

Artificio

Revista en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
Núm. 9 (2026) periodo enero-junio

e-ISSN
2992-7463
Site

<https://revistas.uaa.mx/index.php/artificio>



Estudio experimental y numérico sobre la ventilación natural en los edificios de vivienda a través de los patios

Experimental and numerical study of natural ventilation in residential buildings using courtyards

Daniel Ventura Guerrero

Posgrado en Diseño Bioclimático
Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
ORCID: 0009-0008-0629-5643
al2233802967@azc.uam.mx

César Augusto Real Ramírez

Departamento de Sistemas
Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
ORCID: 0000-0003-0376-3575
carr@azc.uam.mx

Roberto Barnard Amosurrutia

Departamento de Medio Ambiente
Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
ORCID: 0000-0002-9435-5229
rgba@azc.uam.mx

Recived: 2025-06-06
Accepted: 2025-08-08

Cómo citar este trabajo. *How to cite this paper.*

Ventura Guerrero, D., Real Ramírez, C.A., Barnard Amosurrutia, R. (2026). Estudio experimental y numérico sobre la ventilación natural en los edificios de vivienda a través de los patios. *Artificio* (9), eArt.0901, 1-15.

Estudio experimental y numérico sobre la ventilación natural en los edificios de vivienda a través de los patios

Daniel Ventura Guerrero · César Augusto Real Ramírez · Roberto Barnard Amosurrutia

Resumen

El patio de ventilación cumple con dos funciones principales en los edificios, la iluminación y la ventilación de los espacios interiores. El reglamento de construcciones del Distrito Federal establece las dimensiones en las que deben de construirse los patios para cumplir con sus funciones. En este trabajo se analiza si el dimensionamiento de patios permite obtener las condiciones de ventilación natural suficientes que conduzcan a una calidad del aire interior adecuada en una vivienda. El estudio se divide en dos partes, la primera corresponde a la experimentación física con un modelo físico a escala 1:30 dentro de un túnel aerodinámico donde se visualiza el flujo de humo en el espacio interior del departamento y mediciones puntuales en diferentes puntos dentro y alrededor del modelo. La segunda es la simulación numérica que consiste en resolver las ecuaciones constitutivas mediante OpenFOAM con el modelo de esfuerzos de Reynolds en estado no estacionario. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el dimensionamiento del patio permite las condiciones de ventilación adecuadas en el caso de estudio. Se observó también que la geometría y la distribución de los espacios interiores promueve trayectorias más largas y se disminuye la cantidad de cambios de aire, lo que afecta la calidad del aire interior de la vivienda.

Palabras clave: Ventilación natural, patio de viviendas, experimentación física, túnel de viento, dinámica de fluidos computacional.

Abstract

Lighting and ventilation are the two main purposes of courtyards in buildings. The construction regulations of Mexico City establish the dimensions in terraces and must be built to fulfill their functions. This study examines whether the courtyard dimensions enable the development of optimal natural ventilation conditions, which contribute to a house's indoor air quality. The first part of this study explains the visualization of the flow and the measurements of thermodynamic variables using a scaled physical model at 1:30 inside an aerodynamic tunnel. The recordings in the visualization demonstrate how the smoke enters the residence and leaves into the courtyard. Measurements were taken at various locations inside and around the scaled model. The constitutive equations were solved with the Reynolds stress turbulence model using the OpenFOAM software. The results of the experiment and the numerical simulations demonstrate that the standard courtyard's size allow to develop appropriate ventilation conditions. The house's accessories have a considerable influence by develop longer air trajectories, which reduces the quantity of air and the house's indoor air quality.

Keywords: Natural ventilation, residential courtyard, physical experiments, aerodynamic tunnel, computational fluid dynamics.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones de ventilación de los espacios en los que habitan las personas son importantes ya que la gente pasa entre el 60 y el 90% del tiempo en los espacios interiores (Guyot et al., 2022). Estas condiciones del flujo determinan la calidad del aire interior (CAI) en los departamentos y puede llegar a afectar la habitabilidad de los espacios. De acuerdo con la norma ASHRAE, una CAI aceptable es aquella en la que la salud de los usuarios de un espacio no se encuentra en riesgo debido a los agentes biológicos, químicos y físicos que se encuentran en el aire (del Campo Díaz & Terés Zubiaga, 2011).

La ventilación natural en los edificios tanto industriales como habitacionales se utiliza para mantener una calidad del aire interior adecuada, debido a que el aire exterior que se suministra a los espacios, permite sustituir el aire interior que puede contener niveles elevados de contaminantes y/o de agentes biológicos (Alcayna Orts, 2013). Para mantener condiciones de ventilación y una calidad adecuada del aire interior mediante la ventilación natural se debe alcanzar una tasa de ventilación que permita renovar el aire de los espacios, lo cual se mide en el número de cambios de aire por hora y tiene valores generalmente entre 0.8 y 2 (Sosa Griffin, 1999).

En el presente trabajo se estudiaron las condiciones de ventilación natural a partir del comportamiento del aire que se obtiene en los espacios interiores de un departamento cuando se utiliza un patio de medidas normativas como estrategia de ventilación, en un conjunto habitacional de varios niveles. Se analizó también la relación que guarda la distribución arquitectónica de los espacios con el patrón de flujo de aire al abandonar el departamento para posteriormente interactuar con el patio de iluminación y ventilación.

Se revisaron las metodologías en diferentes trabajos reportados en la literatura para estudiar la ventilación natural y obtener resultados satisfactorios para los usuarios. Principalmente se analizaron los estudios más relevantes sobre las condiciones de ventilación que se pueden obtener al utilizar el patio de ventilación en edificios.

En los trabajos analizados (Hang et al., 2023; Niu et al., 2024; Sun et al., 2024) se utilizaron métodos

experimentales y numéricos para estudiar el transporte de los contaminantes dentro de las viviendas y como se concentran los contaminantes en algunas zonas interiores en los departamentos. Se plantean además algunas estrategias de diseño para mejorar la renovación de los ciclos de aire en las zonas con mayor concentración de contaminantes o patógenos.

