulneráveis, que às vezes estão expostas a ambientes perigosos para sua saúde. Esta pesquisa buscou calcular o impacto do Covid-19 sobre as concentrações de CO<sub>2</sub> no ar interior, dada a intensidade de uso (ocupação) da residência, considerando envelopes com diferentes níveis de estanqueidade ao ar. Usando metodologia experimental, baseada em simulações com o software DesignBuilder, foram quantificadas as concentrações de CO<sub>2</sub> de quatro tipos de habitação social, localizadas no município de Coronel, região do Bío-Bío, Chile. Os resultados mostraram que o confinamento aumentou os níveis de CO<sub>2</sub> em 16,4%, enquanto a mudança da condição original do envelope para níveis mais herméticos gerou um aumento de mais de 83% no uso normal e 97% para períodos de confinamento.

### Palavras-chave

poluição do ar, habitação social, qualidade ambiental, simulação energética.

## INTRODUCCIÓN

En Chile, zonas como el Gran Concepción destinan un 49,4% de la energía consumida a calefacción, porcentaje excesivamente alto considerando la climatología local, que se explica más por la deficiente calidad energética de su parque residencial (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2019). Alrededor de un 66% de las viviendas no cuentan con estándares mínimos de aislación térmica (Ministerio de Energía, 2020). A esto se suman los problemas asociados a la calidad del aire interior: recintos con problemas de infiltración de aire y una alta concentración de personas en espacios pequeños (Bustamante, Encinas, Martínez, Brahm e Ibaceta, 2009). Ello provoca elevados niveles de CO<sub>2</sub> que, combinados con sistemas de ventilación inadecuados o nulos, incrementan la exposición de sus ocupantes a ambientes poco saludables, poniendo en grave riesgo su salud y disminuyendo su calidad de vida (Cortés y Ridley, 2013; Dirección General de Industria - Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2016; Huneus et al., 2020). Para enfrentar esta realidad se han desarrollado diferentes estrategias reglamentarias o normativas como las exigencias térmicas establecidas en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C) o los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) en zonas consideradas como saturadas. Dentro de sus medidas se incluye la implementación de mayor exigencia a la envolvente térmica de la vivienda. El Covid-19, el teletrabajo y, de manera general, la

extensión de horas de permanencia al interior del hogar (Red de Pobreza Energética, 2019) han dejado en manifiesto la precariedad en los modos de vida, estándares de habitabilidad y confort al interior de las viviendas en Chile (Guerra, 2020). Esta situación se agrava en familias más vulnerables de la zona centro-sur del país cuyos hogares son de carácter social y no ofrecen las prestaciones de habitabilidad adecuada, presentando un ambiente intradomiciliario inseguro ante enfermedades que afectan el sistema respiratorio (Encinas, Truffello, Urquiza y Valdés, 2020)(Dai & Zhao, 2022) (Bi, Aganovic, Mathisen y Cao, 2022)(Lu, Niu, Zhang, Chang y Lin, 2022).

El objetivo del trabajo expuesto es analizar la calidad del aire al interior de las viviendas sociales a partir de la cuantificación y caracterización las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Se emplea un método de simulación energética y modelación aplicado a cuatro casos de estudio en Coronel, Región del Biobío, Chile, a fin de determinar y comprender el impacto que generan en ella los sistemas constructivos y sus niveles de hermeticidad, considerando el número de ocupantes y el tiempo de permanencia al interior de sus hogares, tanto en periodos normales como en periodos de uso intensivo, producto del Covid-19.

## METODOLOGÍA

El estudio se centró en viviendas de tipo social pertenecientes a cuatro conjuntos habitacionales

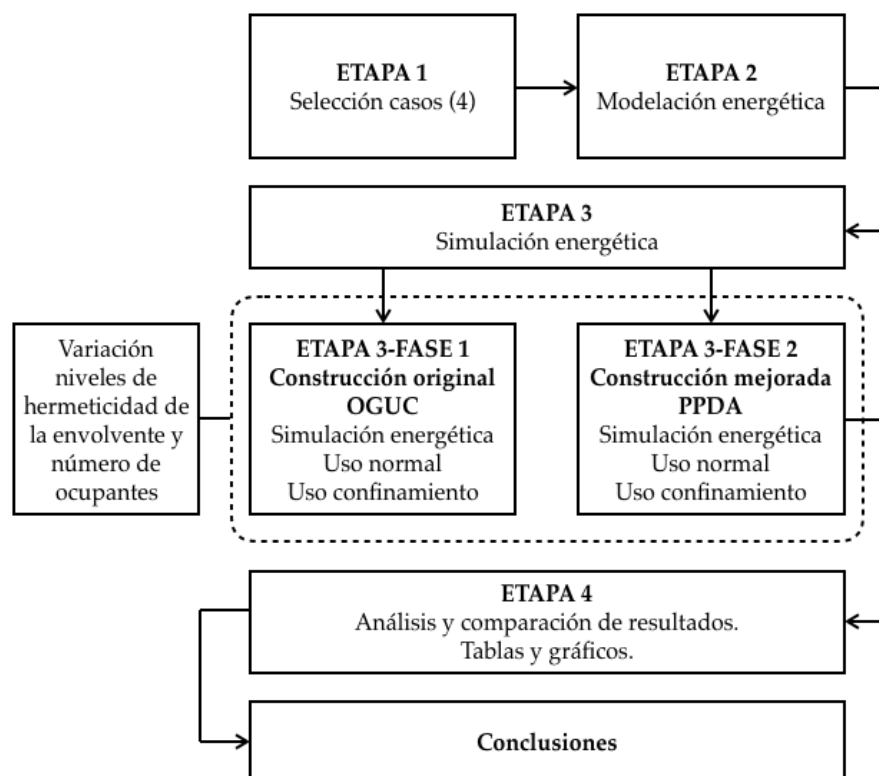


Figura 1. Esquema secuencial de las etapas del estudio. Fuente: Elaboración de autores.



Figura 2. Imágenes de fachadas principales de casos seleccionados como muestra. Fuente: Elaboración de autores.

ubicados en la comuna de Coronel, Región del Biobío. Para el desarrollo de la investigación se empleó una metodología de tipo experimental a partir de simulación energética y modelación de niveles de concentración de CO<sub>2</sub> mediante el software Design Builder.

Se seleccionó una muestra no probabilística, consistente en cuatro viviendas de dos niveles elaboradas con diferentes sistemas constructivos con el propósito de comprender y determinar cómo inciden las variables independientes de envolvente, cambios en regímenes de ocupación y número de usuarios sobre la variable dependiente, correspondiente a los niveles de concentración de CO<sub>2</sub>; y así estimar cómo afecta la incorporación de criterios de aislación térmica y mejora en los niveles de hermeticidad definida en los PPDA de Concepción Metropolitano, sobre la calidad del aire interior de estos recintos. La Figura 1 explica las etapas del estudio.

