Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Edificación
Programa de Doctorado en Innovación Tecnológica en
Edificación

Optimización de la calidad del aire interior mediante la
identificación de flujos de partículas contaminantes
Tesis Doctoral

2020

Autor: Edison Maximiliano Castillo Carchipulla
Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

Director: Justo García Navarro
Doctor Arquitecto

TESIS DOCTORAL

Título: “Optimización de la calidad del aire interior mediante la identificación de flujos de partículas contaminantes”.

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día __ de septiembre de 2020.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 15 de enero de 2021 en la Escuela Técnica Superior de Edificación, acuerda otorgarle la calificación de:

El presidente

Los vocales

El secretario

CONTENIDO

CONTENIDO	I
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
AGRADECIMIENTOS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XIII
CAPÍTULO 01. INTRODUCCION Y MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 CAPA LÍMITE DE ANÁLISIS	2
1.3 SUCESOS DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE INTERIOR	8
1.4 MONITOREO Y GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE.....	9
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.6 REFERENCIAS	11
CAPÍTULO 02. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
2.1 INTRODUCCIÓN	15
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL	15
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
CAPÍTULO 03. MATERIALIADAD CONSTRUCTIVA: RELACIÓN ARQUITECTURA - SALUD EN UN AMBIENTE INTERIOR	18
3.1 INTRODUCCIÓN	18
3.2 GENERALIDADES DE UN AMBIENTE INTERIOR	19
3.2.1 Concepción de un ambiente interior y su normativa	20
3.3 DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN	21
3.3.1 Fuentes externas naturales y antropogénicas.....	21
3.3.1.1 Fuentes interiores.....	25

3.3.1.2	<i>Deficiencias de renovación de aire</i>	26
3.3.2	Materialidad en un ambiente interior	28
3.3.3	Efectos sobre la salud desde alternativas computacionales.....	30
3.4	DISEÑO DEL EDIFICIO Y SALUD.....	31
3.5	CONCLUSIONES	33
3.6	REFERENCIAS	34
CAPÍTULO 04. LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y LOS VÍNCULOS INTERNACIONALES		47
4.1	INTRODUCCIÓN	47
4.2	AMBIENTE INTERIOR, FUENTES DE DETERIORO DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR Y NORMATIVA	50
4.2.1	Acciones regulatorias de contaminación exterior	50
4.2.2	Contaminantes del ambiente interior y acciones normativas....	53
4.3	LA VENTILACIÓN Y ACCIONES DE NORMATIVAS	58
4.3.1	Gestión pública actual y proyección desde la calidad del aire interior	60
4.4	CONCLUSIONES	62
4.5	REFERENCIAS	64
CAPÍTULO 05. COMPOSICIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE CONTAMINANTES AL INTERIOR DE UN AMBIENTE.....		77
5.1	INTRODUCCIÓN	77
5.2	FORMALDEHÍDO	78
5.2.1	Propiedades físicas del formaldehído	80
5.2.2	Propiedades químicas del formaldehído	80
5.2.3	Materialidad Constructiva.....	81
5.2.4	Efectos sobre la salud.....	83
5.3	DIÓXIDO DE CARBONO	84
5.3.1	Propiedades físicas del dióxido de carbono	85

5.3.2	Propiedades químicas del dióxido de carbono	85
5.3.3	Materialidad Constructiva.....	88
5.3.4	Efectos sobre la salud.....	88
5.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS PARTÍCULAS PM _{2,5}	90
5.4.1	Propiedades físicas de PM _{2,5}	91
5.3.2	Propiedades químicas de PM _{2,5}	92
	<i>5.3.2.1 Determinación de elementos químicos en el material particulado PM_{2,5}.....</i>	<i>92</i>
	<i>5.3.2.2 Análisis por Fluorescencia de Rayos-X (FRX)</i>	<i>93</i>
5.3.3	Materialidad Constructiva.....	94
5.3.4	Efectos sobre la salud.....	94
	<i>5.3.4.1 Cantidades emitidas y valores límite del Material Particulado ..</i>	<i>94</i>
5.3.5	Conclusiones.....	95
5.3.6	Referencias	96
CAPÍTULO 06. EL MODELO CFD-RANS		109
6.1	INTRODUCCIÓN	109
6.2	SIMULACIÓN MEDIANTE SISTEMAS CFD.....	110
6.3	EL CASO DE COMSOL MULTIPHYSICS ®	114
6.3.1	Casos de simulación	115
6.4	REFERENCIAS	121
CAPÍTULO 07. MODELANDO LA DISPERSIÓN DE FLUJOS DE PARTÍCULAS CONTAMINANTES		125
7.1	INTRODUCCIÓN	125
7.2	DISCRIMINACIÓN DE UN ESPACIO INTERIOR	125
7.2	COMPUESTO EXPERIMENTAL	129
7.3	LA GEOMETRÍA, LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS Y LAS CONDICIONES DE LOS LÍMITES.....	129

7.3.1	Mallado de elementos finitos tipo 1 condiciones físicas a tratar	129
7.3.2	Mallado de elementos finitos tipo 2 para las concentraciones y rastreo de contaminantes	131
7.4	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	133
7.4.1	<i>Flujo laminar con mallado tipo 1.....</i>	<i>133</i>
7.4.2	Flujo laminar con mallado tipo 2.....	135
7.5	DISPERSIÓN Y ABSORCIÓN DE CONTAMINANTES DE UN AI.....	137
7.5.1	Dispersión por ventilación	137
7.5.2	Absorción a través de materiales de construcción.....	137
7.6	CONCLUSIONES.....	142
7.7	REFERENCIAS.....	142
CAPÍTULO 08. CONCLUSIONES GENERALES		145
8.1	CONCLUSIONES.....	145
CAPÍTULO 09. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN		150
9.1	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	150
PUBLICACIONES		151
LISTADO DE FIGURAS.....		152
LISTADO DE TABLAS		155
APÉNDICE 1.....		157
APÉNDICE 2.....		158
APÉNDICE 3.....		159
APÉNDICE 4.....		160
DIÁMETROS DE LAS PARTÍCULAS Y NÚMERO DE REYNOLDS.....		160
APÉNDICE 5.....		161
APÉNDICE 6.....		162

APÉNDICE 7.....	163
APÉNDICE 8.....	164

RESUMEN

La contaminación ambiental exterior se encuentra en aumento, y se ha reconocido históricamente. En contraposición, la contaminación interior tiene equivalente comportamiento, pero solo ha sido mayormente reconocida desde mediados del siglo XX, es decir, la calidad del espacio y del ambiente mayormente ocupado por el ser humano, necesita un abordaje integral, toda vez que se ha demostrado su incidencia en la salud y puede derivar en una problemática de nivel colectivo. El incremento epidemiológico en los últimos años se debe a los factores ambientales que se ubican entre las tres primeras causas de mortandad y morbilidad de la población. El exagerado incremento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos derivados de diferentes fuentes, ya sean antropogénicas o naturales, liberan gases y pequeñas partículas que parecen tener asociación con el aumento de las enfermedades alérgicas del sistema respiratorio (asma, rinitis, entre otros). Por ello, desde la perspectiva arquitectónica, la presente investigación enfocada en espacios no industriales, desarrolla la selección y lectura exegética de estudios científicos desde el área de la salud, materiales de la construcción y su relación a través de la simulación de dinámica de fluidos computacionales usando la herramienta COMSOL *Multiphysics*®. Adicionalmente se incluye el análisis normativo en sentido histórico y vigente en España, a fin de identificar estrategias de diseño y construcción para mejorar la calidad del ambiente interior, y a través de él, la salud de sus ocupantes.

A nivel global, se puede decir que, el volumen de la contaminación del aire interior y su control tienen diferentes consideraciones, el flujo de contaminantes como el CO₂, formaldehído y partículas PM_{2.5} caracterizan el escenario más frecuente de los espacios interiores, al ser compuestos contenidos en los materiales de construcción, que también se incluyen a través de las actividades humanas de restauración y trabajo, y ratifican su aporte a la afección a la salud según la exposición. A nivel específico se define que, los flujos de aire que se maneja en el producto final a trabajar en un espacio determinado y seleccionado con diversas características físicas y químicas arrojan resultados de una secuencia determinada por el ingreso de flujos constantes de aire que tienen una determinada cantidad de presión y dirección determinado con ubicación de ingreso y salida del aire en una sola posición. Las trayectorias que describen los contaminantes y el flujo del aire son inicialmente direccionadas hacia la parte superior del espacio interior y luego existen descensos visibles que son determinados por el CFD.

Finalmente, el abordaje de la contaminación del aire interior supone un reto para el ejercicio profesional de la arquitectura y otras disciplinas, la revisión normativa y el ejercicio del control técnico, en suma, la gestión integral de la edificación. En consecuencia, el estudio prospectivo del ambiente interior y su calidad es de interés en crecimiento, entre diversas disciplinas de la ciencia, cuyos esfuerzos aunados suponen en diferentes niveles de injerencia político y relevancia social, el garantizar la habitabilidad saludable, y a su vez, desarrollar medidas futuras para superar la actuación arquitectónica de carácter reparadora. Supone en consecuencia la actuación legal, técnica y ética oportuna.

ABSTRACT

Outdoor environmental pollution is on the rise, and has been historically recognized. In contrast, indoor pollution has equivalent behavior, but has only been largely recognized since the middle of the 20th century, i.e., the quality of the space and the environment mostly occupied by human beings needs an integrated approach, since its impact on health has been demonstrated and can lead to problems at a collective level. The epidemiological increase in recent years is due to environmental factors that are among the top three causes of mortality and morbidity in the population. The exaggerated increase in the concentrations of air pollutants derived from different sources, whether anthropogenic or natural, release gases and small particles that seem to be associated with the increase in allergic diseases of the respiratory system (asthma, rhinitis, among others). Therefore, from the architectural perspective, the present research focused on non-industrial spaces, develops the selection and exegetical reading of scientific studies from the area of health, building materials and their relationship through the simulation of computational fluid dynamics using the COMSOL Multiphysics tool. It also includes regulatory analysis in the historical and current sense in Spain, in order to identify design and construction strategies to improve the quality of the indoor environment, and through it, the health of its occupants.

At a global level, it can be said that, the volume of indoor air pollution and its control have different considerations, the flow of pollutants such as CO₂, formaldehyde and PM 2.5 particles characterize the most frequent scenario of indoor spaces, being compounds contained in building materials, which are also included through human activities of restoration and work, and ratify their contribution to the health condition according to exposure. At a specific level it is defined that, the air flows that are handled in the final product to be worked in a given space and selected with various physical and chemical characteristics give results of a sequence determined by the entry of constant air flows that have a certain amount of pressure and direction determined with the location of entry and exit of air in a single position. The trajectories that describe the pollutants and airflow are initially directed to the top of the interior space and then there are visible descents that are determined by the CFD.

Finally, tackling indoor air pollution is a challenge for the professional practice of architecture and other disciplines, the revision of regulations and the exercise of technical control, in short, integrated building management. Consequently, the prospective study of the indoor environment and its quality is of growing interest, among various scientific disciplines, whose combined efforts involve, at different levels of political interference and social relevance, ensuring healthy habitability, and in turn, developing future measures to overcome architectural performance of a remedial nature. Consequently, it implies the appropriate legal, technical and ethical action.

AGRADECIMIENTOS

En mi formación académica y personal se encuentran diversas instituciones, y en particular la Universidad Politécnica de Madrid que a través de su programa doctoral impulsa el desarrollo científico. Pero también existen vidas humanas que se sensibilizan con este proceso de formación y ponen el hombro para que los sueños sean alcanzables a todos y cada uno de ellos, que son incontables. Me es grato coincidir con las personas que contribuyeron en cada proceso de formación y para este particular a todos los que conforma el grupo de investigación en Sostenibilidad en la Construcción y en la Industria.

No vamos solos en este camino truncado en varias ocasiones, pero se hacen muchos más llevaderos gracias a seres humanos que no dejan de creer que la ciencia e investigación sea alcanzable que se demuestra con la materialización y presentación de este aporte.

El viaje que puede ser a través de un barco que recorre diversos océanos que se prepara para soportar diversas tormentas, pues es parte propia del viaje, y es ahí en donde salir a flote es el reto que se enfrenta para cumplir con el objetivo de llegar a buen puerto.

Me gustaría agradecer a todas las personas que contribuyeron en mi crecimiento personal y profesional. A mi director de doctorado, por la oportunidad de aprender de él. Al Comité de Evaluación de la pre defensa, por las sugerencias de mejora que me ayudaron a afinar este documento final.