De acuerdo con los trabajos mencionados, al utilizar la ventilación natural se puede obtener las condiciones adecuadas para mejorar la salud (Hobeika et al., 2023; López Plazas & Sáenz de Tejada, 2024; Sun et al., 2024), siempre y cuando se diseñen adecuadamente los elementos de ventilación, tales como ventanas y patios, y se tomen en cuenta los elementos externos como son: la orientación del edificio, la vegetación circundante y la ubicación del espacio en relación con el edificio (Hang et al., 2023; López Plazas & Sáenz de Tejada, 2024; Niu et al., 2024; Sun et al., 2024).

El patio funciona adecuadamente como estrategia de ventilación cuando se permite una ventilación cruzada en los espacios (Micallef et al., 2016), mientras que en la ventilación unilateral se alcanzan las condiciones adecuadas de ventilación solo en el nivel de planta baja y en el último nivel del conjunto habitacional (Hang et al., 2023; López Plazas & Sáenz de Tejada, 2024). Los estudios mostraron que se debe continuar con el estudio de los patios como estrategia de ventilación, debido a que el aire viciado o los contaminantes que sale de un departamento hacia el patio puede dirigirse y entrar en los demás departamentos del conjunto, principalmente aquellos que se encuentren en el mismo nivel o en los niveles superiores (Micallef et al., 2016; Sun et al., 2024).

Dentro del dimensionamiento, la altura y el ancho del patio influyen en las condiciones de ventilación de los espacios y en el comportamiento del aire, se obtuvo una mejora significativa cuando se incrementa el ancho del patio, mientras que las condiciones de ventilación empeoran para las viviendas de los niveles más bajos, cuando se aumenta la altura del patio. Los edificios con patios más amplios proporcionan mejor ventilación que aquellos que son más profundos (Micallef et al., 2016; Prakash, 2022).

El propósito de esta investigación es analizar si la normativa de construcción de la Ciudad de México sobre el dimensionamiento de patios es conveniente para promover la ventilación natural en espacios reducidos tales como las viviendas de interés social y los conjuntos habitacionales. Se busca evidenciar la necesidad de aumentar los cambios de aire para crear confort y en caso de ser necesario, proponer cambios en los criterios de construcción de la normativa o bien respaldar las normas mediante un estudio aerodinámico.

El caso de estudio que se analiza consiste en un conjunto habitacional de seis niveles ubicado en la alcaldía Cuauhtémoc, en la Ciudad de México. El conjunto habitacional cuenta con diferentes tipos de patios de iluminación y ventilación, que varían entre

ellos en forma y medidas, cada uno de estos patios tiene la finalidad de permitir el acceso de luz y la ventilación a los departamentos que componen cada nivel.

La eficiencia en el dimensionamiento de los patios impuesto por la normativa se estudiará a partir del análisis de un caso de estudio. La metodología se divide en dos fases, la experimentación física y la simulación numérica. La etapa de experimentación física se compone de dos fases, la visualización del fenómeno y la medición, las cuales se desarrollarán en el túnel aerodinámico de diseño bioclimático de la UAM Azcapotzalco, se espera obtener la información suficiente para resolver los modelos numéricos. La etapa de simulación numérica será validada con los datos de la experimentación.

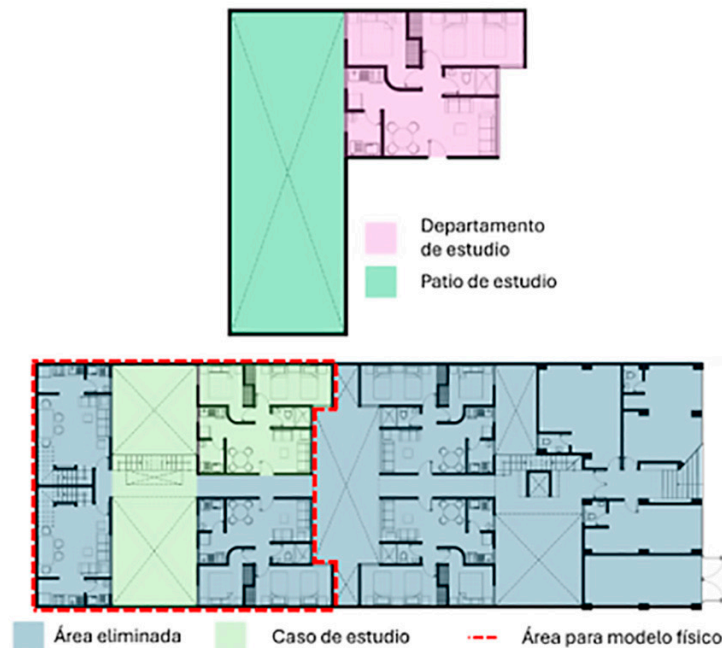


Figura 1. Planos arquitectónicos con la distribución del caso de estudio, a) departamento y patio y b) planta baja del conjunto habitacional.

Como se muestra en la Figura 1, para la realización de la investigación se definió un caso de estudio y se seleccionó el patio que se encuentra en la parte posterior del conjunto, a diferencia de los demás patios del conjunto, es el patio cuyas medidas cumplen de manera satisfactoria el dimensionamiento que especifica el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (Ciudad de México, 2024).

Se seleccionó además el departamento de la planta baja cuyos espacios se ventilan mediante el patio. Se decidió que el modelo físico abarcara únicamente al patio y los departamentos que lo rodean, los espacios restantes no son parte del caso de estudio. Al ser un modelo más reducido en cuanto a dimensiones geométricas, es posible utilizar toda la capacidad de cómputo en su solución.