La definición de los parámetros de simulación, como las condiciones de borde y la caracterización y cuantificación de la exigencia para calidad del aire, se basaron en la metodología de determinación de caudal de ventilación para locales habitables de las viviendas, definida en el Apéndice C del Documento Básico HS 3 (DB HS 3) del Ministerio de Fomento de España, a partir de la cual se adaptó ciertos parámetros y valores, debidamente referenciados a la realidad local, a fin de obtener resultados más representativos.

## CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA EXIGENCIA

La calidad del aire interior en una vivienda estará determinada por la concentración y tipos de contaminantes que estén presentes en él. Uno de los principales contaminantes al interior de las viviendas

es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), proveniente de la respiración humana y la humedad. Este gas incoloro suele ser empleado como indicador de estándares de calidad de aire interior y como parámetro para evaluar desempeños de ventilación (CITEC-UBB-Decon UC, 2014).

La caracterización y cuantificación de la exigencia para calidad del aire interior fue determinada de acuerdo a las concentraciones de CO<sub>2</sub> definidas en el Apéndice C del Documento Básico HS 3, teniendo como valores límites una media anual menor a 900 ppm y un acumulado anual de más de 1.600 ppm\*h. En base a lo anterior, se evaluaron distintos casos bajo los escenarios previamente mencionados y sus resultados se contrastaron con los valores límites del indicador, lo que permitiría establecer el cumplimiento o incumplimiento de la condición de calidad de aire aceptable al interior de los recintos.

### Etapa 1: selección de los casos

La muestra seleccionada consideró cuatro tipologías de vivienda de carácter social (Figura 2), pertenecientes a distintos conjuntos habitacionales construidos en la comuna de Coronel entre los años 2011 y 2019, bajo la asignación de programas o fondos solidarios de vivienda otorgados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de manera directa, o bien, a través de Serviu Biobío.

En la Tabla 1 se entregan datos y se detalla la materialidad de los elementos que conforman la envolvente de estos recintos. Cabe destacar que aquellos con mayor superficie en contacto con el ambiente exterior (muros) cuentan con diferentes soluciones constructivas, lo que hizo posible obtener datos de calidad del aire interior ante distintos tipos de envolventes.

N° Caso	Materialidad de la envolvente			Modo agrup.	Sup. [m <sup>2</sup> ]
	Muros	Techumbre	Ventanas		
Caso 1	Hormigón armado e=10[cm] + placa Poligyp 30[mm] adosada por el interior.	Estructura de madera + lana de vidrio 11[kg/m <sup>3</sup> ] e= 100[mm]	PVC, cristal simple	Pareada	48,5
Caso 2	*1° nivel: Hormigón armado e=10 cm + Sistema EIFS (EPS 20[kg/m <sup>3</sup> ] e=60[mm]) *2° nivel: estructura de madera + terciado ranurado 9[mm] + aislación con EPS 20[kg/m <sup>3</sup> ] e=60[mm] + EPS 30[kg/m <sup>3</sup> ] e=30[mm]	Estructura de madera + lana de vidrio 12[kg/m <sup>3</sup> ] e= 140[mm]	PVC, cristal simple	Aislada	47,33
Caso 3	Estructura de madera + Aislación EPS 15[kg/m <sup>3</sup> ] e= 70[mm] y 40[mm]/lana mineral 40[kg/m <sup>3</sup> ] e=80[mm]	Estructura de madera + lana de vidrio 11[kg/m <sup>3</sup> ] e= 120[mm]	PVC, cristal simple	Aislada	63,66
Caso 4	*1° nivel: Hormigón armado tipo EXACTA® e= 18[cm] (Ladrillo EPS 30[kg/m <sup>3</sup> ] + yeso cartón st 10[mm] por interior + estuco de mortero e=6[mm] por exterior *2° nivel: igual solución, solo cambia espesor de ladrillo a 12[cm]	Aislación bovedilla tipo TE-130: EPS 15[kg/m <sup>3</sup> ] e=100[mm]	PVC vidrio termopanel	Pareada	51,75

Tabla 1. Datos y características constructivas de la envolvente de los casos seleccionados. Fuente: Elaboración de los autores, en base a datos obtenidos de planos y EETT de cada proyecto seleccionado.

## Etapa 2: modelación energética

El programa de simulación se carga con los antecedentes constructivos de los casos a evaluar, indicados en Tabla 1 y con las condiciones de borde que se detallan a continuación.

- **Generación de CO<sub>2</sub>:** 19 l/h por ocupante, sin diferenciar entre periodos de vigilia o de sueño.
- **Número de ocupantes:** 4 ocupantes, basado en datos estadísticos del Ministerio de Desarrollo Social (2019).
- **Escenarios de ocupación en régimen de uso normal:**
  - I. Periodos de sueño: 8 horas ininterrumpidas para cada uno de los ocupantes (entre las 24:00 y 08:00).
  - II. Ausencias diurnas: 13 horas al día para uno de los ocupantes y de 8 horas para el resto. Sábados y domingos, dos ausencias de 2 horas por día, para cada uno de los ocupantes.

- **Escenarios de ocupación en régimen de uso en periodo de confinamiento:**
  - I. Periodos de sueño: 8 horas ininterrumpidas para cada uno de los ocupantes (entre las 24:00 y 08:00 horas).
  - II. Ausencias diurnas: 13 horas al día para uno de los ocupantes, el resto de los ocupantes realiza actividades desde la vivienda (estudios, teletrabajo). Sábados y domingos sin ausencias<sup>2</sup>.
- Puertas exteriores y ventanas de las distintas estancias cerradas
- **Concentración de CO<sub>2</sub> en el aire exterior:** media anual de 400 ppm (CITEC-UBB-Decon UC, 2014; Ministerio de Fomento, 2007)
- **Datos climáticos:** archivo climático del Weather Data de Energyplus, correspondiente a localidad de Concepción. Se ajustan datos asociados a Coronel: latitud, longitud, altura respecto al mar.
- **Ganancias internas y externas:** equipos 3,9 W/m<sup>2</sup>, iluminación 7,5 W/m<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Las horas de ocupación en periodos de confinamiento se basaron en los datos de encuestas para la medición de pobreza energética, asociadas a proyecto Fondecyt Regular 1200551 "Energy poverty prediction based on social housing architectural design in the central and central – southern zones of Chile: an innovative index to analyze and reduce the risk of energy poverty".



Materialidad predominante de la envolvente	Valor n50 Línea base	Desviación estándar
Hormigón	9,0	5,3
Entramado de madera	24,6	12,4
Otras materialidades	10,2	4,3

Tabla 2. Infiltraciones según sistemas constructivo. Fuente: Elaboración de los autores. Adaptado de "Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones" (Citec UBB - Decon UC, 2014, p. 32).