A mi familia y amigos.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_6H_6	Benceno
CO_2	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
$HCHO (COH_2)$	Formaldehído
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
NH_3	Amoniaco
NO_2	Dióxido de nitrógeno
NO_x	Óxido Nitroso
N_2O	Óxido de nitrógeno
O_3	Ozono
$PM_{2,5}$	Partículas de diámetro 2,5 micras
PM_{10}	Partículas de diámetro 10 micras
$PM_{0,1}$	Partículas de diámetro 0,1 micras (partículas ultrafinas)
PM	Material Particulado
PFC	Perfluororcarburos
Pb	Plomo
Rn	Radón
SF_6	Hexafloruro de azufre
SO_2	Dióxido de azufre

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADN	Ácido desoxirribonucleico
AEMET	Agencia Española de Meteorología
AENOR	Agencia Española de Normalización
AE	Aire Exterior
AI	Aire interior
APHA	American Public Health Association
ASH	<i>Action on Smoking and Health</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BOE	Boletín Oficial del Estado
CAI	Calidad del aire interior
CAE	Calidad del Aire Exterior
CAMS	<i>Copernico Atmosphere Monitoring Sistem</i>
CCRSM	Comité Científico de los Riesgos Sanitarios y Medioambientales
CCTEMA	Comité Científico de Toxicidad, Ecotoxicidad y Medio Ambiente
CEN	Comité Europeo de Nacionalización
CEPMMP	Centro Europeo de Previsiones Meterológicas a Medio Plazo
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIBS	Consejo Internacional de Investigación de Edificios
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
CNES	Centro Nacional de Estudios Espaciales
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
CTE	Código Técnico de la Edificación
EDAC	<i>Evidence based Design Accreditation and Certification</i>
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EE. UU	Estados Unidos
EOEMS	<i>European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE ACRÓNIMOS

ESA	<i>European Space Agency</i>
EUMETSAT	<i>European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
IEE	Instituto de Estadística de España
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
KTH	<i>Royal Institute of Technology</i>
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
MAPA	Ministerio de Agricultura y Pesca
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Ocean and Atmospheric Administration</i>
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
OSH	<i>Occupational Safety and Health</i>
PC	<i>Public Citizen</i>
PBL	<i>Planetary Boundary Layer</i>
RD	Real Decreto
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
SARS CoV	<i>Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus</i>
SCOEL	<i>Scientific Committee on Occupational Exposure Limits</i>
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

CAPÍTULO 01. INTRODUCCION Y MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La calidad del aire interior (CAI) es uno de los principales problemas de salud ambiental en Europa y el planeta (Chiesa, Urgnani, Marzuoli, Finco, & Gerosa, 2019; Pineda Espinoza, García Alvear, Astudillo Alemán, & Vázquez Freire, 2015), (Clerbaux, Coheur, Scharf, & Hurtmans, 2009; Isiugo *et al.*, 2019). Al respecto, investigadores de las ciencias de la salud ambiental recopilaron datos de patrones de exposición y salud en la década de los 80s (Klepeis *et al.*, 2001) para determinar que el 86,9 % de la vida se desarrolla en ambientes interiores como en viviendas, oficinas, escuelas, entre otros. Esta dilatada permanencia ha derivado en problemas para la salud, que afectan al sistema respiratorio con consecuencias graves ocasionando morbilidad y mortandad (Wang, 2018). Al ser la tercera causa de muerte en la lista de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), la OMS revela que, 4 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades atribuibles a la contaminación del aire interior (OMS, 2016), e incluso este valor se ha duplicado según lo reportado en 2009. Afectan a grupos vulnerables como niños, personas mayores, mujeres embarazadas y personas con enfermedades preexistentes (*European Environment Agency*, 2019).

Al revisar la historia de la calidad del aire (Sundell, 2004) se reitera que el aire interior es un tema que llama la atención de manera permanente, con lo cual cada vez existen más estudios que dan cuenta de ello (Schneider *et al.*, 2003; Tang *et al.*, 2009; Ayyagari, Januszkiewicz, & Nath, 2004; Cao *et al.*, 2019; Ruiz Bautista, 2019). Más de 4300 ciudades en 108 países han incrementado las mediciones de calidad ambiental y acogen medidas para reducir las condiciones desfavorables (Adhanom, 2018). La contaminación ambiental interior se encuentra en aumento, diversas fuentes interiores conforman su deterioro, entre ellos los materiales de construcción que conforman los ambientes interiores, que se posicionan como factores de deterioro de la salud, y la larga permanencia del ser humano acentúa lo previo. Desde la perspectiva arquitectónica, y con la visión de exponer tales particulares se recurre a la revisión sistemática de estudios del área de la salud conforme experiencias internacionales y normativa técnica. En consecuencia, se determina que, la

inobservancia y la obsolescencia en los procesos de planificación y construcción provocan el uso de materiales en elementos arquitectónicos principales (aislantes térmicos, muros, suelos, techos e instalaciones) fibras textiles, naturales, minerales, orgánicas, de carbón y micro plástico, y secundarios (acabados en general) que emiten de manera imperceptible formaldehídos, compuestos orgánicos volátiles, provenientes de la naturaleza por su ubicación geográfica como los gases radón, entre otros gases.

1.2 Capa límite de análisis

Un espacio dinámico de interacción entre los materiales presentes a nivel de traza y las acciones antropogénicas, es la atmósfera y en especial la tropósfera. Por lo tanto, es altamente sensible a los procesos biogeoquímicos de la biosfera y especialmente a las perturbaciones antropogénicas (Klaassen & Watkins, 1999). No en vano, las primeras evidencias experimentales de los cambios de composición de la biosfera durante el Antropoceno vinieron de medidas del contenido de CO₂ y ozono en series temporales en la baja atmósfera.

Esta interacción genera diversos intercambios a nivel de calidad de aire, con ello implicaciones en la salud humana y problemas severos para el sistema respiratorio debido al aporte del 40 % de contaminantes que emiten los materiales de construcción, completado por las deficiencias de ventilación, las fuentes exteriores, y el CO₂ producido por el ser humano en el proceso de respiración. A nivel objetivo, la salud está sostenida por el equilibrio de las potencias (*isonomíā tōn dýnamēōn*): lo húmedo y lo seco, lo frío y lo cálido (Entralgo, 1978), descrito en el filo de los siglos VI y V a.C. por Alcmeón. El desequilibrio se ocasiona por exceso o faltante de cualquiera de las variables (frío o calor) generan enfermedades. Por tanto, uno de los sistemas principales que se requieren para el correcto desarrollo fisiológico del ser humano es el respiratorio, que se encuentra en contacto directo con diversos agentes patógenos producidos por el desequilibrio anunciado. Es considerable demarcar el espacio de análisis y la referencia con el ser humano. Tenemos una relación directa de la complejidad del ambiente urbano, meteorología urbana, la contaminación del aire en escalas diversas, que determinan características con variables en tiempo y espacio. Estas variables son cambios en vías de dispersión de los contaminantes, locales y regionales, determinan patrones temporales y espaciales de composición

atmosférica en zonas urbanas. Importante reconocer lo complejo que es el ambiente urbano, por tanto, es útil mirar las relaciones entre la meteorología urbana y la contaminación del aire en una variedad de diferentes escalas. Las concentraciones de contaminantes del aire están determinadas principalmente por el equilibrio entre las tasas de emisiones y la capacidad de la atmósfera para transportar y dispersar los contaminantes (Martínez C, 2019).

Escala temporales y espaciales afectan la dispersión atmosférica en el medio urbano. Se determinan entonces escalas que van desde el componente urbano (edificios individuales) y los espacios de las calles en su composición con el total de la ciudad, la turbulencia mecánica y térmica a microescala domina procesos de dispersión locales. Para ejemplo de variación de procesos de dispersión se puede encontrar en la información entregada por diversos programas satelitales como es el caso CAMS/Copernicus/EC + ECMWF, que informa de manera permanente el estado de la calidad del aire y varios componentes más (Figura 1.1).

El planeta ha reducido sus actividades por temas de salud debido al virus SARS CoV-2, la gráfica corresponde a las fechas indicadas y se identifica las trayectorias de las partículas PM₁ y los datos son obtenidos de los programas CAMS/Copernicus/EC + ECMWF, valores máximos 112 µg/m³.

Figura 1.1 Variación geográfica en la calidad del aire urbano a nivel global Fuente: <https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/patterson>
Consultado 20/04/05, hora:11:27 am. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

En ello se puede elaborar información a nivel 1000 hPa, la variación en la calidad del aire a esta altura en donde se representa el material particulado (PM_{10}) y las concentraciones mayores cercanos a la India y China.

En particular podemos observar un ambiente con menos concentración de contaminantes, pues se debe a la suspensión de actividades ocasionadas por la presencia del SARS CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus*) o COVID-19 (Coronavirus 2019) que mantiene a la población bajo confinamiento desde finales del 2019. En las Figuras 1.1 y 1.2 se puede observar los valores máximos de $112\mu g/m^3$ a $364\mu g/m^3$ del material particulado, diferencia que es producida por los días posteriores al confinamiento y con fechas actuales se incrementan los valores de contaminación por acciones propias antrópicas y que afectan a la población mundial, adicionalmente se observa de manera similar que las altas concentraciones corresponden a los países como India y China.

Figura 1.2 Variación geográfica en la calidad del aire urbano a nivel global Fuente:
<https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm10/patterson>
Consultado 20/11/28, hora:11:00 am. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020

Por otra parte, la concentración de contaminantes por efecto de las emisiones del tráfico local generando la denominada contaminación de fondo que entra en el cañón de la calle desde la parte superior a nivel de cubiertas (Harrison *et al.*, 2009). Con ello se enfoca a delimitar el área de análisis en la atmósfera e identificar diferentes escalas de movimientos (Figura 1.3), como son; microescala, mesoescala y macroescala, que también se denominan comúnmente escalas locales, regionales y mundiales (Arya, 2001). Para este caso, se basa en el análisis de la micrometeorología que, se ocupa de procesos más pequeños de la troposfera. Esta se centra en los fenómenos dados en la capa atmosférica más cercana a la superficie terrestre, conocida como la Capa Límite Planetaria (PBL). El espesor de esta capa contiene diferentes variables en tiempo y espacio como consecuencia de su dependencia de varios factores como la fuerza del viento, la rugosidad de la superficie o el calentamiento y enfriamiento de la superficie (Stull, 1988). El grosor del PBL es bastante variable en tiempo y espacio debido a su total dependencia de varios factores como la fuerza del viento, la rugosidad de la superficie o el calentamiento y enfriamiento de la superficie (Stull, 1988), a escalas diferentes que inicia en condiciones climáticas sinópticas, que considera altas y bajas presiones en un equilibrio de energía de la superficie terrestre con interacción de las capas más bajas (Arya, 2001).

Figura 1.3 Flujo y la dispersión dentro de un cañón callejero. Fuente: Hertel & Goodsite 2009.
Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Figura 1.4 Escalas de la capa límite urbana. Fuente: Modificado de Oke 1997.

Adicionalmente, este grosor puede variar dependiendo de la topografía o la utilización de esta, en la superficie de la tierra que depende del gran número de edificaciones que estructuran una ciudad y según su variabilidad incrementan considerablemente la rugosidad de la superficie (alteran el aparente equilibrio energético de la superficie) conocida como capa límite urbana (CLU). En la Figura 1.4 se indica una sección de las CLU, que se subdivide en la capa de mezcla y la capa de superficie. Una subcapa inercial se forma en esta última y la capa de rugosidad propiamente dicha se encuentra en la capa de cubierta urbana. En esta zona la velocidad de escala es la llamada velocidad de fricción (u_*) relacionado con el arrastre de la superficie a través de $\tau_0/\rho \equiv u_*^2$. El calor cinemático de la superficie ($H_0/\rho C_p$) que se puede expresar como $H_0/\rho C_p \equiv u_*/\theta_*$, Donde θ_* es la temperatura de escala; H_0 el sensible flujo de calor en la superficie; ρ , la densidad del aire C_p el calor específico a presión constante. En consecuencia, el parámetro de estabilidad z/L se calcula en la escala de longitudes L conocida como la longitud de Monin-Obukhov, que se denota de la siguiente manera:

$$L = -\frac{u_*^3}{k(g/T_0)(H_0/\rho C_p)} \quad (1.1)$$

Con estos valores se pueden determinar el accionar de las temperaturas de escala, densidades del aire con el calor específico a presión constante que al actuar en una

zona urbana y por la ubicación de los edificios en zonas urbanas direcciona a los movimientos en la CLU se mantengan en régimen de flujo turbulento. Es de considerar que un aire urbano en el entorno, que interactúa el ser humano, contiene mezclas complejas entre partículas de tamaños diversos y la composición química (Adán & Huber, 2011). El tamaño de las partículas es fundamental que determina el desarrollo futuro de la atmósfera, así como las afecciones en la salud humana en el sistema respiratorio.