METODOLOGÍA

El apartado de metodología se divide en dos, la primera parte es la metodología experimental utilizada en este trabajo.

a. Experimental

La metodología experimental se divide en el escalamiento del modelo físico, la selección de los materiales, la construcción y armado del prototipo.

i. Escalamiento

Para la determinación de la escala del modelo, se tomaron en cuenta las dimensiones para facilitar su construcción y manipulación. En la escala se consideraron las dimensiones para visualizar correctamente el fenómeno y permitieran que los instrumentos de medición entraran en la posición adecuada. La consideración más importante para la

determinación de la escala fueron las condiciones de operabilidad dentro del túnel aerodinámico ya que la sección del área de pruebas con la que cuenta tiene dimensiones de 1.10 m x 1.10 m. Las dimensiones del modelo físico no deben obstruir más del 50% del área. Si se excede el porcentaje de bloqueo, las turbinas del túnel aerodinámico se apagarán.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se fabricó el modelo físico en una escala 1:30, lo que permitió que tuviera una sección transversal de 0.53m x 0.50 m equivalente a 0.026 m2, lo que representa un nivel de obstrucción del 26% con relación al área transversal de la zona de pruebas del túnel aerodinámico, tal como se muestra en la Figura 2. Se logró que los motores de los ventiladores del túnel aerodinámico no se apaguen cuando se coloca el modelo en el interior de la zona de pruebas y que la dimensión del modelo físico sea la adecuada para visualizar el fenómeno y realizar las mediciones.

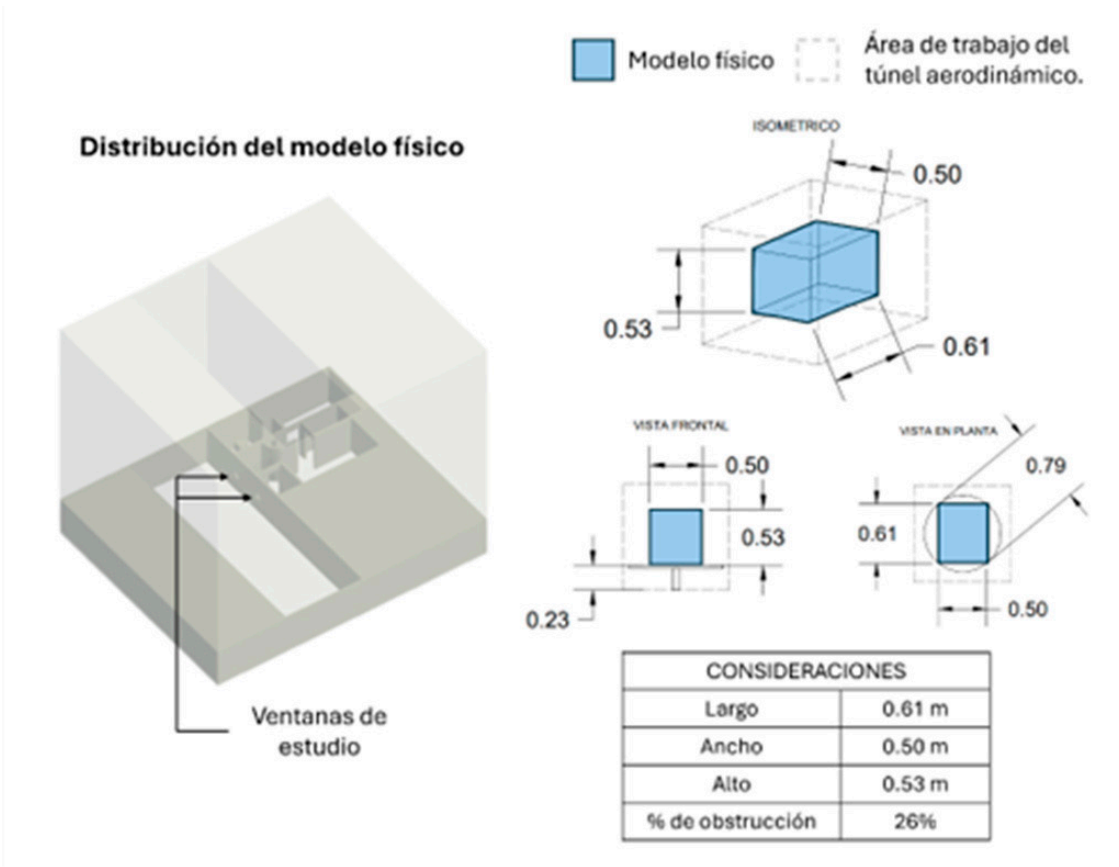


Figura 2. Escala del modelo físico y medidas en planta, alzado e isométrico.

ii. Construcción

Una vez que se determinó la escala y las medidas del modelo físico, se realizó la construcción del modelo con cartón corrugado y acrílico como se muestra en la Figura 3. El cartón corrugado permite obtener una visualización correcta del fenómeno al contrastar adecuadamente con el humo que se utilizó en la técnica de visualización, además, facilitó la realización de los muros curvos que tiene el diseño del departamento. El acrílico se utilizó como tapa para visualizar el comportamiento del humo en planta.

Un aspecto importante durante la construcción del modelo fue evitar la presencia de huecos y que

existiera alguna fuga. Estas fugas podrían modificar el patrón de flujo del humo y alterar los resultados de la visualización o la medición. El despiece del modelo físico se realizó mediante corte laser como se muestra en la Figura 3a, para evitar la aparición de huecos en las uniones como se muestra en la Figura 3b. Para minimizar la presencia de huecos en las uniones se utilizó cinta como se muestra en la Figura 3c. Con todo lo anterior se obtuvo un modelo físico funcional y adecuado para la experimentación física en el túnel aerodinámico como se muestra en la Figura 3d.



Figura 3. Detalles de la construcción del modelo físico a escala. a) corte de las piezas en cartón, b) armado del modelo, c) pegado de las paredes, d) modelo físico.

b. Modelo numérico

Para la realización del modelo numérico se utilizaron las características geométricas y las condiciones de operación utilizadas en el modelo físico.

i. Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento representa la etapa inicial para la realización de las simulaciones numéricas. Esta etapa comienza con la elaboración

volumétrica del modelo numérico, la cual se realizó en el software Revit 2023, donde se modelaron mediante extrusiones únicamente los aspectos arquitectónicos del departamento, tales como muros y vanos (Stine, 2022). La etapa de preprocesamiento culmina con la discretización del modelo para lo cual se utilizó el software Salome 9.12. El modelo discretizado representa el volumen de aire al interior del departamento. En la Tabla 1 se muestran los parámetros y valores establecidos en la discretización (Ribes & Caremoli, 2007).