Casos	U [W/m2K] Muros	U [W/m2K] Techumbre	U [W/m2K] Piso ventilado	U [W/m2K] Ventanas
Adela Ester	1,26	0,43	0,67	4,87
Paso Seco I, II y III	0,44	0,30	-	4,87
Paso Seco IV	0,37	0,36	-	4,87
Barrio Sustentable	0,61	0,41	-	2,8

Tabla 3. Valor transmitancias térmicas de envolvente en casos de estudio. Fuente: Elaboración de los autores (basada en datos obtenidos de planos y EETT de cada proyecto seleccionado).

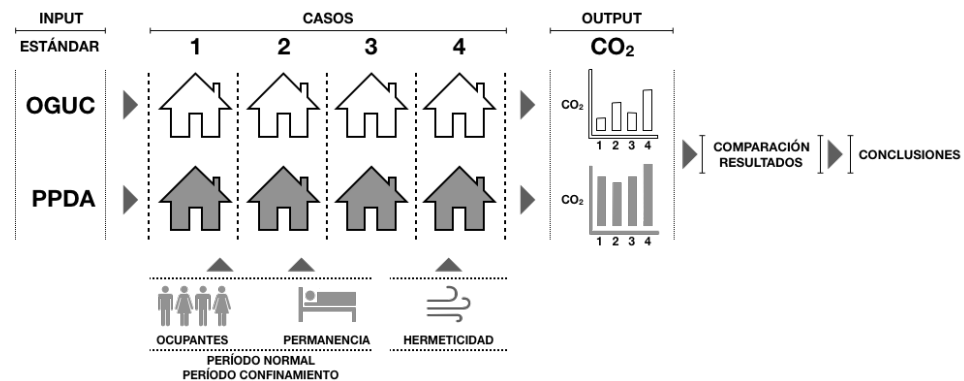


Figura 3. Resumen del procedimiento y las principales variables consideradas. Fuente: Elaboración de autores.

- HVAC apagado y ventilación natural activada.
- **Periodo de simulación:** mayo a septiembre (correspondiente a meses más fríos según datos climáticos).
- **Caudales de ventilación:** 6 l/s-persona, adaptado de Addendum m de ANSI/(American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2016) Standard 62.2-2013, Tabla 4.1b, para viviendas con superficies entre 47 y 93 [m<sup>2</sup>] y dos dormitorios, generando el equivalente en litros por persona considerando 4 ocupantes.
- **Infiltraciones:** las asociadas a cada sistema constructivo (Tabla 2). Para caso mejorado, PPDA considera en 5 el límite de infiltraciones de la envolvente (Decreto 6, 2019).
- **Transmitancias térmicas de la envolvente:** según características de los proyectos de vivienda (Tabla 3).

La Figura 3 resume el procedimiento y las principales variables consideradas en el estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ETAPA 3 – FASE 1: CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> EN LA VIVIENDA ORIGINAL

Durante la primera fase de simulaciones se analizaron las viviendas bajo régimen de uso normal y en confinamiento, considerando sus características constructivas originales y la asignación de niveles de hermeticidad según lo indicado en Tabla 1.

Los resultados bajo régimen de uso normal, que se muestran en Figura 4, permitieron verificar que las concentraciones de CO<sub>2</sub> se mantienen bajo el límite de

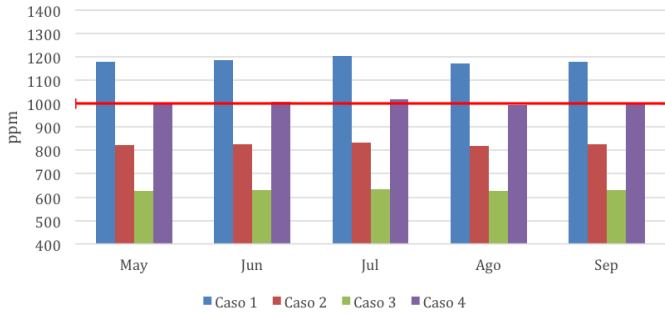


Figura 4. Concentraciones de CO2 bajo régimen de uso normal. Fuente: Elaboración de los autores.

las 900 ppm para el caso 2 y 3, mientras que el caso 1 y 4 superan estos niveles, llegando a concentraciones que sobrepasan las 1000 ppm.

Respecto al uso de la vivienda en periodos de confinamiento, los resultados que se muestran en la Figura 5 permiten evidenciar un alza en los niveles de CO2, los cuales superan el límite de las 900 ppm en los casos 1, 2 y 4. Sin embargo, el caso 3 continúa bajo el límite, presentando concentraciones de 700 ppm promedio.

La Figura 6 ilustra el porcentaje de incremento en los niveles de CO<sub>2</sub> al interior de las viviendas en estudio, generado por el cambio en el régimen de ocupación de los recintos a causa del confinamiento. El caso 3 corresponde a la vivienda que presenta el menor porcentaje de alza en los niveles de CO<sub>2</sub>, mientras que el más alto corresponde al caso 1.

Estos niveles de concentración de CO<sub>2</sub> obtenidos se relacionan directamente a los niveles de hermeticidad asignados a las viviendas. Es así como el caso 3 corresponde a la vivienda con sistema constructivo en madera cuyo valor de línea de hermeticidad (n50) asignado es de 24,6. Esto representa un alto flujo de aire que pasa a través de la envolvente, lo que evidencia un recinto poco hermético que, por ende, no acumula ni concentra en exceso el CO<sub>2</sub> al interior del hogar; razón por la cual los valores obtenidos se mantienen bajo el límite de las 900 ppm. De manera contraria, el caso 1 corresponde a la vivienda con los más altos niveles de concentración de CO<sub>2</sub> y a la mayor alza porcentual, al pasar de régimen de uso normal a confinamiento, lo cual se debe a su sistema constructivo de hormigón armado. Se trata del caso que registra el valor n50 más bajo.