Para el caso de las partículas $PM_{2.5}$ se puede obtener otra variación de procesos de dispersión que de manera similar se puede encontrar en la información entregada por los programas satelitales como es el caso CAMS/Copernicus/EC + ECMWF que, al ser revisadas a una altura de 10 hPa, indican una diferencia considerable de acción del viento y más elementos. Con fechas diferentes de análisis se puede observar con claridad que las acciones antropogénicas aumentan considerablemente los valores de las partículas $PM_{2.5}$ y se mantienen en las zonas cercanas a la India y China (Figuras 1.5 y 1.6).

Figura 1.5 Variación geográfica en la calidad del aire urbano de ciudades seleccionadas alrededor del mundo.
 Fuente: <https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/patterson>
 Consultado 20/04/05, hora:11:46 am. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

El planeta ha incrementado sus actividades por temas de salud debido al virus SARS CoV-2, la grafica corresponde a las fechas indicadas y se identifica las trayectorias de las partículas $PM_{2,5}$ y los datos son obtenidos de los programas CAMS/Copernicus/EC + ECMWF. Se puede observar que en fechas posteriores existe un incremento considerable de las concentraciones de las partículas $PM_{2,5}$, debido al incremento de actividades antropogénicas. Los valores máximos son $1004 \mu g/m^3$

Figura 1.6 Variación geográfica en la calidad del aire urbano de ciudades seleccionadas alrededor del mundo.
Fuente: <https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/patterson>
Consultado 20/04/05, hora:11:46 am. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

1.3 Sucesos de contaminación del aire interior

La antropología humana se desarrolla en un hábitat que mejora constantemente, y desde las cuevas hasta la actualidad el riesgo de enfermedades es múltiples y para los contaminantes que se enmarcan en esta investigación se enfoca a las afecciones respiratorias del ser humano. Para ello, la salud humana es tratada desde tiempos inmemorables, y corresponde mantener un equilibrio de factores que modifique su estado. Desde que el ser humano existe sobre la superficie de la Tierra ha padecido enfermedades.

Bastaría el hecho de que todos los animales – más ampliamente, todos los seres vivos- pueden enfermar y alguna vez enferman, para admitir sin la menor vacilación el aserto precedente; pero los múltiples datos de observación que constituyen los capítulos iniciales de la historia de la medicina, la paleopatología, otorgan un

indiscutible fundamento real a lo que sin ellos no pasaría de ser una plausible conjetura. Como el hombre antiguo enfrentó las afecciones patológicas no lo sabemos, frente a ello queda extrapolar a la prehistoria, lo que hoy mismo hacen los grupos humanos es generar información que genere evidencias científicas y poder aprender de ello. Es claro notar que, el ser humano busca mejorar su entorno inmediato, las condiciones térmicas y que a través de la invención del fuego se inician los problemas de contaminación interior generadas por el propio ser humano.

Llevar el fuego a un espacio interior y cerrado, implica abrir un agujero, ya sea por la necesidad de ventilación o por la necesidad de que este se pudiera mantener encendido (Rey Martínez & Ceña Callejo, 2006). Más de la mitad de la ingesta del cuerpo durante toda la vida es aire inhalado en el hogar. Por lo tanto, la mayoría de las enfermedades de índole respiratoria relacionadas con exposiciones ambientales provienen de la exposición al aire interior, con marcadas influencias de su entorno.

1.4 Monitoreo y gestión de calidad del aire

La gestión de la calidad del aire y la agenda de desarrollo sostenible se sostienen bajo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Sachs *et al.*, 2019). Para su gestión y puntualmente el ODS 3ro, que plantea reducir sustancialmente los casos de mortalidad, mortandad y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y suelo. Aunque en la actualidad la humanidad atraviesa una pandemia que se transmite vía aérea, como es el SARS CoV-2 que ha incrementado la tasa de mortandad, desde el pasado 23 de junio hasta el 22 de agosto de 2020, el número de casos y muertes en todo el mundo ha aumentado en un 158 % (~14 millones de casos adicionales) y un 72 % (>300.000 muertes adicionales). Esta es la tasa de mortalidad atribuible a la contaminación del aire en las viviendas y ambiental en el exterior. Un soporte adicional a la gestión del aire es el ODS 7mo, que plantea energía asequible y no contaminante que garantiza un acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, que proporcionen a la población combustibles y tecnologías limpias (O. OMS, 2016). La PBL y la contaminación de fondo de manera de cañón de la calle se sostienen en otro ODS como el onceavo de ciudades comunidades sostenibles, que plantea reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, con especial atención a la calidad del aire y gestión de los desechos municipales, con el control de niveles

promedios anuales de las partículas finas PM_{2,5} y PM₁₀ en las ciudades (O. OMS, 2016). Por su parte, el monitoreo es un proceso que contabiliza los contaminantes del aire exterior, a través de varios proyectos de entidades y grupos de científicos que utilizan satélites espaciales para analizar, contabilizar y comprobar el estado de contaminación exterior, (W. Tang *et al.*, 2018). Tal es el caso del Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copérnico (CAMS) y el Servicio de Cambio Climático de Copérnico a cargo de Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPMMP), *European Organization for the Exploration of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). Los socios del proyecto *Copernicus Sentinel-6* - ESA, la Comisión Europea, NASA, NOAA, Airbus y CNES trabajan en cooperación internacional (*ESA - Call for Media: Last Glimpse of the Sentinel-6 Satellite*, n.d.). La información que generan está en línea y se puede acceder para realizar diferentes análisis (Stauffer *et al.*, 2019). Pero como se indica son para contaminantes del aire exterior que son útiles para el análisis de la investigación pues son considerados como una fuente de contaminantes del aire interior, pero la monitorización del aire interior y sus normativas son escasas y en algunos casos inexistentes.

1.5 Planteamiento del problema

La creación de un ambiente interior a través de una planificación arquitectónica, demanda un conocimiento de materiales, estos en un gran porcentaje contienen contaminantes que se desprenden con el pasar del tiempo que generan problemas respiratorios severos (Reingruber & Pontel, 2018a); (Fan *et al.*, 2018); (Spiru & Simona, 2017a); (Ranzani *et al.*, 2020). La poca preocupación por el monitoreo interno y las normativas, trasladan ese problema a la población haciéndolo personal y no de las autoridades (Le Bourhis, 2019). El tratamiento público de los problemas relacionados con la contaminación del aire interior revela directrices hacia la rendición de cuentas individual e intentos paralelos incompletos.

Ante la situación de vulnerabilidad de la salud humana ocurrida por efectos del virus SARVS CoV-2 (Qi *et al.*, 2020), precisa a un confinamiento de la población global para evitar el contagio del mencionado virus. El confinamiento hace que la estancia en un ambiente interior se prolongue y sea del 100 % del tiempo, con lo cual las investigaciones que reflejan las afecciones de los contaminantes en un ambiente interior se intensifican y los datos se podrán reflejar a futuro. Los problemas de salud

en un ambiente interior que no cuenta con una ventilación adecuada, o equipos mecánicos ya sea de calefacción o renovaciones de aire. Si el peligro relacionado con las exposiciones interiores está en el conjunto mejor reconocido, el debate sigue sobre la parte que debe volver al control y a los medios individuales de protección, o a la inversa a las intervenciones y la atención colectiva, en particular a través de regulaciones relativas a los contaminantes o prácticas de que se trate. Desde este punto de vista, la calidad del aire en interiores está cerca de otros problemas de salud pública, como el tabaquismo o la obesidad, para los que también se plantea la cuestión de la autonomía de las prácticas y del papel vinculante del poder público.

1.6 Referencias

- Adán, A., & Huber, D. (2011). Análisis de datos 3D para generación automática de modelos BIM de interiores habitados. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 8(4), 357–370.
<https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.010>
- Arya, S. P. (2001). Introduction to Micrometeorology. In R. Dmowska, J. Holton, & T. Rossby (Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Second Edi, Vol. 79, Issue 9).
- Ayyagari, V. N., Januszkiewicz, A., & Nath, J. (2004). Pro-inflammatory responses of human bronchial epithelial cells to acute nitrogen dioxide exposure. *Toxicology*, 197(2), 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2003.12.017>
- Calidad del aire interior. (2011).
https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/contaminacion-aire-interior/index.htm
- Cao, Z., Wang, M., Chen, Q., Zhu, C., Jie, J., Li, X., Dong, X., Miao, Z., Shen, M., & Bu, Q. (2019). Spatial, seasonal and particle size dependent variations of PAH contamination in indoor dust and the corresponding human health risk. *Science of the Total Environment*, 653, 423–430.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.413>
- Chiesa, M., Urgnani, R., Marzuoli, R., Finco, A., & Gerosa, G. (2019). Site- and house-specific and meteorological factors influencing exchange of particles between outdoor and indoor domestic environments. *Building and Environment*, 160(May). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106181>
- Clerbaux, C., Coheur, P., Scharf, O., & Hurtmans, D. (2009). The potential of MTG-IRS and S4-TIR to detect high pollution events at urban and regional scales. In *Carbon* (Issue December 2008).
- Entralgo, P. L. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. SALVAT EDITORES (Ed.); Primera ed). file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf
- ESA - Call for Media: Last glimpse of the Sentinel-6 satellite. (n.d.). Retrieved January 22, 2020, from

- https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Call_for_Media_Last_glimpse_of_the_Sentinel-6_satellite
- European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe. In EEA Report No 4/2012 (Issue 9). <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>
- Fan, Y., Deng, C., Zhang, X., Li, F., Wang, X., & Qiao, L. (2018). Numerical study of CO₂-enhanced coalbed methane recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 76(June), 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.016>
- Harrison, R. M., Delgado-saborit, J. M., Baker, S. J., Aquilina, N., Meddings, C., Harrad, S., Matthews, I., Vardoulakis, S., & Ross Anderson, H. (2009). Measurement and Modeling of Exposure to Selected Air Toxics for Health Effects Studies and Verification by Biomarkers. In *Health Effects Institute* (Issue 143). https://www.researchgate.net/publication/40648065_Measurement_and_modeling_of_exposure_to_selected_air_toxics_for_health_effects_studies_and_verification_by_biomarkers/link/00b7d5194d22cead35000000/download
- Isiugo, K., Jandarov, R., Cox, J., Ryan, P., Newman, N., Grinshpun, S. A., Indugula, R., Vesper, S., & Reponen, T. (2019). Indoor particulate matter and lung function in children. *Science of the Total Environment*, 663, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.309>
- Klaassen, K. D., & Watkins, J. B. (1385). *Manual de Toxicología*. http://www.ghbook.ir/index.php?name=های رسانه و فرهنگ&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chckhash=k=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Martínez C, G. (2019). Análisis meteorológico en la mar. In U. Ediciones (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (1998th ed., Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas. (n.d.). Retrieved January 16, 2020, from <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- OMS, O. (2016). Hoja de ruta del programa de calidad del aire de la OPS/OMS. https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=guias-9833&alias=45330-hoja-ruta-calidad-aire-ops-oms-agenda-estrategica-inclusion-salud-gestion-calidad-aire-2018-330&Itemid=270&lang=es
- Pineda Espinoza, C., García Alvear, N., Astudillo Alemán, A., & Vázquez Freire, V. (2015). Quantification of the particulate matter in the work environment of the production sector in Cuenca-Ecuador. *Revista Latinoamericana El*

- Ambiente y Las Ciencias, 6(14), 70–83.
- Rey Martínez, F. J., & Ceña Callejo, R. (2006). Edificos saludables para trabajadores sanos, calidad de ambientes interiores.
- Ruiz Bautista, L. (2019). Cardiovascular impact of PM_{2.5} from the emissions of coal-fired power plants in Spain during 2014. *Medicina Clinica*, 153(3), 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2018.11.017>
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(9), 805–814. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- Schneider, T., Sundell, J., Bischof, W., Bohgard, M., Cherrie, J. W., Clausen, P. A., Dreborg, S., Kildesø, J., Kjærgaard, S. K., Løvik, M., Pasanen, P., & Skyberg, K. (2003). “EUROPART”. Airborne particles in the indoor environment. A European interdisciplinary review of scientific evidence on associations between exposure to particles in buildings and health effects. *Indoor Air*, 13(1), 38–48. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.02025.x>
- Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Oman, L. D., & Strahan, S. E. (2019). The Effects of a 1998 Observing System Change on MERRA-2-Based Ozone Profile Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 3(2018), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2019JD030257>
- Stull, R. B. (1988). AN INTRODUCTION TO BOUNDARY LAYER METEOROLOGY.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air, Supplement*, 14(SUPPL. 7), 51–58. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Tang, W., Arellano, A. F., DiGangi, J. P., Choi, Y., Diskin, G. S., Agustí-Panareda, A., Parrington, M., Massart, S., Gaubert, B., Lee, Y., Kim, D., Jung, J., Hong, J., Hong, J.-W., Kanaya, Y., Lee, M., Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Flynn, J. H., & Woo, J.-H. (2018). Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 11007–11030. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11007-2018>

CAPÍTULO 02. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Introducción

Modelar un ambiente interior y la calidad del aire con una resolución que permita visualizar los contaminantes peligrosos para la salud es una necesidad creciente. La resolución que proporciona las simulaciones de CFD determina predicciones detalladas y son aportes para la comunidad científica que son validadas a través de modelos matemáticos. La resolución espacial de las simulaciones de *Computacional Fluid Dynamics* (CFD) proporciona mapas detallados que se validan en las ubicaciones de las mediciones.