Parametros	Valor
Tamaño máximo del elemento.	0.09-0.1
Tamaño mínimo del elemento.	0.0009-0.001
Tasa de crecimiento.	0.3
Número de elementos en cada arista.	15
Número de elementos en las curvaturas.	2
Cantidad de elementos en la malla obtenida	2,005,184

Tabla 1. Parámetros y valores de la discretización del modelo numérico.

El modelo desarrollado en Revit se exporta en formato stl para realizar la malla. Los parámetros descritos en la Tabla 1 se ingresan al software Salome para discretizar el modelo numérico. Estos parámetros determinan la resolución de los resultados.

ii. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera tienen toda la información necesaria que se define en el solucionador para resolver las ecuaciones constitutivas. Se estableció la condición de no deslizamiento y no salto de temperatura en las paredes que contienen el volumen de control.

Se definieron también las variables climatológicas, las cuales son: la velocidad del fluido en $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la densidad del aire $0.96\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, la presión atmosférica, 80 kPa y la temperatura del aire 289.15 K . Todos estos valores fueron tomados de los datos reportados por la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la CDMX (Gobierno de México, 2025).

Por último, se definieron las condiciones de entrada y salida del volumen de control. Para establecer la entrada y las condiciones de operación dentro del departamento se definió un prisma cúbico en una de las recámaras, cuyas caras permiten definir

diferentes orientaciones del flujo de aire dentro de la habitación. La definición del prisma permite visualizar el flujo en diferentes orientaciones de manera independiente o también en conjunto. En cada arista del prisma, se definió una velocidad de entrada perpendicular a cada pared. Para la condición de salida se utilizó la superficie superior del patio, donde se definió una presión de salida igual a cero, ya que previamente se definió una atmosfera de presión, establecida en las variables climatológicas.

iii. Procesamiento

En esta subetapa se resolvieron las ecuaciones constitutivas del modelo numérico, es decir se calculó la solución numérica. Para la realización de las simulaciones, se utilizó el solucionador OpenFOAM, se leyeron los datos generados en la discretización y las condiciones de frontera, las cuales se describen en el apartado. El modelo de turbulencia utilizado es el modelo de esfuerzos de Reynolds o RSM por sus siglas en inglés, el cual permite obtener resultados detallados de la turbulencia (Weller et al., 1998). Es uno de los modelos más utilizados en aplicaciones de diseño y flujo de fluidos y tiene una excelente relación entre la precisión y el tiempo de cálculo.

La primera ecuación que OpenFOAM resuelve es la ecuación de continuidad, es una ecuación utilizada en la dinámica de fluidos computacional para cualquier sistema donde existe un fluido en movimiento.

La forma general de la ecuación de continuidad en OpenFOAM se expresa en la Ecuación 1 de la siguiente forma:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{ec.1}$$

∇ es el denominado operador de la divergencia y el termino \mathbf{U} es el vector de velocidad del fluido con unidades en: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$\frac{D(\rho \overline{u_i u_j})}{Dt} = P_{ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} + D_{T,ij} + D_{p,ij} + \Omega_{ij} \tag{ec.2}$$

Donde $\frac{D(\rho \overline{u_i u_j})}{Dt}$ es el termino de convección y representa la tasa de cambio de los esfuerzos de Reynolds en el tiempo t , ρ es la densidad del fluido

en $kg \cdot m^{-3}$, u'_i es la velocidad promedio en i , u'_j es la velocidad promedio en la componente j , P_{ij} es la producción de esfuerzos de Reynolds debido a la interacción del esfuerzo de Reynolds con el campo de velocidad promedio, Π_{ij} es el término que distribuye la energía turbulenta entre los diferentes componentes de los esfuerzos de Reynolds, ϵ_{ij} es la tasa a la que la energía cinética de las fluctuaciones turbulentas se disipa en calor debido a la viscosidad, $D_{T,ij}$ representa el transporte de los esfuerzos de Reynolds debido a las fluctuaciones de la velocidad, $D_{p,ij}$ representa el transporte de los esfuerzos de Reynolds debido a las fluctuaciones de presión, Ω_{ij} este término aparece en los sistemas de referencia rotatorios, en esta investigación no será utilizado.

La ecuación de conservación de cantidad de movimiento se expresa en la Ecuación 3:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla \cdot \mu_{eff}(\nabla U_i) - \frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + S_i \quad (ec.3)$$

Donde U_i es la componente i de la velocidad, p es la presión en Pa , x_i es la componente espacial i en metros, μ_{eff} es la viscosidad efectiva en $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, S_i representa los términos fuentes adicionales, tales como la gravedad.

iv. Post-procesamiento

La etapa de post-procesamiento consiste en la visualización y análisis de los resultados generados en el procesamiento. Para esta etapa se utilizó el software Paraview (Ahrens et al., 2005), el cual transforma en gráficas y tablas los resultados numéricos obtenidos y permite visualizar el comportamiento del aire en el caso de estudio, de igual manera permite conocer los valores de velocidad del aire en diferentes puntos del departamento y del patio mediante un código de colores.

RESULTADOS

a. Visualización.