### ETAPA 3 – FASE 2: CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> EN LA VIVIENDA CON MEJORAS SEGÚN CRITERIOS PPDA

La Figura 7 grafica los resultados de concentración de CO2 obtenidos por la simulación en los casos de estudio, los cuales fueron adaptados a criterios PPDA:

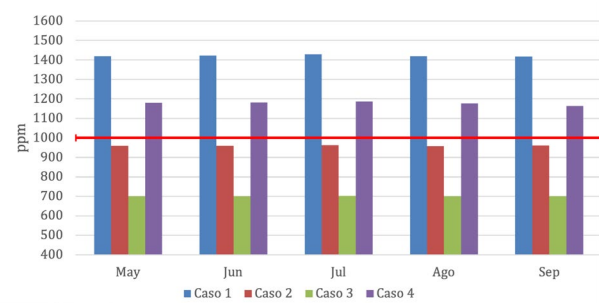


Figura 5. Concentraciones de CO2 bajo régimen de uso en confinamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

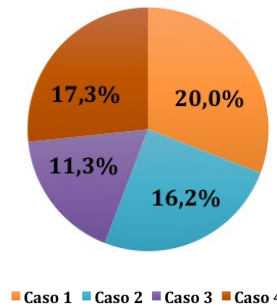


Figura 6. Porcentaje de alza en las concentraciones de CO2 producto del cambio en régimen de ocupación de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

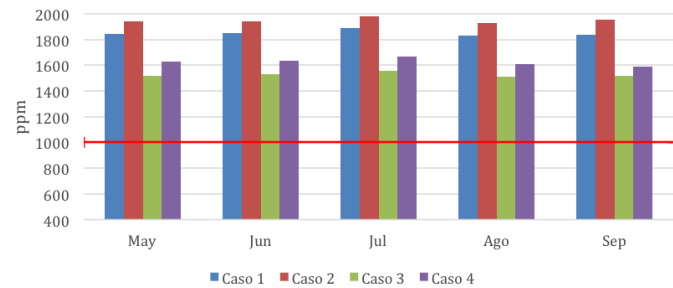


Figura 7. Concentraciones de CO2 en régimen de uso normal, con incorporación de criterios PPDA en envolvente. Fuente: Elaboración de los autores.

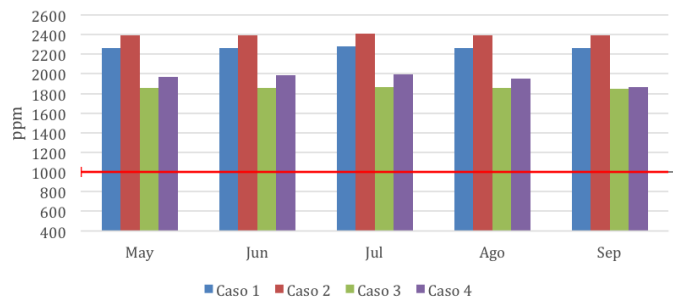


Figura 8. Concentraciones de CO2 en régimen de uso en confinamiento, con incorporación de criterios PPDA en envolvente. Fuente: Elaboración de los autores.

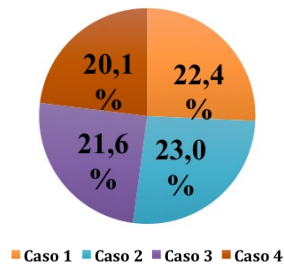


Figura 9. Porcentaje de alza en las concentraciones de CO<sub>2</sub> producto del cambio de régimen de ocupación de la vivienda, considerando adaptación de criterios PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

se modificaron las envolventes según valores de transmitancia térmica exigidos para la localidad y se limitó a 5 las tasas de infiltración. Bajo esta condición, la ocupación normal de la vivienda generó niveles promedio de CO<sub>2</sub> que fluctúan entre las 1500 ppm y 1900 ppm, aproximadamente. Los casos 1 y 2 exhibieron mayor concentración del contaminante en el aire interior.

Al cambiar a régimen de uso en confinamiento se genera un alza en los valores promedio de CO<sub>2</sub> de los casos, que ronda entre las 1900 ppm y 2400 ppm, tal como se evidencia en la Figura 8, superando en más de un 110% el valor límite definido.

Tras contrastar los resultados obtenidos, quedó de manifiesto que el cambio de uso normal de la vivienda al estado en confinamiento generó un incremento porcentual del contaminante cercano al 21,8% promedio (Figura 9).

#### ETAPA 4: DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> ENTRE VIVIENDA ORIGINAL Y CON MEJORAS PPDA

A través de los resultados que se muestran en las Figuras 10 y 11 se evidencia el impacto en las concentraciones de CO<sub>2</sub> generado por la adaptación de criterios PPDA en los casos analizados. Al evaluar estos cambios bajo régimen de uso normal, los niveles del contaminante se elevaron en un 56,2% para el caso 1 y en más de un 140% para el caso 3. De igual forma, bajo régimen de uso en confinamiento, el caso 1 presentó la menor alza, superando levemente el 59%, mientras que el caso 3 superó el 164%; siendo el caso con la mayor alza en los niveles de concentración de CO<sub>2</sub>.

De los resultados expuestos se advierte que las mayores diferencias porcentuales obtenidas de las simulaciones, producto de la adaptación de las envolventes de las viviendas en estudio a criterios PPDA, son, principalmente, consecuencia del diferencial generado entre los valores de hermeticidad de la vivienda en estado original y el modificado, es decir, a mayor diferencial, mayor alza porcentual en las concentraciones de CO<sub>2</sub>.

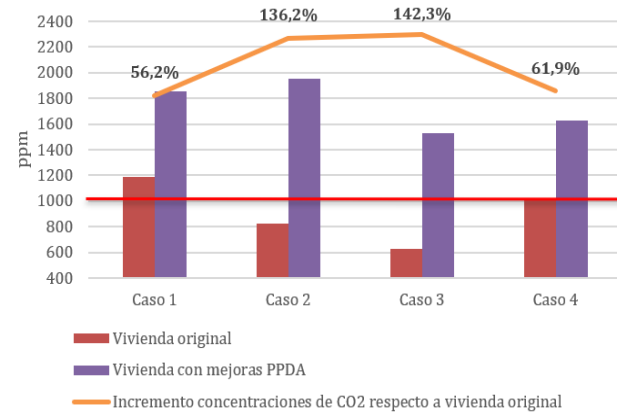


Figura 10. Variaciones de concentraciones de CO<sub>2</sub> para viviendas con envoltente original y adaptada a PPDA, en régimen de uso normal. Fuente: Elaboración de los autores.

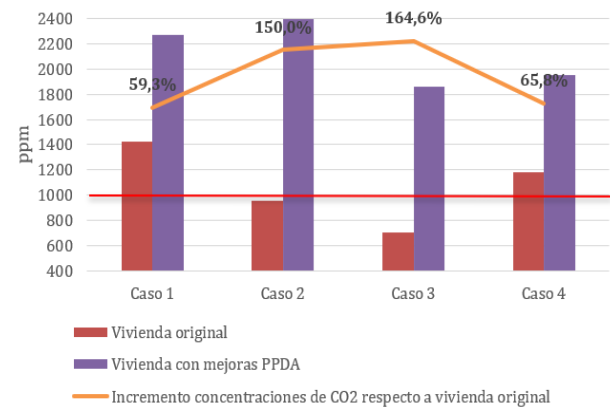


Figura 11. Variaciones de concentraciones de CO<sub>2</sub> para viviendas con envoltente original y adaptada a PPDA, en régimen de uso en confinamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

#### CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> SEGÚN RÉGIMEN DE USO Y VALOR DE INFILTRACIONES

Con el objetivo de comprender y analizar cómo las infiltraciones incidieron en los niveles de CO<sub>2</sub> obtenidos, se realizaron simulaciones modificando los niveles de hermeticidad entre 3 y 27. Los resultados se muestran en la Figura 12 y dejan en evidencia que las concentraciones de CO<sub>2</sub>, para tasas de infiltración entre las 9 y 27 renovaciones, tienden a mantenerse dentro del rango de las 500 – 1200 ppm, no presentando alzas mayores al 15% entre valores de hermeticidad consecutivas, sin embargo, hacia las tasas de infiltración más bajas, es decir, entre 3 y 9, se producen alzas considerables. Por ejemplo: al pasar de 7 a 5 renovaciones aire por hora, el incremento es de un 30% aproximado, y de 5 a 3 tasas de infiltración los niveles de CO<sub>2</sub> aumentan en más de un 50%. Además, se constata que hasta 13 renovaciones aire hora es posible mantener niveles de CO<sub>2</sub> dentro de la media límite de las 900 ppm, para los cuatro casos analizados y según los criterios definidos.