Las diversas concentraciones que se pueden identificar pueden servir para disminuir los niveles de concentración que se encuentran en el interior de un ambiente interior. Por lo tanto, la importancia de los procesos más relevantes en la dispersión de contaminantes ha sido ampliamente estudiada, efectos térmicos, reacciones químicas, configuraciones de calles, emisiones de tráfico y meteorológicas.

2.2 Objetivo principal

Mejorar la calidad del aire interior mediante la identificación de flujos de contaminación interior de CO₂, HCHO, PM_{2.5} a través de las herramientas computacionales de dinámica de fluidos (CFD).

2.3 Objetivos específicos

- 01. Identificar las afecciones a la salud humana que producen los contaminantes de un ambiente interior, para crear evidencias que aporten a las propuestas de ventilación o absorción.
- 02. Recopilar las normativas españolas e internacionales en función de la calidad del aire interior para aplicaciones en proyectos arquitectónicos.
- 03. Identificar materiales de construcción que conforman un ambiente interior para el análisis de emisión de contaminantes que lo constituyen.
- 04. Identificar las características físicas y químicas de los contaminantes para generar evidencias para el programa de simulación.

-
- 05. Conocer los programas de simulación para marcar evidencia de su uso y aplicación.
 - 06. Identificar las trayectorias bajo las consideraciones de flujo laminar para el aire y contaminantes analizados.

CAPÍTULO 03. MATERIALIADAD CONSTRUCTIVA: RELACIÓN ARQUITECTURA - SALUD EN UN AMBIENTE INTERIOR

3.1 Introducción

La calidad del aire interior (CAI) es uno de los principales problemas de salud ambiental a nivel mundial (Chiesa et al., 2019; Clerboux *et al.*, 2009). Al revisar la historia asociada (Sundell, 2004) se reitera que el aire interior es un tema que llama la atención de manera permanente. Análisis médicos (Entralgo Laín, 1978) y arqueológicos (1800 a.C.) definen diversas enfermedades que se acentuaron en la antigüedad, incluyen afecciones al sistema respiratorio ocasionadas por la combustión de madera y polvo mineral (Sáez, 2017). A partir de ello se evidencia que un ambiente interior (AI) dentro de un refugio está más contaminado por fuentes internas como las actividades que desarrollan los seres humanos, los fuegos abiertos (que en la actualidad constituyen una fuente importante de contaminación del aire interior en muchas regiones), y los materiales de construcción del refugio (Sundell, 2004) que cumplen la función de hermeticidad. Desde hace más de dos mil años, los fuegos abiertos producidos por la fabricación de cerveza en la antigua Roma fueron reconocidos como detrimento a la salud humana, con ello también se datan las primeras normas para el control de la contaminación del aire (Querol *et al.*, 2012).

Actualmente los refugios han evolucionado con diversos materiales de construcción que constituyen, y ya no solo definen el de tipo residencia, sino otros vinculados a la producción e intercambio como las oficinas, edificios públicos (colegios, hospitales, teatros, restaurantes, entre otros). Con esta referencia se delimita el campo de análisis de la presente investigación, excluyendo los espacios industriales. Al respecto en Estados Unidos, investigadores de las ciencias de la salud ambiental recopilaron datos de patrones de exposición y salud en la década de los 80s (Klepeis *et al.*, 2001); determinan que el 86,9 % de la vida se desarrolla en ambientes interiores como viviendas, oficinas, escuelas y otros.

En la actualidad, debido a los efectos del virus SARS-CoV2 la permanencia en un ambiente interior se ha incrementado notablemente. Esta dilatada permanencia

deriva en problemas que afectan al sistema respiratorio con consecuencias graves ocasionando morbilidad y mortandad (Wang, 2018).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) (Contaminación Del Aire de Interiores y Salud, n.d.) determina que 4 millones de personas sucumben prematuramente por enfermedades atribuibles a la contaminación del aire interior. Este valor se ha duplicado según lo reportado en 2009. Afecta a grupos vulnerables como niños, personas mayores, mujeres embarazadas y personas con enfermedades preexistentes (*European Environment Agency*, 2019). Enfermedades como la neumonía, accidentes cerebrovasculares, cardiopatía isquémica, neumopatía obstructiva crónica y el cáncer al pulmón son atribuibles a la contaminación de un ambiente interior por el uso de combustibles sólidos ineficientes (Contaminación Del Aire de Interiores y Salud, n.d.). Los investigadores centran sobre la problemática y afecciones de la salud sobre la deficiente calidad del aire interior que dan cuenta de ello (Schneider et al., 2003); (X. Tang et al., 2009) (Ayyagari et al., 2004); (Cao et al., 2019); (Ruiz Bautista, 2019). De hecho, más de 43 mil ciudades en 108 países alrededor del mundo han incrementado las mediciones de calidad ambiental y acogen medidas para reducir las condiciones desfavorables (Adhanom, 2018).

Desde la perspectiva arquitectónica se realiza un análisis de diferentes fuentes de emisión de contaminantes y se manifiesta una extensiva cantidad de información referente a la calidad del aire interior y los efectos negativos a la salud humana producidos por la materialidad constructiva. De ello, se plantea una metodología que da cuenta de las acciones regulatorias, enfermedades nuevas, sistemas de monitorización y responsabilidades al momento de ejecutar un proyecto arquitectónico en obra nueva o intervención de una ya existente, y efectos de evidencias arquitectónicas para una mejora en aspectos de salud.

3.2 Generalidades de un ambiente interior

Al mirar la arquitectura en su concepción, alcanza un accionar científico, sin embargo, al relacionarlo con la salud, se amplía al colectivo humano por su permanencia en un ambiente interior. Bajo esta lógica, la articulación entre estos sectores supone una revisión crítica de los puntos clave en común, que se direcciona al análisis de las diversas afecciones a la salud que ocasiona un ambiente interior. Tal argumentación se sostiene en la descripción de los recursos que atraviesan a cada

uno a partir de tres segmentos: a) la concepción de un ambiente interior y su regulación, b) la determinación de las fuentes de contaminación y, c) la identificación de las partículas que se desprenden de los materiales de construcción. Cada segmento constituye un ambiente interior (caja estática) en la que las transformaciones físicas y químicas de los contaminantes del aire interior se encuentran en movimiento, que buscan ser identificadas en el proceso de esta investigación.

3.2.1 Concepción de un ambiente interior y su normativa

Reflexionar sobre la interacción entre el diseño de los edificios y la salud está en creciente interés (Jackson & Cummins, 2001). La creación de un ambiente interior parte en primera instancia del desarrollo de un proyecto arquitectónico, casi siempre bajo la visión de la obra nueva, el conocimiento del sitio, la materialidad y las normas de edificación que enmarcan un conjunto coherente de procesos con múltiples criterios.

En segunda instancia se considera la recuperación o rehabilitación de preexistencias arquitectónicas conforme a las aspiraciones de la sostenibilidad y el bajo consumo energético. Sobre el primer escenario conviene indicar que la concepción del diseño de edificios parte desde una perspectiva estética, estructural y funcional. Perfila su concreción con la materialización y construcción como actividad específica y complementaria (Piñon, 2006), generalmente vinculada a estilos y valores de forma según su ámbito geográfico. Estas características de materiales del diseño crean exposiciones adicionales que pueden contribuir a la salud y al confort (iluminación, calefacción, ergonomía, ruido y otros). Algunos de estos factores también pueden desempeñar un papel en los efectos crónicos sobre la salud (Figura 2.1).

Es decir, un ambiente interior define relaciones de los componentes materiales e implica criterios de funcionalidad, economía, armonía y equilibrio medioambiental (Graham *et al.*, 2018). Por otro lado, desde la concepción estructural y funcional se plantea el máximo rendimiento espacial y mejores prestaciones de soporte de cargas propias y uso del edificio. Por tanto, ninguna consideración es independiente de otra, ya sea en planificación o construcción material. De hecho, un ambiente interior genera diversas condiciones ambientales, y se planifica a través del estudio ergonómico que lo hace seguro y eficaz para el desarrollo de cualquier actividad humana (I. Leirós, 2009). Por su parte, las normativas de edificación rigen

particularmente cada región, estado, ciudad o país. Excepcionalmente se puede optar por una regulación denominada documentación internacional avalada por la UNESCO u otras entidades de carácter consultivo, es aplicable en un marco geográfico superior capaz de regir a nivel global.

Por lo demás, como en el caso de España, la Ley 38/1999 de 5 noviembre de Ordenación de la Edificación, abarca aspectos de funcionalidad, seguridad y habitabilidad de los edificios. Incluye términos de higiene y salud aceptables en un ambiente interior y su cumplimiento requiere diversos estudios de materialidad, estructurales (Basta et al., 2020), sistemas contraincendios, eléctricos y sanitarios, ventilación, protección contra el ruido, aislamiento térmico y otros. El objetivo es regular los procesos de la edificación, fijando obligaciones y responsabilidades, que actualizan y complementan la configuración legal de los agentes que intervienen para cubrir garantías a los usuarios, en base a una definición de los requisitos básicos que deben satisfacer los edificios. Los efectos sobre la salud se consideran una cuestión externa a las políticas de vivienda y construcción, y con demasiada frecuencia se ignoran. Es por ello que, considerar los aspectos normativos en la concepción de un ambiente interior prevé acciones patológicas de materiales entendidas desde el ámbito de salud y supone reforzar la normativa de calidad del aire interior.

3.3 Determinación de las fuentes de contaminación

Estudios del aire interior han demostrado que la concentración de agentes está en función de la concentración exterior, de las emisiones de la fuente interior, la capacidad de eliminación (ventilación), la acumulación dentro del edificio, la mezcla interior y las reacciones químicas (Figura 3.1). Ello describe a tres fuentes como las principales de contaminación; a) fuentes externas naturales y antropogénicas (Schultz, 2014), b) fuentes interiores, y c) las deficiencias de la renovación del aire (23).

3.3.1 Fuentes externas naturales y antropogénicas

La contaminación del aire interior generada a través de acciones antrópicas y la naturaleza (Schultz, 2014) arrastran sustancias gaseosas en forma de partículas de

una región a otra (*Air quality*| *Copernicus* n.d.), de un país a otro, e incluso de un continente a otro que constituye un sistema dinámico de cambios constantes de diversos procesos físicos y químicos. Es decir, el origen de tales contaminantes es diverso y complejo a causa de la meteorología y la fotoquímica (Mitchell *et al.*, 2007).

Figura 3.1: Trayectoria del entorno construido a los efectos sobre la salud. Fuente: Wu, Jacobs, Mitchell, Miller & Karol 2007. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

El consumo de combustible fósil, la agricultura forestal, la producción industrial y la contaminación natural son las fuentes exteriores que afectan gravemente la calidad del aire exterior. La acción antropogénica a considerarse fuertemente es el sector de la construcción representan el 40 % de las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía global (*Global Alliance for Buildings and Construction*, 2018). Varias acciones para reducir la contaminación ambiental deben empezar por

quienes planifican los diversos proyectos arquitectónicos y amplían los conocimientos del origen de materiales de construcción.