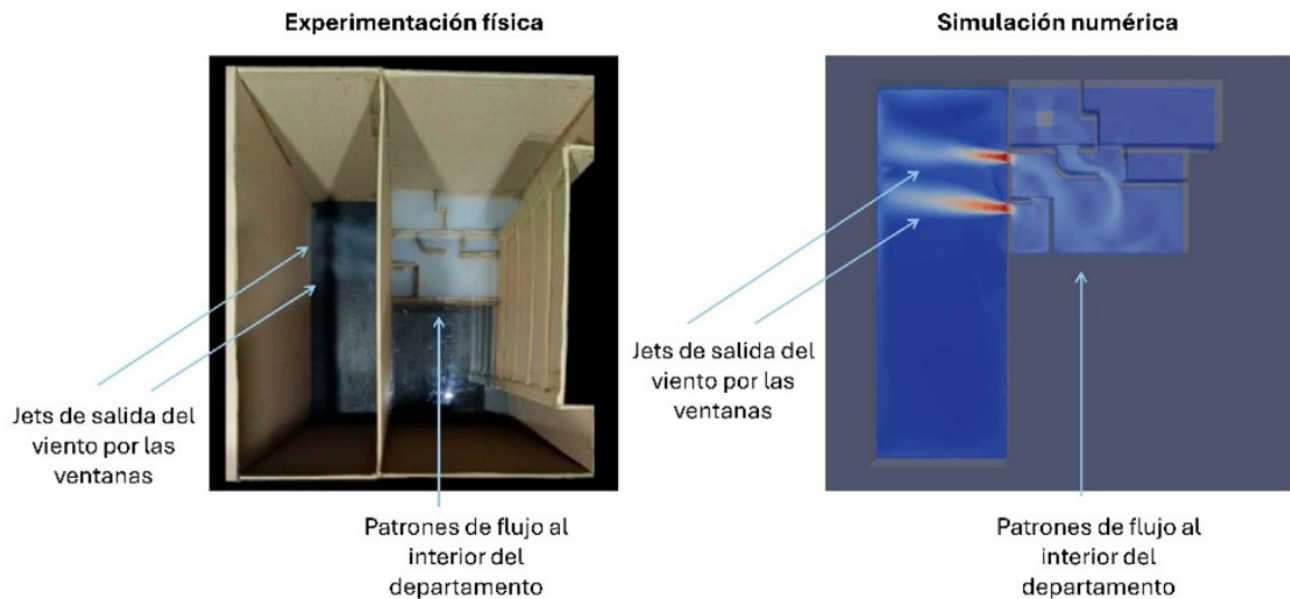


Figura 4. Comparación de resultados entre a) experimentación física y b) simulación numérica.

En la Figura 4 se muestra el resultado de la visualización del modelo físico dentro del túnel aerodinámico y el resultado de las simulaciones

numéricas. Se puede observar que las simulaciones numéricas reproducen cualitativamente el patrón de flujo observado en la visualización realizada en

la experimentación física. En el experimento primeramente se llena de humo el volumen a escala del departamento, posteriormente se abre una compuerta en las ventanas del modelo. El humo sale del departamento y se dirige hacia el patio. En ambas figuras, se puede observar el movimiento del humo dentro del departamento. En los alrededores del departamento no existe algún elemento que pueda afectar la visualización. Tampoco existen personas o muebles que puedan afectar el comportamiento del humo en el interior.

En la Figura 4b se muestra los resultados de la simulación tridimensional en estado no estacionario. Se utilizó un plano horizontal de visualización a la altura de las ventanas, es decir, a 1.25 metros por encima del nivel del piso. En este plano se puede observar, con ayuda del código de colores, que el aire en la habitación describe una trayectoria en el interior del departamento antes de salir hacia el patio a través de las ventanas. Se observa además que el aire cambia su velocidad en diferentes zonas del departamento debido a la reducción de los espacios que generan las paredes interiores.

La trayectoria del aire descrita en la simulación al interior del departamento inicia en la habitación donde se ubica la entrada de aire del modelo numérico. La entrada del aire se definió con un prisma al centro de la habitación. La geometría propuesta permite visualizar el comportamiento

del flujo de aire dentro del departamento. El prisma tiene seis orientaciones, las cuales pueden utilizarse en diferente configuración. Desde una hasta seis direcciones, de forma separada o en simultaneo, sin necesidad de realizar para cada configuración una simulación diferente.

La puerta de la habitación representa la primera contracción del flujo, por lo cual el viento aumenta su velocidad al pasar a través de ella. El elemento curvo que se encuentra al salir de la habitación es la segunda contracción, lo que aumenta la velocidad del aire. Después choca con el muro del baño y cambia de dirección hacia la sala donde se divide y forma dos vórtices que ocupan el volumen de la sala. El vórtice de la izquierda se dirige hacia la cocina donde se encuentra la ventana que representa la mayor contracción, por ende, es en la ventana donde se observa la mayor velocidad del viento en todo el trayecto.

De acuerdo con la información de la Figura 4, el comportamiento del aire en el patio es similar tanto en la experimentación física como en la simulación numérica, ya que el flujo de salida es visible en ambos casos. Una vez en el patio, el flujo de aire se desarrolla a partir de la aceleración que sufre al pasar a través de las ventanas. En ambos casos es visible que el flujo de aire comienza a ocupar el volumen del patio. En la visualización también se observa que el flujo pasa cerca de las paredes.

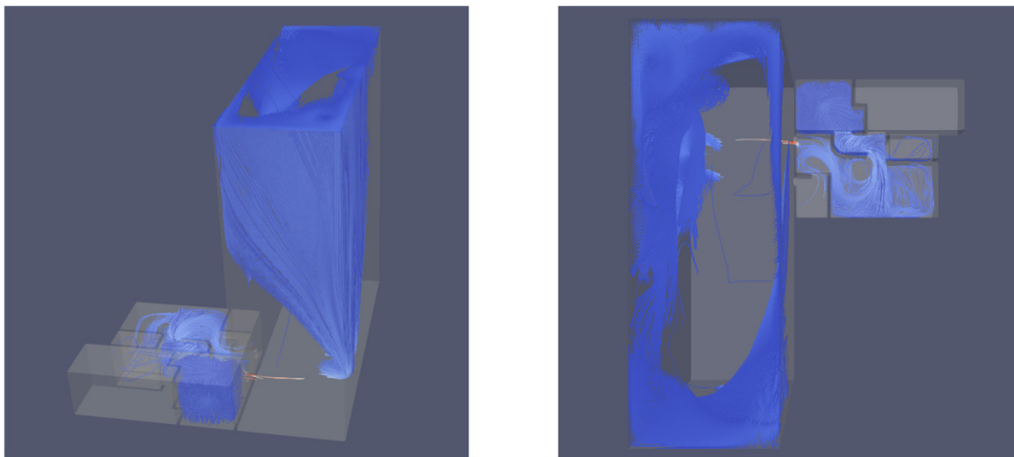


Figura 5. Líneas de flujo con un color de acuerdo con la magnitud de velocidad. (a) axonométrico y (b) vista superior.