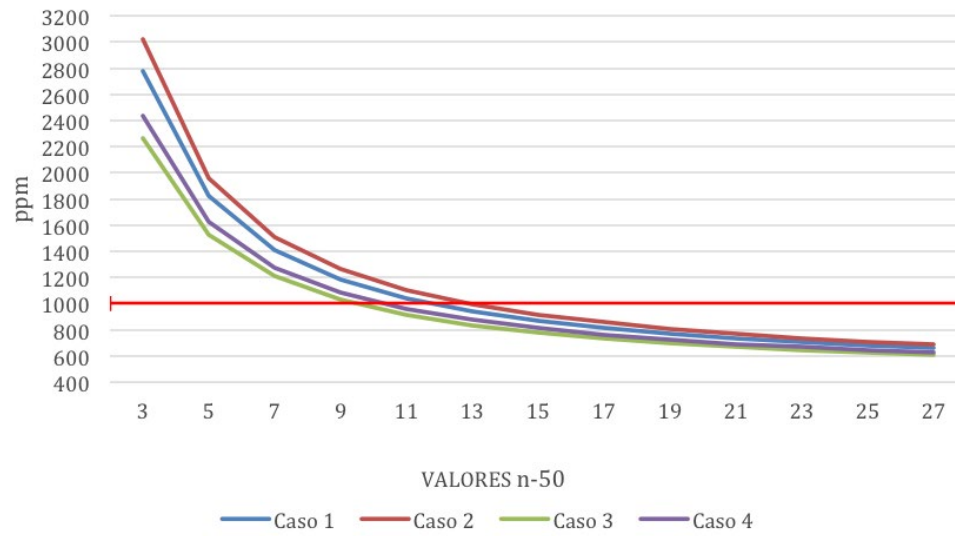


Figura 12. Concentración de CO2 según valor de hermeticidad al aire de la vivienda, para régimen de uso normal. Fuente: Elaboración de los autores.

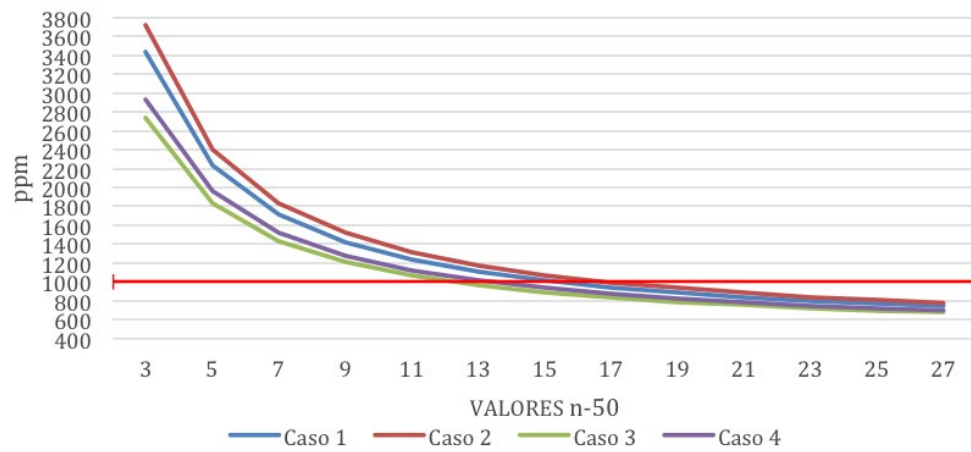


Figure 13. Concentración de CO2 en ppm según valor de hermeticidad al aire de la vivienda, para régimen de uso en confinamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

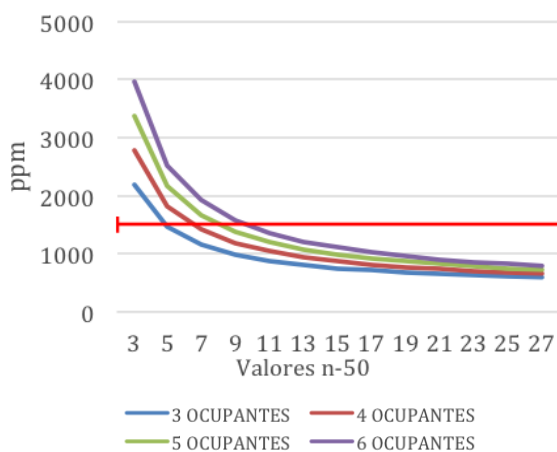


Figura 14. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 1. Fuente: Elaboración de los autores.

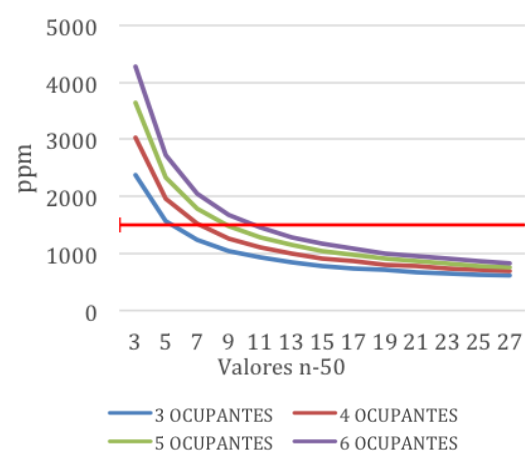


Figura 15. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 2. Fuente: Elaboración de los autores.

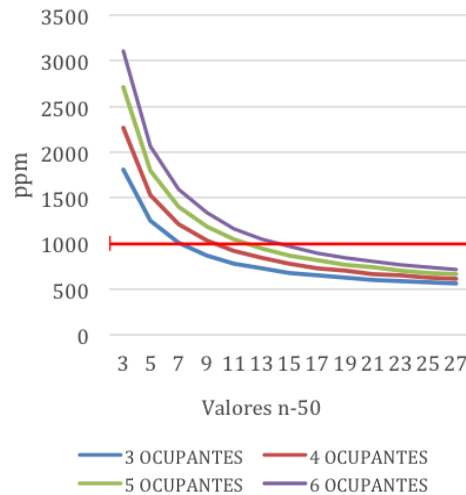


Figura 16. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 3.  
 Fuente: Elaboración de los autores.