El 60 % restante de la contaminación se genera a través de la minería y sus procesos, consumo de combustible fósiles, agricultura forestal, producción industrial y la contaminación natural (Tabla 3.1). Por su parte, los contaminantes mayoritarios son las partículas (PM), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃), que en concentraciones significativas derivan en procesos adversos a la salud con afecciones comprobadas. La naturaleza también aporta a la contaminación ambiental, ya por la emisión de O₃, NO₂, partículas ultrafinas (PM_{2.5} y PM₁₀), radón (Rn) (Tabla 3.1).

Ejemplos de eventos naturales contaminantes son las erupciones volcánicas del Sangay (Ecuador, 2019) o el Taal (Filipinas, 2020). Incluso insectos y vegetación como el Pinus coetano monoespecífico, la hembra fecundada del Pinus nigra y el Pinus Pinaster emiten compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Herrero Uceda, 2007). A partir del 2005, el monitoreo de la calidad ambiental se intensifica, ya que la relación de la mala CAE o aire urbano, y la salud pública evidencian incrementos entre el 3 y 9 % de mortalidad por enfermedades cardiopulmonares, cáncer de pulmón (Espinoza Molina & Palacios Espinoza, 2013) y otras.

Desde la perspectiva científica se ha puesto en marcha varios proyectos de monitorización con satélites espaciales para analizar, contabilizar y comprobar el estado de contaminación exterior (Alvarado *et al.*, 2019; W. Tang *et al.*, 2018). Los resultados recientes demuestran la incidencia de los niveles de dióxido de nitrógeno (NO₂) como factor contribuyente a la fatalidad del coronavirus (SARS-CoV2) (Ogen, 2020). Para su consecución se utilizaron los datos para la concentración de NO₂ en la troposfera (desde la superficie hasta ~10 km) provenientes del satélite espacial *Sentinel-5* Precursor (resolución espacial de 5,5 km) bajo el programa *Copernicus Sentinel-6* - ESA. En Europa el Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copérnico (CAMS) y el Servicio de Cambio Climático de Copérnico están a cargo de Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPMMP), *European Organization for the Exploration of Meteorological Satellites* (EUMETSAT), y a nivel global la Comisión Europea, NASA, NOAA, Airbus y CNES, quienes trabajan conjuntamente para el monitoreo de diferentes contaminantes del aire exterior (*ESA - Call for Media: Last Glimpse of the Sentinel-6 Satellite*, n.d.). En menor escala, el

Fuente	Contaminantes exteriores	Monitoreo	Fuente	Contaminantes interiores	Monitoreo
Minería y procesamiento de minerales.	Metales pesados, químicos a través de cianuro y ácidos, productos de hidrocarburos resultantes de derrames y minería de carbón, y sales metálicas	Korus ap, NASA CAMS, EUMETSAT entre otras.	Consumo	Químicos residenciales y comerciales, pesticidas, fertilizantes, hidrocarburos, solventes, surfactantes, pinturas, selladores, productos farmacéuticos y para el cuidado personal, compuestos orgánicos volátiles, resinas, plásticos, metales, sales, ácidos y bases, nanoplástico.	Bajo la norma UNE 171330-3_2008
Consumo de combustible fósil	Dióxido de azufre, dióxido de carbono, óxido nítrico, ozono, ácidos, hidrocarburos aromáticos polícíclicos y compuestos orgánicos volátiles, micropartículas PM _{2,5} , PM ₁₀ , partículas ultrafinas.	Korus ap, NASA CAMS, EUMETSAT entre otras.	Respiración humana	Dióxido de carbono, vapor de agua, fumar, microorganismos.	Bajo la norma UNE 171330-3_2008
Agricultura forestal	Pesticidas, nitratos, fosfatos, gases de efecto invernadero y sales minerales. Numerosos compuestos orgánicos e inorgánicos sintéticos, organoclorados, dioxinas, metales pesados, hidrocarburos, fenoles clorados, sulfatos, sulfuros, tensioactivos, solventes, ácidos, bases, sales, productos farmacéuticos, plásticos, resinas, explosivos y orgánicos naturales, asbesto, formaldehído, fibra de vidrio.	Korus ap, NASA CAMS, EUMETSAT entre otras.	Mascotas	Dióxido de carbono, microorganismo.	Bajo la norma UNE 171330-3_2008
Producción industrial					
Contaminación natural	Ozono, dióxido de nitrógeno, micropartículas PM _{2,5} , PM ₁₀ , partículas ultrafinas, radón	Korus ap, NASA CAMS, EUMETSAT entre otras.			

Tabla 3.1 Contaminantes exteriores e interiores y monitorización. Tham 2016; Landrigan, Fuller, Acosta, Adeyi, Arnold, Basu, Baldé, Bertno-llini, Bose-O'Reilly (...) 2018. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

monitoreo de calidad ambiental es en muchos asentamientos españoles una constante técnica con claras implicaciones. Para un análisis anticipado de un proyecto arquitectónico y su valoración a través de la calidad del aire esta información de monitorización tiene un valor considerable, porque permite tomar acciones que puedan mejorar las propuestas arquitectónicas en cuanto a salud humana se refiere, en cuanto a ventilación entre otros factores. Al exponer la información de sistema de monitoreo en línea se permite identificar anticipadamente las condiciones de un espacio geográfico para la actuación de un ambiente interior

3.3.1.1 Fuentes interiores

La generación de contaminantes en un ambiente interior puede provenir de fuentes primarias y secundarias. Las primarias incluyen en buena medida aquellas denominadas en este documento como fuentes exteriores naturales y antropogénicas. No obstante, acciones antropogénicas como la combustión de combustible para la cocina (Rehfuess, 2007), la calefacción, el alumbrado, el humo del tabaco, los bioefluentes, los animales, los revestimientos de suelos y paredes, las pinturas, colas, pulimentos y ceras sintéticas, los plaguicidas y en sí, los materiales de construcción provenientes de los productos de construcción, son fuentes de contaminación cuya incidencia pasa mayormente desapercibida y dependen íntegramente del diseño arquitectónico, materiales de la envolvente, el mobiliario, las actividades de los ocupantes y su interacción con mascotas (Wu *et al.*, 2007).

De ello, otras fuentes de contaminación del AI son la liberación de gases de los disolventes utilizados en interiores o del agua que se utiliza diariamente para ducharse, bañarse, cocinar y de las fuentes de agua para beber. Como queda claro, las fuentes internas de contaminación son abundantes, y tienden a ampliarse si se incluyen los sistemas mecánicos del edificio, las instalaciones sanitarias, el uso de mobiliario, escritorios, computadoras, impresoras e incluso productos de limpieza doméstica, pesticidas, sellantes, fármacos de aseo personal, ambientadores y más. (García Nieto & Moarta Morales, 2018) (Tabla 3.1). Es sabido que su implementación genera efectos secundarios, todavía no medidos, tanto en el entorno natural como en la salud de quienes los aplican, de los usuarios y visitantes de los espacios (Guerrero, 2015). También se sabe que el contenido de humedad de los materiales permite el crecimiento microbiano, y que la ventilación es un método fácil y seguro para

controlar y estabilizar la humedad relativa (HR), la temperatura (T), el contenido de humedad y, en definitiva, la tasa de actividad microbiana. Precizando, las fuentes secundarias se refieren en buena medida a la química de interiores que transforma un conjunto de contaminantes emitidos por fuentes primarias o transferidos desde el exterior, en un nuevo conjunto de contaminantes de interiores, como se examina a continuación. Estas son a su vez, fuentes de deterioro del ambiente interior, cuyos contaminantes se presentan en forma de polvo con diversos tamaños, humos, fibras, olores o gases que no son fáciles de eliminar mediante los filtros de los sistemas mecánicos de ventilación, aire acondicionado o mantenimiento higiénico.

En este punto, y tal como sucede con las fuentes exteriores, el monitoreo es una medida complementaria; las múltiples investigaciones presentadas no lo acometen, por lo que El Plan de Control Periódico y Sistema de Gestión anunciado en la Norma UNE 171330-1:2008, supone una iniciativa para identificar, valorar y acometer acciones correctoras ante riesgos potenciales. Además de ser claro en términos procedimentales, provee mecanismos específicos para articular a los actores potenciales, esto es usuarios, propietarios, empresas de mantenimiento higiénico y mecánico, inspectores acreditados, laboratorios de control y análisis, y entidades auditoras.

3.3.1.2 *Deficiencias de renovación de aire*

Un ambiente interior con ventilación desplazada (inyectada al interior de un espacio) acentúa el deterioro de la calidad del aire interior, a pesar de estar ampliamente regulada (Hernández, 2004). La reducción de los niveles de contaminantes existentes en un ambiente interior idealmente se realiza mediante ventilación por dilución, con el aporte de aire limpio en un ambiente interior, o la introducción de aire para que la concentración de contaminantes se mantenga en niveles horizontales y sea aceptable para la salud (Hernández, 2004). La renovación del aire es necesaria para reducir los contaminantes que se genera en un ambiente interior. Los niveles de CO₂, son un parámetro para valorar la calidad de ventilación en ambientes cerrados (Carazo Fernández *et al.*, 2013). Bajo esta consideración en el año 2014 se realizó la contabilización de CO₂ en Madrid como un indicador de la calidad del aire interior en un dormitorio de 5m² aproximadamente durante invierno y verano. Se observó que la máxima medida reportada se realiza a las 02:35 am y es 7882 ppm; un segundo

conteo alarmante, aunque significativamente inferior al anterior, fue a las 02:00 pm al referir 1506 ppm. En ambos casos se superan los límites de concentración de las partículas por millón (ppm) establecidos por la OMS. A su vez, se demuestra que la hermeticidad de ambiente interior puede generar altas concentraciones de contaminantes, y en consecuencia incidente en la conservación de la salud (Libro de Resúmenes, 2017), más cuando se trata de un espacio de permanencia o uso intensivo. Por ello, es clave que la renovación del aire reduzca el tiempo disponible para evitar que las reacciones químicas entre los contaminantes del interior tengan lugar (Tabla 3.2).

Ciudad Y norma de referencia	Tasa de ventilación en todo el edificio	Sala	Habitación	Cocina	Baño completo	½ baño social
Bruselas	3.6 m ³ / (h m ²) floor surface area	Mínimo 75 m ³ /h (limited to 150 m ³ /h)	Mínimo 25 m ³ /h (limited to 72 m ³ /h)	Con la cocina abierta 75 m ³ /h (consumo)	Mínimo 50 m ³ /h (limited to 75 m ³ /h)	Mínimo 25 m ³ /h
Dinamarca (BR 10)	Min. 0.3 l/(s·m ²) (prover)	Min. 0.3 l/(s·m ²) (prover)		20 l/s (consumo)	15 l/s (consumo)	10 l/s (consumo)
France (Arête 24.03.82)	10-135 m ³ /h (depende del número de habitaciones y el sistema de ventilación)			Ininterrupido: 20-45 m ³ /h		Mínimo 15 m ³ /h
Alemania (DIN 1946-6)	15-285 m ³ /h			45 m ³ /h (flujo de consumo)	45 m ³ /h (flujo de consumo)	25 m ³ /h (flujo de consumo)
Italia (Legislative Decree 192/2005, Uni EN 15251)	ventilación natural: 0.3–0.6 vol/h	0.011 m ³ /s por persona para un nivel de ocupación de 0,04 personas/m ²			4 vol/h	
Polonia (Art 149 (1) – Journal of Laws 2002 No. 75, item. 690, as amended and PN-B-03430:1983/Az3 :2000)	20 m ³ /h por cada ocupante permanente Debe calcularse de acuerdo con la norma polaca, pero no menos de 20 m ³ /h	20–30 m ³ /h por cada ocupante permanente (para edificios públicos) Para pisos se resumen el flujo de todas las habitaciones		30 m ³ /h a 70 m ³ /h sin ventanas	50 m ³ /h	30 m ³ /h
Suiza (BFS2014:13-BBR21)	Suministro: min 0.35 l/(s·m ²) área de piso					
UK (Approved Document F)	13-29 l/s (depende de las habitaciones)			13-60 l/s (contenido)	8-15 l/s (contenido)	6 l/s (contenido)
EN 15251	0.35-0.49 l/(s·m ²)			14-28 l/s	10-20 l/s	7-14 l/s

Tabla 3.2 Valores de normativas para las tasas de ventilación en Europa. Fuente: BPIE. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

3.3.2 Materialidad en un ambiente interior

A menudo se conciben edificaciones y reformas territoriales con dependencia de un flujo unidireccional de consumo de energía, materiales y sustancias vivas de la naturaleza (Sonetti *et al.*, 2019). En la concepción y construcción a través de la armonía de materiales en un ambiente interior se confinan diversos problemas de salud (Śmiełowska *et al.*, 2017), ya que los materiales de construcción son una fuente de emisión de contaminantes estudiados hace varias décadas (Missia *et al.*, 2010) cuyo impacto no ha ganado la notoriedad del caso. En la práctica, a más de asociarse a la acogida en términos socio culturales, prestancia en términos técnicos, la selección de materiales debería suscribirse también al ámbito de la prevención de riesgos a la salud. De hecho, en tal sector se plantea el desarrollo de las potencialidades de un cuerpo vivo natural que ha ido llenando de descripciones sobre posibles amenazas que hay que evitar, reducir o sortear.