De acuerdo con el axonométrico de la simulación que se muestra en la Figura 5a, el aire sigue una trayectoria continua y el patrón de flujo únicamente se encuentra en ciertos espacios del departamento. En esta figura se observa que la incidencia del aire generado en la habitación uno, en la segunda habitación es casi nula. Mientras que en el baño existe una ligera incidencia de líneas de flujo, incluso cuando el muro curvo dirige el flujo hacia esa dirección.

En la Figura 5a, el axonométrico nos permite visualizar que las líneas de flujo únicamente salen hacia el patio a través de la ventana de la cocina, donde aumenta su velocidad y se obtiene la salida del aire que choca con el muro del patio. Una vez que el flujo de salida se encuentra en el patio, comienza a ascender alrededor de los muros del patio y conforme asciende, se distribuye en los muros circundantes. Paulatinamente, las líneas de flujo ocupan el volumen del patio.

En la Figura 5b se muestra la vista en planta de la simulación numérica, en la cual no se utiliza un plano de visualización, el patrón de flujo está representado a través de líneas de flujo tridimensionales. Esta visualización nos permite observar y analizar de manera distinta el comportamiento del aire en el departamento y en el patio. Se puede observar también la trayectoria que sigue el viento al interior del departamento hasta salir al patio.

De acuerdo con las líneas de flujo de la Figura 5 se observa que la geometría y la distribución de los espacios interiores del caso de estudio tienen una incidencia importante en la ventilación del departamento. Por ejemplo, la existencia del muro curvo al exterior de la habitación cambia la dirección del aire y lo dirige hacia los espacios más alejados de las ventanas. En la sala, donde se observan dos vórtices, el vórtice del lado izquierdo continua hacia la cocina para finalmente moverse a través de la ventana y salir hacia el patio.

La incidencia del flujo que pasa alrededor del muro curvo desarrolla una ruta de salida con mayor longitud, lo cual no es adecuado para mantener la calidad del aire dentro del departamento, lo más conveniente es que la ruta de salida del aire implique el menor recorrido posible y se evite la incidencia del aire en diferentes espacios con la

finalidad de propiciar una velocidad constante y evitar que el aire viciado de un espacio se dirija a otro lugar del interior del departamento. Con un recorrido más largo, también se propicia una menor cantidad de cambios de aire.

De acuerdo con los resultados de la experimentación física y la simulación numérica que se pueden visualizar en las Figuras 4 y 5, las dimensiones del patio normativo permiten obtener condiciones adecuadas de ventilación al interior del departamento, lo que permite la salida del aire que se encuentra al interior del departamento y facilita el ingreso de aire del exterior del departamento, sin embargo, para que ocurra esta situación, debe haber un flujo continuo dentro del departamento o bien una corriente desde el exterior.

De acuerdo con López Plazas y colaboradores, las viviendas estudiadas que cuentan con una ventilación unilateral a través del patio, son las menos favorables para propiciar el intercambio de aire entre el interior y el exterior (López Plazas & Sáenz de Tejada, 2024). En 2023, Hang y colaboradores mencionaron bajo una ventilación natural unilateral, la tasa de renovación del aire no es suficiente y la calidad del aire es baja (Hang et al., 2023). En el trabajo de Niu y colaboradores se realizaron simulaciones numéricas y se encontró que al utilizar únicamente la ventilación natural unilateral como estrategia de ventilación no se obtuvieron resultados óptimos (Niu et al., 2024). En este trabajo, el caso de estudio se encuentra en la planta baja del edificio y debido a las características del conjunto habitacional, los espacios al interior del departamento se ventilan de manera unilateral a través del patio de ventilación.

A través del análisis de los resultados se pudo observar que, aun cuando la ubicación del departamento y el tipo de ventilación son las menos favorables, se promueve la renovación del aire del departamento mediante el intercambio del aire interior por aire exterior. Por lo cual los aspectos desfavorables de la ventilación en el caso de estudio no están directamente relacionados con su ubicación, en realidad la distribución arquitectónica de los espacios tuvo una mayor influencia en las condiciones de ventilación que se dan al interior del departamento.

En trabajos anteriores revisados se encontró que existen condiciones de ventilación que pueden surgir a partir de ventilar espacios a través de un patio. Una de ellas es que la capacidad de renovación del aire al usar el patio como estrategia de ventilación natural, se encuentra en un nivel intermedio en comparación con otras estrategias. Sin embargo, la tasa de renovación del aire se afecta considerablemente conforme se reduce el porcentaje de apertura de las ventanas (López Plazas & Sáenz de Tejada, 2024). Otra condición importante es que el aire proveniente de los niveles inferiores suele interactuar con los niveles superiores, lo que afecta la calidad del aire de los demás niveles (Hobeika et al., 2023).

De acuerdo con los resultados obtenidos, el porcentaje de apertura de las ventanas del caso de estudio, correspondiente al 5% del área del espacio como establece la normativa, conduce a condiciones desfavorables de ventilación. Esto se debe a que el volumen de aire interior que sale hacia el patio es poca, esto ocasiona que la tasa de renovación del aire disminuya y que la calidad del aire al interior del departamento sea afectada.

Asimismo, en los resultados de la experimentación física y de la simulación numérica se observó que el aire que sale del departamento tiende a ascender cercano a las paredes del patio hasta llegar a la parte superior. Este comportamiento podría causar problemas en la calidad del aire de los departamentos superiores, debido a la posibilidad de que el aire contaminado que proviene del departamento de estudio ingrese en los demás niveles. Debido a lo anterior se debe prestar atención al diseño de las ventanas en el patio y no únicamente a su dimensionamiento.