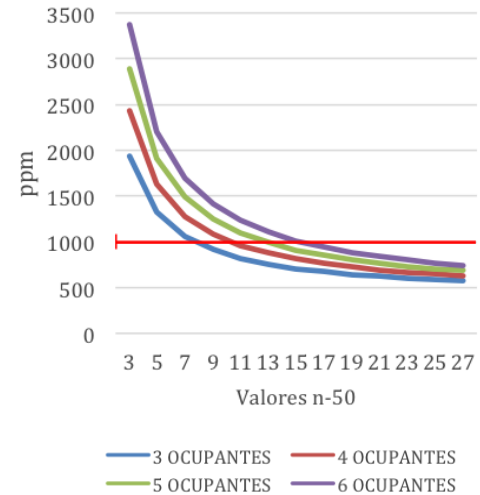


Figura 17. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 4.  
 Fuente: Elaboración de los autores.

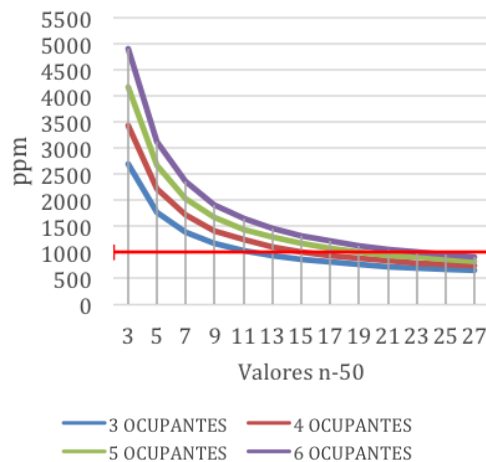


Figura 18. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 1.  
 Fuente: Elaboración de los autores.

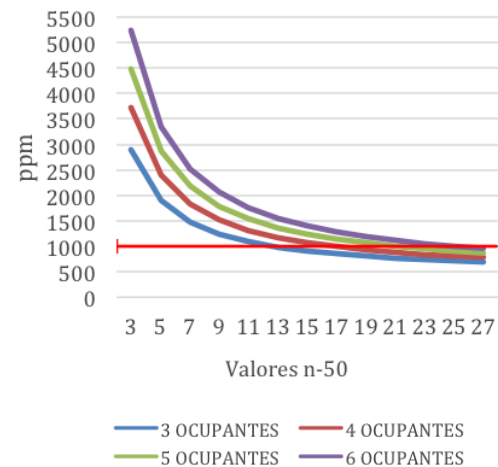


Figura 19. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 2.  
 Fuente: Elaboración de los autores.

En el escenario de uso en confinamiento (Figura 13) los resultados presentan una tendencia similar a la anterior, puesto que se generan concentraciones que van desde las 500 y 1200 ppm promedio de CO<sub>2</sub> para tasas de infiltración entre 11 y 27. Con tasas de infiltración más bajas, los niveles de CO<sub>2</sub> se incrementan en un 30% al pasar de 7 a 5 renovaciones y, en más de un 50% al reducir de 5 a 3 renovaciones de aire, llegando a niveles de más 3700 ppm en algunos de los casos estudiados.

### CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> SEGÚN RÉGIMEN DE USO, NÚMERO DE OCUPANTES Y VALOR DE INFILTRACIONES

La Figura 14, figura 15, figura 16 y figura 17 exhiben los resultados de variación en las concentraciones de CO<sub>2</sub> para la vivienda en régimen de uso normal, considerando

3, 4, 5 y 6 ocupantes al interior de ella, en combinación con diferentes niveles de hermeticidad de la vivienda. En los cuatro casos estudiados se produce un aumento en los niveles del contaminante en el aire interior por el incremento en el número de ocupantes en el recinto. No obstante, ante bajos niveles de hermeticidad esta alza no tiende a ser proporcional a la cantidad de personas que se añaden. Como promedio, en los cuatro casos evaluados, pasar de 3 a 4 ocupantes con una tasa de 3 renovaciones de aire hora aumenta las concentraciones de CO<sub>2</sub> en un 26,6%; de 4 a 5 personas, en un 20%, y de 5 a 6, en un 16,5%.

La figura 18, figura 19, figura 20 y figura 21 muestran los valores obtenidos para niveles de concentración de CO<sub>2</sub> en régimen de uso en confinamiento, donde varía el número de ocupantes y los niveles de hermeticidad

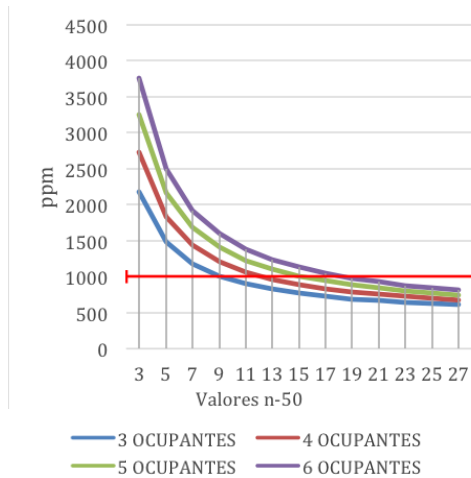


Figura 20. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 3. Fuente: Elaboración de los autores.

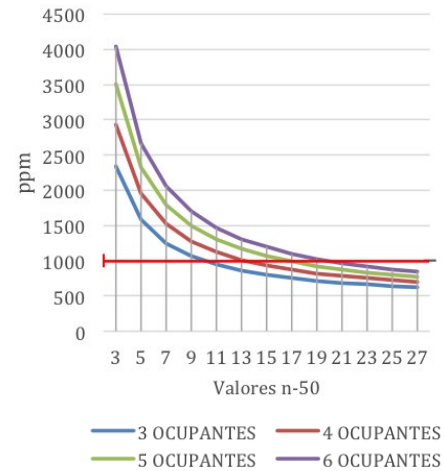


Figura 21. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 4. Fuente: Elaboración de los autores.