También se sabe que el 40 % de la contaminación global del aire interior de los edificios es atribuible directamente a los materiales de construcción (Rojo *et al.*, 2012) y su complemento de diferentes fuentes. Los compuestos asociados a los materiales de construcción que generan efectos nocivos son el formaldehído, los COVs (Spiru & Simona, 2017b). Estos contaminantes se encuentran en la elaboración de productos que se transforman en materiales, luego por el paso del tiempo se desprenden por el desgaste y/o uso y generan aportes en el deterioro de la CAI.

En la actualidad, el confinamiento global atenta contra la normalidad individual, en consecuencia, la selección de materiales ratifica su importancia como proceso complejo tal como la valoración de su incidencia sobre la CAI. Previamente, múltiples estudios se elaboran para evaluar los efectos sobre la salud de los materiales de un ambiente interior, provocando afecciones como neumonía, neumopatía obstructiva y otros que incluso han superado el espectro de las afecciones al sistema respiratorio, y han alcanzado posibles asociaciones entre la contaminación del aire y afecciones al sistema óseo, con una baja masa debido a la incidencia de las partículas PM_{2.5} (Ranzani *et al.*, 2020). Las fibras que se utilizan como aislantes adicionan problemas a la salud, entre ellas las fibras textiles, naturales, minerales, orgánicas de carbón y micro plástico (Gasperi *et al.*, 2018). De las fibras minerales, material muy utilizado en edificios construidos en años anteriores a 1975 (R. J. Lee & Van Orden, 2008) para aislamiento térmico, eléctrico y acústico. Se identifica las diferentes partículas

que desprenden los materiales según su grado de constitución, como es el caso del amianto, la mesotelioma y la asbestosis de fibras delgadas que produce riesgos potenciales, como es el cáncer de pulmón (*OMS / Amianto*, 2016). Actualmente existe la prohibición del amianto en la construcción para lo cual se debe cumplir con la norma de la construcción.

De manera similar, las fibras de vidrio y minerales ayudan al confort térmico y acústico, y las afecciones asociadas a su uso son fibrosis, placa pleural, broncogénica, carcinoma, mesotelioma y posiblemente gastroínea carcinoma intestinal (K. P. Lee *et al.*, 1981). Las fibras que se encuentran en análisis son las fibras textiles que contienen plástico (Vallejo, 2018). La producción anual de fibras plásticas textiles ha aumentado en más del 6 % por año, llegando a 60 millones de toneladas métricas, aproximadamente el 16 % de la producción mundial de plástico. Este tipo de material genera nanoplástico, que en investigaciones realizadas se detectan con una bomba de aire interior con filtros de cuarzo de partículas 1,6 mm de muestras de 8 l/min, demostrando en esa investigación que ocasiona reproducción toxica, cancerígeno y mutagénico (Gasperi *et al.*, 2018), irritación respiratoria (Warheit *et al.*, 2001).

La enfermedad pulmonar intersticial es una afección relacionada con el trabajo que induce tos, disnea y capacidad pulmonar reducida en trabajadores que procesan, fibras de poliéster y / o nylon (Ghio *et al.*, 2006) presentan síntomas clínicos similares a la alveolitis alérgica. De hecho, los defectos genéticos en varios mecanismos de reparación del ADN reducen la tolerancia celular al formaldehído (Reingruber & Pontel, 2018b). Entre los materiales de construcción, mobiliario y decoración, como emisores de COVs cabe citar a las juntas de goma, impermeabilizantes, paneles de melanina, pinturas, adhesivos, papeles pintados, colas para empapelar, moquetas, suelos de madera, tapicerías y cortinajes. Cualquier compuesto orgánico con un punto de ebullición menor a 250°C y presión de vapor mayor que 0.01kPa a 20°C, es considerado un COVs (Kershaw, 1998). Un 75,25 % del total de superficie interior corresponde a paredes que pueden contener COV, son productos que tienen un alto riesgo de incendio tanto en su fabricación como en su utilización (Restrepo, 2006). En su primera fase el daño generado por esta reacción en cadena produce gran cantidad de COVs, incluidos alcanos, aldehídos y ácidos carboxílicos, que pueden ser excretados por las vías respiratorias.

Métodos epidemiológicos informan que la exposición a COVs es una causa importante de neumonía, edema pulmonar, asma, signo de estrés oxidativo en las

vías respiratorias y los pulmones (Cakmak *et al.*, 2014), irritación de los ojos y tracto respiratorio, alergias, síntomas del sistema nervioso central, daño hepático y renal, así como riesgos de cáncer (Shrubsole *et al.*, 2019). Los COVs se pueden encontrar solos o adheridos a la superficie de partículas suspendidas en el aire por lo que tienen acceso fácil a las vías aéreas inferiores y, debido a su estabilidad y bajo peso, pueden precipitarse a los suelos y volver a elevarse con las brisas haciendo que su permanencia en el ambiente y la consecuente exposición de los seres humanos sea intermitente (Caraballo, 2012).

Por su parte, el formaldehído está presente en el mobiliario, específicamente en la composición de la madera tipo contrachapado (Salthammer *et al.*, 2010), productos de limpieza en seco y productos farmacéuticos (Li *et al.*, 2017). La larga exposición a este gas produce síntomas potenciales dolor de cabeza, irritación grave de los ojos y la mucosa respiratoria (Salthammer *et al.*, 2018) que en máxima instancia supone una amenaza de carácter mutagénico, genotóxico y daño al ADN (C. N. Martin *et al.*, 1978). Pruebas en roedores y su exposición a este gas en 14.3 ppm produce cáncer nasal asociado con un aumento dependiente de la exposición en la frecuencia, gravedad y distribución contribución de rinitis, displasia y metaplasia escamosa de epitelio respiratorio que recubre la cavidad nasal anterior (Kerns *et al.*, 1983). Dada la peligrosidad del formaldehído las emisiones han sido considerablemente reducidas en varios materiales de construcción, pero no eliminadas completamente (Hematabadi *et al.*, 2012). Propuestas para la reducción del formaldehído como los impulsados por el Laboratorio Conjunto Estatal Clave de Simulación Ambiental y Control plantea la colocación de filtros tratados (Xia *et al.*, 2020).

3.3.3 Efectos sobre la salud desde alternativas computacionales

El análisis matemático asociado a afecciones respiratorias, tal como el caso de los depósitos de aerosoles se basa en la dinámica computacional de fluidos para simular a través de ordenadores su movimiento y resolver a través de ecuaciones de Navier-Stokes (Fernández Tena & Casan Clarà, 2012) su comportamiento. Se recurre también al número de Stokes que, al describir la capacidad de una partícula para mantener su propia trayectoria (y es directamente proporcional al diámetro de la partícula al cuadrado) (Kleinstreuer & Zhang, 2010), sería aplicable a las partículas contaminantes interiores, tal como se ha usado para las exteriores. A nivel médico,

un modo de lograr mayor individualización de los tratamientos es elaborar modelos de la vía aérea para cada paciente. En ello se encuentra el desarrollo de alternativas para la administración de medicación inhalada, tratamientos de primera línea para el asma o la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Fernández Tena & Casan Clarà, 2012). Para ello, desde un aporte significativo desde la biomedicina se resalta dos enfoques para generar modelos geométricos pulmonares posibles de ser analizados a nivel computacional / experimental.

El primero, a través de algoritmos que especifican reglas basadas en el volumen de las partículas inhaladas para las relaciones entre las vías respiratorias (*Burrowes et al.*, 2008); el segundo considera las réplicas pulmonares reconstruidas digitalmente a partir de tomografías computarizadas o datos de resonancia magnética (Luo & Liu, 2008). En ambos casos se referencia el tamaño de la partícula que ingresa al sistema respiratorio, pues es importante conocer el contaminante a detalle para determinar a precisión las predicciones y las condiciones de administración de medicamentos. Para llegar a estos niveles de definición, es propicia la combinación de una amplia gama de ciencias. El punto de inicio es el registro sistemático de datos, y su derivación a sistemas de simulación como los expuestos.

Según la afirmación: los datos no son información, la información no es conocimiento y el conocimiento no es sabiduría (Sachs et al., 2019), el equipo interdisciplinar debe transformar los datos en información a largo plazo. Los arquitectos deben orquestar la compleja tarea de [re]diseñar ciudades y diseñar edificios que reviertan el daño ecológico, permitan la evolución ecológica y refuerce el estado de salud de los habitantes (Sachs et al., 2019). Su diseño debería regular el clima, proporcionar hábitat, ciclo de nutrientes, purificar agua-aire-suelo y producir energía y agua.

3.4 Diseño del edificio y salud

Conforme menciona la Ley 38/1999 en el caso español las titulaciones académicas y profesionales habilitantes para desempeñar funciones (coordinador de seguridad y salud) semejantes a las definidas por la *Evidence based Design Accreditation and Certification* (EDAC), es decir, profesionales capaces de aplicar tal proceso de diseño basado en evidencias alineadas a la arquitectura sanitaria, serían las de arquitecto, arquitecto técnico, ingeniero o ingeniero técnico (Reglamento *et al.*, 2015).

Además, como aporte para el mejoramiento de la planificación en beneficio de los ocupantes, con solo decisiones de materiales o distribución de ambientes adecuados, es oportuno que se sumen profesionales de la salud y otros. A la par de la arquitectura, las más recientes investigaciones posicionan al *regenerative design* y a la *salutogenesis* como paradigmas contemporáneos. El primero hace frente al cambio climático con base en los edificios entendidos como soluciones que refuerzan el estado de salud del ser humano y los ecosistemas naturales. Considera que los proyectos que actualmente se encuentran en las etapas de información, diseño o construcción son aquellos que comenzarán a funcionar dentro de 12 años aproximadamente y, en consecuencia, son los que necesitan un cambio radical y regenerativo hoy (Naboni & Havinga, 2019).

La salutogénesis por su parte, se centra en los factores que apoyan la salud y el bienestar humanos, no solo en los factores que causan problemas de salud, es decir, la salud se transforma en un incentivo (Brown *et al.*, 2017) de un nuevo sistema de producción y articulación. En síntesis, estos pensamientos implican imaginar, y consecutivamente concretar hogares, lugares de trabajo, vecindarios y ciudades que sean socialmente justos, culturalmente ricos y ecológicamente regenerativos (Brown *et al.*, 2017). El planteamiento arquitectónico actual tiene como reto el mantener un ambiente interior saludable, mediante el conocimiento de los materiales, el soporte normativo y el direccionamiento profesional para la conservación de salud. Hacer hincapié en el uso y planteamiento de decisiones de diseño efectivas es enfocar la mejora sustancialmente de la salud de los ocupantes de un ambiente interior (C. Martin, 2000). Este vínculo empírico entre el diseño y los resultados médicos es evidencia no solo del potencial que tiene el diseño arquitectónico en la recuperación de los pacientes, sino además en la repercusión económica que supone para las instituciones sanitarias en EE.UU (Ulrich *et al.*, 2008), y seguramente en el resto del mundo.

Con esta aspiración, una planificación arquitectónica importante se desarrolla desde los años 70 en Canadá el diseño con principios y evidencia de la denominada arquitectura sanitaria (Ulrich *et al.*, 2008), proceso que consiste en fundamentar decisiones de diseño en investigaciones creíbles con el fin de conseguir los mejores resultados posibles (Quan *et al.*, 2016). La proyección arquitectónica trabaja con el crecimiento de la tecnología, transformando cada proceso de diseño y construcción

de estructuras eficientes (Meiss *et al.*, 2016) para el cuidado de personas enfermas. También incluye la certificación técnica, como el caso de la EDAC.