En el trabajo de Micallef y colaboradores se analizaron las condiciones de ventilación que se obtienen en una habitación que tiene ventilación cruzada y que se ventila a través de un patio, con una relación de ancho/alto, similar a la del patio de análisis de este trabajo (Micallef et al., 2016). Y se encontró que cuando existe una ventilación cruzada, el flujo del aire ingresa a la habitación por el lado que se encuentra en sotavento debido a la zona de recirculación que se forma después del choque del aire en barlovento. Posteriormente, el aire atraviesa la habitación y se dirige hacia el patio

en dirección contraria al viento. De esta forma se realiza el intercambio del aire interior y exterior.

El comportamiento del aire observado en una habitación con ventilación cruzada es muy diferente al observado en el caso de estudio analizado en esta investigación. Los resultados obtenidos en la actual investigación muestran que el intercambio de aire entre el interior y el exterior solo se realiza a través de la ventana que da hacia el patio. Esta diferencia en el comportamiento del aire implica que un espacio al estar ventilado de manera unilateral tenga condiciones menos favorables de ventilación, debido a que el área efectiva para realizar el intercambio de aire interior por aire exterior es menor y se realiza únicamente a través del patio.

CONCLUSIONES

La geometría y la distribución de los espacios interiores del caso de estudio tienen una incidencia importante en las condiciones de ventilación del departamento, en el caso de estudio, el muro curvo condiciona la dirección del flujo de aire y su interacción con los espacios que componen el diseño. Un recorrido más largo para el aire, promueve una disminución en la cantidad de cambios de aire.

Las dimensiones de los espacios influyen en el comportamiento del aire, la presencia de contracciones o la disminución de área de los espacios, promueve que la velocidad del aire aumente. El dimensionamiento de las ventanas también es importante, se propone 5% del área del espacio, para obtener una aceleración significativa del aire al salir del departamento.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso de un patio de ventilación con medidas normativas permite una ventilación adecuada en los espacios interiores, sin embargo, para que ocurra la interacción del aire entre el departamento y el patio, debe existir una corriente que propicie el movimiento del aire en alguno de los dos espacios. Esto puede ocurrir mediante un gradiente de presión o de temperatura.

Existen otros elementos como son los muros, las puertas y las ventanas que deben considerarse al momento de analizar las condiciones de ventilación en el interior del departamento. Para mejorar

la ventilación, es necesario conocer la magnitud de velocidad del aire exterior, las condiciones ambientales en el departamento, el número de usuarios, el tipo de mobiliario e incluso cuando existan, los elementos de ventilación artificial que pudieran alterar el comportamiento del aire.

En este trabajo se presentaron resultados de la experimentación física y de simulaciones numéricas en estado no estacionario y se encontró similitudes. Se realizó un análisis detallado y complementario sobre la ventilación natural en edificios de conjuntos habitacionales. La metodología propuesta posibilita obtener resultados aplicables a la arquitectura y otras áreas de conocimiento.

Los resultados obtenidos muestran que la normativa de diseño sobre el dimensionamiento de elementos de ventilación requiere de mayor atención y estudio. Ya que el análisis que se realizó expuso que existe un aspecto importante que no fue considerado en la norma de construcción. Este aspecto es que el comportamiento del aire al interior de los espacios es un fenómeno tridimensional y no estacionario, por lo cual no es adecuado determinar las condiciones de ventilación de un espacio a partir de criterios de diseño únicamente. Es decir, no es suficiente con considerar el dimensionamiento del patio y ventanas, también es necesario considerar las condiciones no estacionarias del aire al interior del departamento.

A partir de lo anterior se vuelve necesario implementar o desarrollar otras técnicas, que permitan respaldar que la normativa de diseño y construcción establece los criterios adecuados para garantizar que se cumpla con los requerimientos de ventilación necesarios en cada espacio. Además, se debe tener en cuenta el confort y la salud de los usuarios, al mantener un nivel adecuado en la calidad del aire interior, lo que se obtiene a partir de una tasa de renovación suficiente que permita sustituir la cantidad necesaria de aire interior, que se encuentre contaminado, por aire del exterior.

En otras investigaciones se realizó un análisis de las condiciones de ventilación, únicamente a partir del dimensionamiento de patios y criterios de diseño. Sin embargo, en este trabajo se utilizó una metodología que permitió analizar las condiciones de ventilación del caso de estudio en diferentes condiciones de operación. Se obtuvo como resultado el

patrón de flujo al interior de los espacios, es decir, las condiciones no estacionarias del aire. Esto permitió determinar las condiciones favorables y desfavorables de ventilación que aparecen en el departamento, debido al dimensionamiento de las ventanas y del patio. Esta metodología puede ser utilizada para el análisis de diferentes configuraciones de departamentos y los hallazgos pueden ser relevantes al momento de establecer las normas.

AGRADECIMIENTOS

Los experimentos físicos con el modelo a escala se realizaron en el túnel aerodinámico del Laboratorio de diseño bioclimático en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Las simulaciones numéricas y la construcción del modelo a escala se realizaron en el Laboratorio de Visualización y Cómputo Científico en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. El modelo numérico se desarrolló en Autodesk Revit 2023, la discretización se realizó en la plataforma Salome 9.12. La solución numérica se calculó en el software libre OpenFOAM 11. La visualización de los resultados se realizó en Paraview 6.0. La publicación de este artículo se utiliza para satisfacer uno de los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Diseño de Daniel Ventura Guerrero. Los autores agradecen a los revisores anónimos sus comentarios y recomendaciones hechas para mejorar la estructura del manuscrito y la presentación de los resultados.