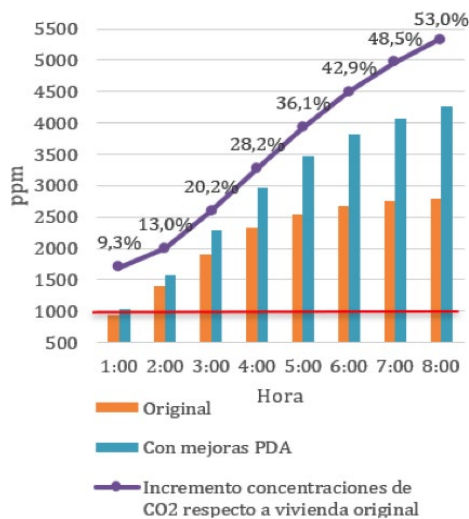


Figura 22. Concentraciones de CO2 en dormitorio caso 1, con envoltorio original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

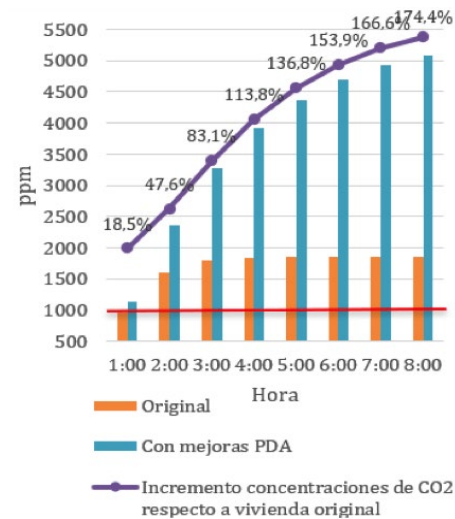


Figura 23. Concentraciones de CO2 en dormitorio caso 2, con envoltorio original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

de los casos estudiados. Los resultados revelan que los niveles de concentración se elevan paulatinamente entre las 11 y 27 renovaciones de aire asignados, mientras que, al descender las tasas de infiltración, los incrementos comienzan a ser sustanciales. Por ejemplo, al reducir de 5 a 3 las tasas de infiltración, los niveles de concentración se incrementan desde las 500 ppm para 3 ocupantes y en más de 1000 ppm para la misma condición, pero con 6 ocupantes en su interior, pudiéndose alcanzar las 2000 ppm en el Caso 2. Los cuatro casos cumplen concentraciones bajo las 900 ppm, principalmente en los niveles de hermeticidad más altos y con el menor número de ocupantes. Ahora bien, en tasas bajo 13 renovaciones las concentraciones se elevan sobre el parámetro, quedando fuera del rango admisible.

Tras comparar los resultados de concentración de CO2 se constató en los diferentes escenarios que, variando el número de ocupantes y las tasas de infiltración, el régimen de uso en confinamiento presenta alzas en los niveles del contaminante respecto al uso normal que van desde un 10%, en el caso de los niveles de hermeticidad más altos, y cercanos al 23%, en el caso de los niveles de hermeticidad más bajos.

### CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> POR RECINTOS

Para la cuantificación y verificación del segundo criterio se simuló los niveles de CO<sub>2</sub> en recintos de dormitorios, en periodos horarios de uso a capacidad completa, es decir, entre las 00:00 y 08:00 horas, con

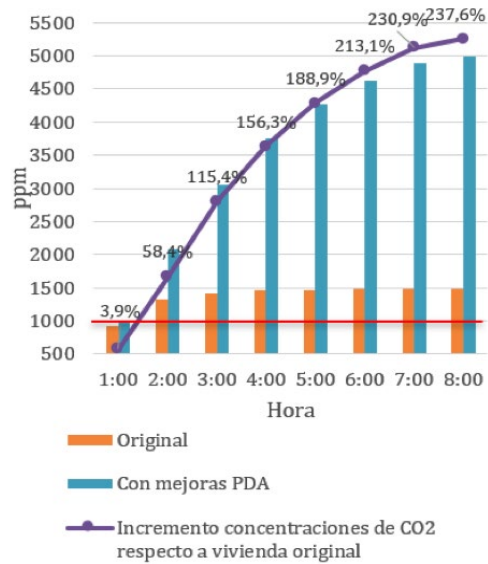


Figura 24. Concentraciones de CO2 en dormitorio caso 3, con envoltente original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

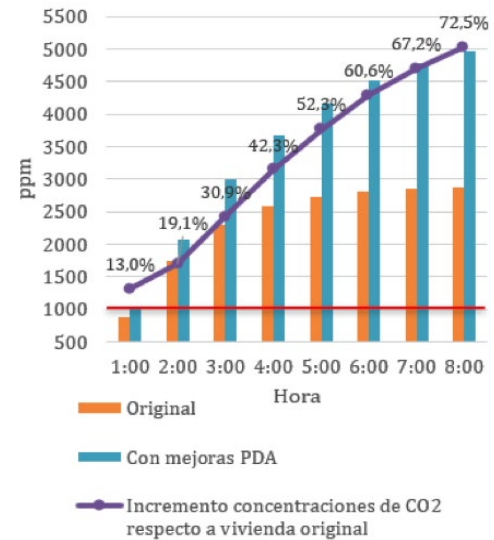


Figura 25: Concentraciones de CO2 en dormitorio Caso 4, con envoltente original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

dos ocupantes y se contrastó el caso de la vivienda original y el caso con criterios PPDA bajo régimen de uso en confinamiento. La figura 22, figura 23, figura 24 y figura 25 ilustran los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> obtenidos en los recintos: para régimen de uso normal, se alcanzaron máximas de hasta 2800 ppm (caso 1 y 4) y, en el caso más favorable, correspondiente al 3, no se superaron las 1600 ppm. En cuanto a los niveles con envoltente PPDA, las cifras de concentración se elevaron en más de un 50% para el caso más favorable (caso 1) y en más de un 230% para el más crítico (caso 3). De esta manera, se evidencia que, al limitar a 5 las infiltraciones a través de la envoltente, se expone a los usuarios a niveles de CO<sub>2</sub> cercanos a las 5000 ppm, durante un extendido periodo horario, todas las noches; incumpliendo con el parámetro de concentraciones acumuladas anuales.

## CONCLUSIÓN

El análisis de variación de concentraciones de CO<sub>2</sub> al interior de la vivienda, producto de la modificación de características de la envoltente y de los escenarios de ocupación a causa del confinamiento por Covid-19, permitió cuantificar el impacto que éstas generan en la calidad del aire interior en los hogares.

Los resultados obtenidos durante la primera fase de simulación, correspondiente a la obtención de concentraciones de CO<sub>2</sub> a partir de la envoltente original, no permitieron generar un panorama representativo del impacto que tiene la hermeticidad y los cambios de uso y ocupación de la vivienda en la presencia del contaminante en el aire interior, ya

que, si bien se asignaron las mismas condiciones de borde, la disparidad en las tasas de infiltración generó resultados complejos de comparar; razón por la cual se simularon escenarios iterando niveles de hermeticidad para los casos de estudio. Esto dejó en evidencia que, ante tasas de infiltración altas, es decir, entre 11 y 27 renovaciones de aire por hora, los diferenciales de CO<sub>2</sub> entre valores consecutivos analizados se incrementan de manera paulatina. A medida que se reducen los niveles de infiltración, se presentan alzas que van desde un 3% hasta menos de un 12%. Para las tasas de renovación más bajas, las alzas se incrementan casi de manera exponencial: las más críticas corresponden a la reducción de 7 a 5 renovaciones de aire, la cual genera un aumento de más de un 27% en los niveles de concentración del contaminante, y el paso de 5 a 3, que lo hace en más de un 48%.