3.5 Conclusiones

La materialidad constructiva que conforma el ambiente interior es una de las fuentes de emisión de contaminantes químicos en gas o diversas partículas que, también adicionan problemas al sistema óseo. Es importante para la perspectiva arquitectónica el conocimiento de los estudios científicos históricos y actuales relacionados con la salud, pues a través de la planificación de un espacio y la constitución del mismo se proyecta a los futuros usuarios potencia afecciones de salud que pudieran ya sea desencadenarse, o detenerse.

Por ello, si bien el análisis prioritariamente se centra en la materialidad de un espacio interior, la problemática en torno a la salud ambiental desde la emisión de contaminantes provenientes en espacios interiores pone sobre la mesa la necesidad de participación técnica diversa a la hora de proyectar, intervenir o dar mantenimiento higiénico. En este sentido, si bien el arquitecto ha figurado como el centro de tal actividad, a día de hoy y de cara a las demandas sociales y de salud pública, debe reforzarse. Esto se puede lograr a través de evidencia arquitectónica como ejemplo las EDAC utilizadas para arquitectura hospitalaria. Este ejemplo podría ampliarse a viviendas, espacios de oficina y más espacios en donde la permanencia sea elevada. Bajo las condiciones de confinamiento que nos acoge por la amenaza del virus SARS-CoV2 se amplía la permanencia absoluta y con ello se incrementan las posibilidades, no solo de enfermedades respiratorias por emisiones de contaminantes, sino también de enfermedades psicológicas propias del confinamiento, en espacios que, a su vez, no estuvieron planificados.

Como es claro, el análisis bibliográfico desarrollado apoya lo previo desde la evidencia científica del incremento notable de las afecciones respiratorias vinculadas a los contaminantes cuyas fuentes de emisión son los materiales de construcción en diferentes escenarios. En este sentido, la arquitectura como recurso al servicio del ser humano debería recurrir como antaño a las estrategias de su tiempo y su versatilidad para orientar la toma de medidas que garanticen la habitabilidad, el confort, conservación de la salud y la mínima exposición a riesgos aparentemente invisibles. Lo último representa el segmento de menor desarrollo y a su vez mayor

interés. En primera instancia porque se sobreentiende que los riesgos por su propia naturaleza están fuera, y en consecuencia la arquitectura sería el medio propicio para mitigarlos. No obstante, hoy que ya no es discutible que los riesgos ambientales se han desplazado al interior, el combate de las enfermedades potenciales derivadas de la baja calidad del aire interior, y en general la conservación de la salud, recae en la planificación arquitectónica como un proceso integral.

Por tanto, es prioritario el rebasar la noción de reducir elemental sobre la mala salud y mejorar de manera científica demostrable la salud de los usuarios de un ambiente interior.

3.6 Referencias

- Adán, A., & Huber, D. (2011). Análisis de datos 3D para generación automática de modelos BIM de interiores habitados. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 8(4), 357–370.
<https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.010>
- Adhanom, T. (2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas*. OMS.
<https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Alonso, P., & Valeska, E. (2014). *Análisis técnico y constructivo de los tableros de madera y su uso en la construcción*.
- Alsmo, T., & Holmberg, S. (2007). *Sick Buildings or Not : Indoor Air Quality and Health Problems in Schools*. 16(6), 548–555.
<https://doi.org/10.1177/1420326X07084414>
- Alvarado, M. J., McVey, A. E., Hegarty, J. D., Cross, E. S., Hasenkopf, C. A., Lynch, R., Kennelly, E. J., Onasch, T. B., Awe, Y., Sanchez-Triana, E., & Kleiman, G. (2019). Evaluating the use of satellite observations to supplement ground-level air quality data in selected cities in low- and middle-income countries. *Atmospheric Environment*, 218(November 2018), 117016.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117016>
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Espanola de Salud Publica*, 73(2), 123–132.
<https://doi.org/10.1590/s1135-57271999000200003>
- Arya, S. P. (2001). Introduction to Micrometeorology. In R. Dmowska, J. Holton, & T. Rossby (Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Second Edi, Vol. 79, Issue 9).
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2014). Formaldehído 4.15. *La Evolución*, 3(34), 237–254. <http://www.anla.gov.co/documentos/Guia15.pdf>

- Ayyagari, V. N., Januszkiewicz, A., & Nath, J. (2004). Pro-inflammatory responses of human bronchial epithelial cells to acute nitrogen dioxide exposure. *Toxicology*, 197(2), 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2003.12.017>
- Basta, A., Serror, M. H., & Marzouk, M. (2020). A BIM-based framework for quantitative assessment of steel structure deconstructability. *Automation in Construction*, 111(October 2019), 103064. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103064>
- Bluyssen, P. M., Aries, M., & van Dommelen, P. (2011). Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project. *Building and Environment*, 46(1), 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.024>
- BOE 4/2015. (2015). Boletón Oficial del Estado. *Boletín Oficial Del Estado*, 61561–61567.
- Bourdin, D., Mocho, P., Desauziers, V., & Plaisance, H. (2014). Formaldehyde emission behavior of building materials : On-site measurements and modeling approach to predict indoor air pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.065>
- Brown, M., Haselsteiner, E., Apró, D., Kopeva, D., Luca, E., & Pulkkinen, K. (2017). *Restorative to Regenerative RESTORE Working Group One Report : Restorative Sustainability Project Name REthinking Sustainability TOwards a Regenerative Economy*.
- Burrowes, K. S., Swan, A. J., Warren, N. J., & Tawhai, M. H. (2008). Towards a virtual lung: Multi-scale, multi-physics modelling of the pulmonary system. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1879), 3247–3263. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0073>
- Cakmak, S., Dales, R. E., Liu, L., Kauri, L. M., Lemieux, C. L., Hebbern, C., & Zhu, J. (2014). Residential exposure to volatile organic compounds and lung function: Results from a population-based cross-sectional survey. *Environmental Pollution*, 194, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.020>
- Calidad del aire interior*. (2011). https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/contaminacion-aire-interior/index.htm
- Cao, Z., Wang, M., Chen, Q., Zhu, C., Jie, J., Li, X., Dong, X., Miao, Z., Shen, M., & Bu, Q. (2019). Spatial, seasonal and particle size dependent variations of PAH contamination in indoor dust and the corresponding human health risk. *Science of the Total Environment*, 653, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.413>
- Caraballo, J. M. S. (2012). Características fisicoquímicas de los gases y partículas contaminantes del aire. Su impacto en el asma. *Iatreia*, 25(4), 369–379.
- Carazo Fernández, L., Fernández Alvarez, R., González-Barcala, F. J., & Rodríguez Portal, J. A. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- Texte adopté du Parlement, lecture unique, 2246 7 (2019).

- Castejón Vilella, E. (2017). Propuesta europea sobre los valores límite del formaldehído. *MC Salud Laboral*, 14–17.
- Chiesa, M., Urgnani, R., Marzuoli, R., Finco, A., & Gerosa, G. (2019). Site- and house-specific and meteorological factors influencing exchange of particles between outdoor and indoor domestic environments. *Building and Environment*, 160(May). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106181>
- Clerbaux, C., Coheur, P., Scharf, O., & Hurtmans, D. (2009). The potential of MTG-IRS and S4-TIR to detect high pollution events at urban and regional scales. In *Carbon* (Issue December 2008).
- Contaminación del aire de interiores y salud*. (n.d.). Retrieved October 23, 2019, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Cooke, T. F. (1991). *Indoor Air Pollutants A Literature Review*. 9(3). <https://doi.org/10.1515/reveh.1991.9.3.137>
- CTN171, C. T. (2018). *Norma Española Productos de construcción : Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas Determinación de las emisiones al aire interior*.
- Delfino, R. J., Sioutas, C., & Malik, S. (2005). Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 934–946. <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>
- Diario Oficial L 298/2008*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2008:298:FULL&from=FR>
- Reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente, 2019 1 (2019).
- Eastman, C. (2016). *BIM Handbook BIM Handbook Rafael Sacks*.
- Entralgo Laín, P. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. Salvat Editores (Ed.)). <file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf>
- Entralgo, P. L. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. SALVAT EDITORES (Ed.); Primera ed). <file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf>
- ESA - Call for Media: Last glimpse of the Sentinel-6 satellite*. (n.d.). Retrieved January 22, 2020, from https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Call_for_Media_Last_glimpse_of_the_Sentinel-6_satellite
- Real Decreto 117/2003, de 31 de enero, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades, Boletín Oficial del Estado 5030 (2003).
- España. (2007). Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. *Boletín Oficial Del Estado*, 16 noviembre de 2007 (275), 46962–46987.
- Espinoza Molina, C., & Palacios Espinoza, E. (2013). UNIVERSIDAD DE CUENCA - TESIS.pdf. *Artículo Ecuador*, 1(5), 1–127.

- European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe. In *EEA Report No 4/2012* (Issue 9). <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>
- Fan, Y., Deng, C., Zhang, X., Li, F., Wang, X., & Qiao, L. (2018). Numerical study of CO₂-enhanced coalbed methane recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 76(June), 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.016>
- Fernández Tena, A., & Casan Clarà, P. (2012). Depósito pulmonar de partículas inhaladas. *Archivos de Bronconeumología*, 48(7), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.02.003>
- Ferron, B., & Crespín, R. (2016). An Acceptable Daily Intake of Bad News . Public / Private Problems and Media Trivialization of Environmental Health Issues : The Case of Indoor Air Pollution in France. *Politiques de Communication*, 7(May), 151–181.
- García Nieto, A., & Moarta Morales, I. (2018). Calidad del ambiente interior en edificios de uso público. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 119. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- Ghio, A. J., Funkhouser, W., Pugh, C. B., Winters, S., Stonehuerner, J. G., Mahar, A. M., & Roggli, V. L. (2006). Pulmonary fibrosis and ferruginous bodies associated with exposure to synthetic fibers. *Toxicologic Pathology*, 34(6), 723–729. <https://doi.org/10.1080/01926230600932448>
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2018). *2018 Global Status Report*. 325. [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018 GlobalABC Global Status Report.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20GlobalABC%20Global%20Status%20Report.pdf)
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudios Avanzados*, 21(59), 7–20.
- Graham, C., Laffan, K., & Pinto, S. (2018). Well-being in metrics and policy. *Science*, 362(6412), 287–288. <https://doi.org/10.1126/science.aau5234>
- Guardino Solá, X. (1998). Calidad del aire interior. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo*, 44.1-44.33. <https://doi.org/10.1590/S1020-49891998001200018>
- Guerrero, L. F. (2015). Sostenibilidad y conservación del patrimonio edificado. *Palapa*, 3(17), 102. https://www.researchgate.net/publication/303369539_Sostenibilidad_y_conservacion_del_patrimonio_edificado
- Gunschera, J., Mentese, S., Salthammer, T., & Andersen, J. R. (2013). Impact of building materials on indoor formaldehyde levels: Effect of ceiling tiles, mineral fiber insulation and gypsum board. *Building and Environment*, 64, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.001>
- Harrison, R. M., Delgado-saborit, J. M., Baker, S. J., Aquilina, N., Meddings, C., Harrad, S., Matthews, I., Vardoulakis, S., & Ross Anderson, H. (2009).