Referencias

- Ahrens, J., Geveci, B., & Law, C. (2005). ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization. *The Visualization Handbook*, 717-731. <https://doi.org/10.1016/B978-012387582-2/50038-1>
- Alcayna Orts, J. J. (2013). *Estudio de las necesidades de ventilación natural desde el punto de vista higiénico mediante el análisis de la calidad de aire en la ciudad de Valencia. Aplicación a la lonja de la seda* Universidad Politécnica de Valencia]. Madrid. <https://riunet.upv.es/handle/10251/28980>

Ciudad de México. (2024). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Ciudad de México: Gaceta Oficial del Distrito Federal Retrieved from https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/images/leyes/reglamentos/RGTO_DE_CONSTRUCCIONES_DEL_DISTRITO_FEDERAL_8.pdf

del Campo Díaz, V. J., & Terés Zubiaga, J. (2011). Ventilación en viviendas: El reto de una ventilación eficaz y eficiente. *Re. Revista de Edificación*, 120-127. <https://doi.org/10.15581/020.1685>

Gobierno de México. (2025). *Servicio Meteorológico Nacional*. Gobierno de México <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

Guyot, G., Sayah, S., Guernouti, S., & Melois, A. (2022). Role of ventilation on the transmission of viruses in buildings, from a single zone to a multizone approach. *Indoor Air*, 32(8), e13097. <https://doi.org/10.1111/ina.13097>

Hang, J., Yang, X., Ou, C.-Y., Luo, Z.-W., Fan, X.-D., Zhang, X.-L., Gu, Z.-L., & Li, X.-X. (2023). Assessment of exhaled pathogenic droplet dispersion and indoor-outdoor exposure risk in urban street with naturally-ventilated buildings. *Building and Environment*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110122>

Hobeika, N., García-Sánchez, C., & Bluysen, P. M. (2023). Assessing Indoor Air Quality and Ventilation to Limit Aerosol Dispersion-Literature Review. *Buildings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030742>

López Plazas, F., & Sáenz de Tejada, C. (2024). Natural ventilation to improve indoor air quality (IAQ) in existing homes: The development of health-based and context-specific user guidelines. *Energy and Buildings*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114248>

Micallef, D., Buhagiar, V., & Borg, S. P. (2016). Cross-ventilation of a room in a courtyard building. *Energy and Buildings*, 133, 658-669. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.053>

Niu, S., Tong, H., Liu, X., Wang, A., Chen, L., Song, D., Zhou, X., Shi, X., & Jin, X. (2024). A quick simulation workflow to optimizing natural ventilation for building and landscape design. *Energy and Buildings*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114875>

Prakash, D. (2022). Ventilation performance analysis on low-rise courtyard building for various courtyard shape factors and roof topology. *International Journal of Ventilation*, 22(1), 56-76. <https://doi.org/10.1080/14733315.2022.2036477>

Ribes, A., & Caremoli, C. (2007). SALOME platform component model for numerical simulation. *Proceedings of the 31st Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2007)*, 553-564. <https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2007.185>

Sosa Griffin, M. E. (1999). *Ventilación natural efectiva y cuantificable: Confort térmico en climas cálidos-húmedos* (CDCH UCV, Ed. Vol. 62). Consejo de desarrollo científico y humanístico.

Stine, D. J. (2022). *Design Integration Using Autodesk Revit 2023*. SDC Publications. <https://books.google.com.mx/books?id=cLRoEAAQBAJ>

Sun, H., Owen, J. S., Almazmumi, S., Liu, C., Mohammadi, M., Dik, A., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2024). Pollutant cross-transmission in courtyard buildings: Wind tunnel experiments and computational fluid dynamics (CFD) evaluation. *Building and Environment*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111919>

Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computer in Physics*, 12(6), 620-631. <https://doi.org/10.1063/1.168744>

Daniel Ventura Guerrero

Es arquitecto egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco en el área de concentración en Tecnología y Administración. Actualmente es alumno de la maestría en diseño bioclimático en la UAM Azcapotzalco y desarrolla un proyecto sobre el estudio de la ventilación natural mediante patios a edificios residenciales. En el proyecto se utilizan técnicas experimentales y numéricas. Para la parte experimental se utiliza la visualización con humo y la medición con técnicas no intrusivas. En la parte numérica se utilizó la técnica de dinámica de fluidos computacional. El arquitecto Daniel Ventura ha realizado presentaciones en foros académicos sobre el diseño bioclimático.

César Augusto Real Ramírez

Nació en la Ciudad de México en 1977, realizó sus estudios de licenciatura y maestría en Ingeniería Mecánica en el Instituto Politécnico Nacional. Terminó sus estudios de doctorado en Ciencias e Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma Metropolitana. Es profesor titular adscrito al Departamento de Sistemas en la UAM Azcapotzalco. Tiene 30 artículos publicados en revistas JCR. Su principal línea de investigación es el estudio mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional con aplicación en sistemas y equipos industriales. Ha participado como responsable técnico en diferentes proyectos de investigación patrocinados.

Roberto Barnard Amosurrutia

Es un académico y arquitecto mexicano con una trayectoria en el ámbito de la enseñanza y la investigación, particularmente en el área de diseño bioclimático y estudios ambientales en la arquitectura. Es profesor-investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Azcapotzalco, adscrito al Departamento de Medio Ambiente, y también ha sido coordinador del Posgrado en Diseño Bioclimático de la misma institución. Su formación incluye una Maestría de la Universidad de Virginia Tech. Ha participado activamente en proyectos de investigación relacionados con la sustentabilidad y el cuidado del medio ambiente en la arquitectura, siendo uno de los impulsores del posgrado en Diseño Bioclimático en la UAM Azcapotzalco, el cual ha alcanzado un alto nivel a nivel nacional.



Política de acceso abierto

La Revista Artificio proporciona un acceso abierto a su contenido, basado en el principio de que ofrecer un acceso libre a las investigaciones ayuda a incrementar el intercambio global del conocimiento. Artificio no cobra ni cobrará ningún cargo a sus lectores por concepto de suscripción, ni a los autores por enviar, procesar o publicar sus artículos.

Como condición de publicación, los autores acuerdan liberar sus derechos de autor bajo una licencia compartida, específicamente la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a cualquier persona compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato bajo los siguientes términos:

- *Dar crédito al autor del texto
- *No hacer uso del material con propósitos comerciales
- *No transformar o modificar el material.