Mediante los resultados obtenidos fue posible cuantificar el impacto que el confinamiento producto del Covid-19 puede generar sobre la calidad del aire interior de la vivienda de tipo social, estimándose en alrededor de un 16,4% el alza promedio en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, producto de la mayor permanencia al interior del hogar. Así también, los dormitorios resultaron ser los recintos con mayor exposición a ambientes insalubres, debido a que sus ocupantes permanecen por extendidas horas al interior de ellos y son el área donde se generaron las más altas concentraciones del contaminante.

Dado el alcance de la investigación y bajo los criterios de diseño y condiciones de borde definidas en las simulaciones, se logró verificar que es el nivel de

hermeticidad de la vivienda la principal variable incidente en los niveles de CO<sub>2</sub> interior. Esto permite estimar que, si la vivienda en Chile se ajusta a criterios PPDA (considerando como 13 el valor de línea de base para la hermeticidad según definición del CITEC), las alzas que se generan rondarían el 83% en escenario de uso normal y un 97%, en periodos de confinamiento.

La relevancia de un buen diseño y un sistema de ventilación que respondan a las reales necesidades de las familias chilenas, es decir, que aporten caudales de ventilación suficientes para remover las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> que pueden generarse al interior de los hogares, resultan ser la clave para contar con viviendas herméticas pero, a la vez, confortables en todas las variables de habitabilidad asociadas. Recordemos que hoy en día la tendencia es contar con recintos más eficientes, herméticos y capaces de brindar el confort adecuado para las distintas actividades que desarrollen sus ocupantes en su interior. Lo anterior trae consigo múltiples beneficios a nivel medioambiental y económico, sin embargo, requiere análisis y estudios apropiados para evitar generar impactos negativos a nivel de salud de los usuarios.

El trabajo desarrollado tuvo un enfoque experimental, basado en simulaciones ante condiciones predefinidas, que se ajustan a criterios normativos, datos estadísticos e información recabada de la literatura asociada, de todo lo cual se obtuvo resultados estimativos para cada uno de los casos y escenarios evaluados. En futuras líneas de investigación será posible emplear esta metodología para determinar requerimientos de ventilación en viviendas y cómo la capacidad de ventilación natural disponible incide o impacta sobre la calidad del aire, además de comprender cómo afectan otro tipo de indicadores en estos recintos, por ejemplo, la temperatura interior. De igual manera, es factible desarrollar un trabajo de campo enfocado en mediciones *in situ* de los niveles de CO<sub>2</sub> en las distintas tipologías de viviendas analizadas en esta investigación, a partir de lo cual se puede verificar si las tendencias de variación de concentraciones del contaminante se asemejan a las obtenidas mediante el uso de software de simulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2016). Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. *ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2016.*, 8400(62.2).

Bi, Y., Aganovic, A., Mathisen, H. M. y Cao, G. (2022). Experimental study on the exposure level of surgical staff to SARS-CoV-2 in operating rooms with mixing ventilation under negative pressure. *Building and Environment*, 217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109091>

Bustamante, W., Encinas, F., Martínez, P., Brahm, M. e Ibaceta, I. (2009). *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de: [http://old.acee.cl/576/articles-61341\\_doc\\_pdf.pdf](http://old.acee.cl/576/articles-61341_doc_pdf.pdf)

Citec-UBB – Decon UC (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Concepción, Chile. Recuperado de: <https://citecubb.cl/publicaciones>.

Corporación de Desarrollo Tecnológico (2019). *Informe Final Uso de la Energía Hogares Chile 2018*. Santiago de Chile. Recuperado de: [https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe\\_final\\_caracterizacion\\_residencial\\_2018.pdf](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf)

Cortés, A. y Ridley, I. (2013). Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario: La ciudad de Temuco como caso de estudio. *Revista INVI*, 28(78), 257–271. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-83582013000200008>

Dai, H. y Zhao, B. (2022). Reducing airborne infection risk of COVID-19 by locating air cleaners at proper positions indoor: Analysis with a simple model. *Building and Environment*, 213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108864>

Decreto 6 de 2019. Establece Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano. 25 de enero de 2018. Recuperado de: <https://bcn.cl/2jf1a>

Dirección General de Industria - Energía y Minas de la Comunidad de Madrid (2016). *Guía de Calidad del Aire Interior*. Madrid: Fenercom.

Encinas, F., Truffello, R., Urquiza, A. y Valdés, M. (15 mayo 2020). COVID-19, pobreza energética y contaminación: redefiniendo la vulnerabilidad en el centro-sur de Chile. *Ciper*. Recuperado de: <https://www.ciperchile.cl/2020/05/15/covid-19-pobreza-energetica-y-contaminacion-redefiniendo-la-vulnerabilidad-en-el-centro-sur-de-chile/>

Guerra, J. (18 julio 2020). Realizan diagnóstico que vincula calidad de la vivienda social, pandemia y cuarentenas. *Noticias UCN al día – Universidad Católica del Norte*. Recuperado de: <https://www.noticias.ucn.cl/destacado/realizan-diagnostico-que-vincula-calidad-de-la-vivienda-social-pandemia-y-cuarentenas/>

Huneus, N., Urquiza A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., ... y Cortés, S. (2020). *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile*. Recuperado de: <https://www.cr2.cl/contaminacion/>

Lu, Y., Niu, D., Zhang, S., Chang, H. y Lin, Z. (2022). Ventilation indices for evaluation of airborne infection risk control performance of air distribution. *Building and Environment*, 222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109440>

Ministerio de Desarrollo Social (2019). *Informe Desarrollo Social 2019*, 14. Recuperado de: [https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe\\_de\\_Desarrollo\\_Social\\_2019.pdf](https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2019.pdf)



Ministerio de Energía (2020). Estrategia de transición energética de residencial. *Vivienda y Densidad*, 34. Recuperado de: <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3774>

Ministerio de Fomento (2007). Documento Básico. *Septiembre, 2013*. Recuperado de: [https://www.minrel.gob.cl/minrel\\_old/site/artic/20080902/asocfile/20080902204316/documento\\_b\\_sico\\_com\\_n\\_chile\\_\\_actualizaci\\_\\_n\\_sept\\_2013\\_final\\_con\\_correcciones\\_monu.pdf](https://www.minrel.gob.cl/minrel_old/site/artic/20080902/asocfile/20080902204316/documento_b_sico_com_n_chile__actualizaci__n_sept_2013_final_con_correcciones_monu.pdf)

Red de Pobreza Energética (2019). *Pobreza energética. El acceso desigual a energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile*. Policy Paper. Santiago: Universidad de Chile.