- Measurement and Modeling of Exposure to Selected Air Toxics for Health Effects Studies and Verification by Biomarkers. In *Health Effects Insittute* (Issue 143).
https://www.researchgate.net/publication/40648065_Measurement_and_modeling_of_exposure_to_selected_air_toxics_for_health_effects_studies_and_verification_by_biomarkers/link/00b7d5194d22cead35000000/download
- Headquarters Corporata. (2014). Carbon dioxide. *Air Products and Chemicals, Inc.*
- Hematabadi, H., Behrooz, R., Shakibi, A., & Arabi, M. (2012). The reduction of indoor air formaldehyde from wood based composites using urea treatment for building materials. *Construction and Building Materials*, 28(1), 743–746.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.018>
- Hernández, A. (2004). NTP 742: Ventilación general de edificios. *Insht*, 9.
http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NT P/Ficheros/701a750/ntp_742.pdf
- Herrero Uceda, M. (2007). Árboles e insectos : *Foresta*, 37, 63–67.
- I. Leirós, L. (2009). Historia de la Ergonomía, o de cómo la Ciencia del Trabajo de basa en verdades tomadas de la Psicología. *Revista de Historia de La Psicología*, 30(4), 33–53.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3130680>
- IARC Working Group. (2004). INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Formaldehyde , 2-Butoxyethanol. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*.
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol62/>.
- Issn, L. A. (2012). Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm10. *Luna Azul*, 34, 195–213.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.12>
- Jackson, R. J., & Cummins, S. K. (2001). The built environment and chil- dren's health. *Pediatr Clin North Am*, 48, 1241–1252.
- Jesús, G. M., & García, J. (2006). *Assessment of the decrease of CO 2 emissions in the construction field through the selection of materials : Practical case study of three houses of low environmental impact*. 41, 902–909.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Kam, W., Cheung, K., Daher, N., & Sioutas, C. (2011). Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro. *Atmospheric Environment*, 45(8), 1506–1516.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.049>
- Kerns, W. D., Pavkov, K. L., Donofrio, D. J., Gralla, E. J., & Swenberg, J. A. (1983). Carcinogenicity of Formaldehyde in Rats and Mice after Long-Term Inhalation Exposure. *Cancer Research*, 43(9), 4382–4392.
- Kershaw, Y. (1998). VOC legislation on the threshold of change. *European Coatings Journal*, 49(4), 230–235.
- Klaassen, K. D., & Watkins, J. B. (1999). *Manual de Toxicología*.
<http://www.ghbook.ir/index.php?name=های رسانه و فرهنگ>

نوين&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chckhash=k=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component

- Kleinstreuer, C., & Zhang, Z. (2010). Airflow and Particle Transport in the Human Respiratory System. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(1), 301–334. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145453>
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- La Agenda para el Desarrollo Sostenible – Desarrollo Sostenible*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Laird, T. (1997). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th Edition VCH: Weinheim, Germany. 1996/1997. Section A, 28 vols. Section B, 8 vols. DM 19 400. *Organic Process Research & Development*, 1(5), 391–392. <https://doi.org/10.1021/op970020u>
- Le Bourhis, J.-P. (2019). Du prive au public et retour. Les politiques de l'air intérieur entre regulation et responsabilisation. *Environnement Risque Sante*, 18, 318–322.
- Lee, K. P., Barras, C. E., Griffith, F. D., Waritz, R. S., & Lapin, C. A. (1981). Comparative pulmonary responses to inhaled inorganic fibers with asbestos and fiberglass. *Environmental Research*, 24(1), 167–191. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(81\)90143-2](https://doi.org/10.1016/0013-9351(81)90143-2)
- Lee, R. J., & Van Orden, D. R. (2008). Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 50(2), 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.10.005>
- Lema, W., & Castillo, E. (2018). Relaciones agua/cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9(1), 125–140. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.12>
- Li, Y., Chen, N., Deng, D., Xing, X., Xiao, X., & Wang, Y. (2017). Formaldehyde detection: SnO₂ microspheres for formaldehyde gas sensor with high sensitivity, fast response/recovery and good selectivity. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 238, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.051>
- Libro de Resúmenes*. (2017).
- Liddament, M. (2019). *The AIVC of the 20 th century* (Issue 9). <https://www.aivc.org/resources/collection-papers/volume/40th-aivc-8th-tightvent-6th-venticool-conference-ghent-belgium-15>
- Luo, H. Y., & Liu, Y. (2008). Modeling the bifurcating flow in a CT-scanned human lung airway. *Journal of Biomechanics*, 41(12), 2681–2688. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.06.018>
- Makarem, M. A., Farsi, M., & Rahimpour, M. R. (2020). CFD simulation of CO₂ removal from hydrogen rich stream in a microchannel. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.221>

- Maroni, M., Seifert, B., & Lindvall, T. (1995). Indoor Air Quality. In *Elsevier Science* (Primera).
- Martin, C. (2000). Putting patients first: Integrating hospital design and care. *Lancet*, 356(9228), 518. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)74196-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)74196-9)
- Martin, C. N., McDermid, A. C., & Garner, R. C. (1978). Testing of Known Carcinogens and Noncarcinogens for Their Ability to Induce Unscheduled DNA Synthesis in HeLa Cells. *Cancer Research*, 38(8), 2621–2627.
- Martínez C, G. (2019). Análisis meteorológico en la mar. In U. Ediciones (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (1998th ed., Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Maruo, Y. Y., Yamada, T., & Nakamura, J. (2009). Sensor element for indoor formaldehyde measurement. *NTT Technical Review*, 7(10).
- Matínez, M. C., & Becerra, Á. M. (2017). *Evaluación de un modelo difusivo convectivo del formaldehído en un ambiente cerrado de trabajo*. (Vol. 1). FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Meiss, A., Feijó-Muñoz, J., & Padilla-Marcos, M. A. (2016). Evaluación, diseño y propuestas de sistemas de ventilación en la rehabilitación de edificios residenciales españoles. Estudio de caso. *Informes de La Construcción*, 68(542), 0–11. <https://doi.org/10.3989/ic.15.101>
- Mendell, M. J., Lei-Gomez, Q., Mirer, A. G., Seppänen, O., & Brunner, G. (2008). Risk factors in heating, ventilating, and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: The US EPA BASE study. *Indoor Air*, 18(4), 301–316. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00531.x>
- Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua caliente, (1980). *Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Profesionales - Documentos técnicos para profesionales - Coronavirus*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCoV-China/documentos.htm>
- Ministerio de vivienda 18400*. (2007).
- Missia, D. A., Demetriou, E., Michael, N., Tolis, E. I., & Bartzis, J. G. (2010). Indoor exposure from building materials: A field study. *Atmospheric Environment*, 44(35), 4388–4395. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.049>
- Mitchell, C. S., Zhang, J., Sigsgaard, T., Jantunen, M., Liou, P. J., Samson, R., & Karol, M. H. (2007). Current state of the science: Health effects and indoor environmental quality. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 958–964. <https://doi.org/10.1289/ehp.8987>
- MohseniBandpi, A., Eslami, A., Shahsavani, A., Khodagholi, F., & Alinejad, A. (2017). Physicochemical characterization of ambient PM_{2.5} in Tehran air and its potential cytotoxicity in human lung epithelial cells (A549). *Science of the Total Environment*, 593–594, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.150>
- Naboni, E., & Havinga, L. (2019). *Regenerative Design in* (D. Harkness, E. Naboni, & L. Havinga. (Eds.)).

- Ng, L. C., Musser, A., Persily, A. K., & Emmerich, S. J. (2012). NIST Technical Note 1734 - Airflow and indoor air quality models of DOE reference commercial buildings. *National Institute of Standards and Technology*, 163. <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech Note 1734 - CONTAM reference bldgs.pdf>
- Núñez, A., González, M., & Saura, G. (2015). Proceso de recuperación de CO₂. Generalidades. *ICIDCA : Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 49(2), 24–32.
- Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of the Total Environment*, 726, 138605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>
- OMS / *Amianto*. (2016). WHO; World Health Organization. https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/asbestos/es/
- OMS, O. (2016). *Hoja de ruta del programa de calidad del aire de la OPS/OMS*. https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=guias-9833&alias=45330-hoja-ruta-calidad-aire-ops-oms-agenda-estrategica-inclusion-salud-gestion-calidad-aire-2018-330&Itemid=270&lang=es
- OMS, O. M. de la S. (2016). *Salud y medio ambiente Proyecto de hoja de ruta para reforzar la respuesta mundial a*. 13.
- Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud. (2009). *Ventilación natural para el control de las infecciones en entornos de atención de la salud*. http://www2.paho.org/hq/dmdocuments/2011/ventilacion_natual_spa_25mar11.pdf
- Análisis de la Calidad del aire en España, evolución 2001-2012, (2012).
- Partes, L. (n.d.). *Acuerdo de París*.
- Permentier, K., Vercammen, S., Soetaert, S., & Schellekens, C. (2017). Carbon dioxide poisoning : a literature review of an often forgotten cause of intoxication in the emergency department. *International Journal of Emergency Medicine*, 10, 17–20. <https://doi.org/10.1186/s12245-017-0142-y>
- Persily, A., & Hewett, M. (2010). Using ASHRAE's new IAQ guide. *ASHRAE Journal*, 52(5), 75–82.
- Pierantozzi, R. (2003). Carbon dioxide. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4(1), 803–820. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0301180216090518.a01.pub2>
- Pineda Espinoza, C., García Alvear, N., Astudillo Alemán, A., & Vázquez Freire, V. (2015). Quantification of the particulate matter in the work environment of the production sector in Cuenca-Ecuador. *Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias*, 6(14), 70–83.
- Piñon, H. (2006). *Teoría del proyecto*. 221.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., & Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General

- Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation*, 109(1), 71–77.
<https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>
- PRUNEDA, A. (1950). La organización Mundial de la Salud. *Medicina*, 30(617), 175–178.
- Qi, H., Xiao, S., Shi, R., Ward, M. P., Chen, Y., Tu, W., Su, Q., Wang, W., Wang, X., & Zhang, Z. (2020). COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: A time-series analysis. *Science of the Total Environment*, 728, 138778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138778>
- Quality, I. A., Building, O., Chandra, J., Putra, P., Degree, M., & Engineering, C. (2015). *Effects of Indoor Air Quality on the Occupant's Health and Productivity in an Office Building* (Issue April). University Tun Hussein Onn Malaysia.
- Quan, X., Joseph, A., Nanda, U., Moyano-Smith, O., Kanakri, S., Ancheta, C., & Loveless, E. A. (2016). Improving Pediatric Radiography Patient Stress, Mood, and Parental Satisfaction Through Positive Environmental Distractions: A Randomized Control Trial. *Journal of Pediatric Nursing*, 31(1), e11–e22.
<https://doi.org/10.1016/j.pedn.2015.08.004>
- Querol, X., Viana, M., & Moreno, T. (2012). *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de Calidad del Aire* (Cyan, Proy).
- Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 8, 53–66.
- Ranzani, O. T., Milà, C., Kulkarni, B., Kinra, S., & Tonne, C. (2020). *Association of Ambient and Household Air Pollution With Bone Mineral Content Among Adults in Peri-urban South India*. 1–14.
<https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.18504>
- Reglamento, E., Europeo, P., & Decreto, R. (2015). *Texto Consolidado*. 1–24.
- Rehfuess, E. & W. H. O. (2007). *Combustibles para una vida mejor*. 56.
http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43705/9789243563169_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reingruber, H., & Pontel, L. B. (2018a). Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9, 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.07.001>
- Reingruber, H., & Pontel, L. B. (2018b). Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9(2018), 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.07.001>
- Restrepo, J. A. (2006). *Compuestos orgánicos volátiles*. 24–26.
- Rey Martínez, F. J., & Ceña Callejo, R. (2006). *Edificios saludables para trabajadores sanos, calidad de ambientes interiores*.
- Roffael, E., Khoo, K. C., Koh, M. P., & C L Ong. (1993). *Formaldehyde release from particleboard and other wood based panels*. (Kuala Lumpur (Ed.)). Forest Research Institute Malaysia.

- Rojo, N., Obregón, I., Manrique, R., & Elías, A. (2012). Aproximación a La Problemática Del Aire Interior. *Aeipro.Com*, 11–13.
http://aeipro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12_1162_1174.3791.pdf
- Ruíz, A. A. B. (2019). *España en cifras 2019* (Vol. 3, Issue 2).
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Ruiz Bautista, L. (2019). Cardiovascular impact of PM_{2.5} from the emissions of coal-fired power plants in Spain during 2014. *Medicina Clínica*, 153(3), 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2018.11.017>
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(9), 805–814.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- Sáez, E. (2017). Análisis de la calidad del aire interior en función de la tipología de vivienda. *Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de La Comunidad de Madrid*, 2(Ii), 1–98. <https://doi.org/M-48.739-2010>
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536–2572.
<https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- Salthammer, T., Schieweck, A., Gu, J., Ameri, S., & Uhde, E. (2018). Future trends in ambient air pollution and climate in Germany – Implications for the indoor environment. *Building and Environment*, 143(May), 661–670.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.050>
- Salud, 68. Asamblea Mundial de la. (2015). *65 Asamblea Mundial De La Salud*.
<https://doi.org/10.1080/00222349508219502>
- Schneider, T., Sundell, J., Bischof, W., Bohgard, M., Cherrie, J. W., Clausen, P. A., Dreborg, S., Kildesø, J., Kjærgaard, S. K., Løvik, M., Pasanen, P., & Skyberg, K. (2003). “EUROPART”. Airborne particles in the indoor environment. A European interdisciplinary review of scientific evidence on associations between exposure to particles in buildings and health effects. *Indoor Air*, 13(1), 38–48. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.02025.x>
- Schultz, M. M. (2014). Chemicals of Environmental Concern. In *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (Third Edit, Vol. 1). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01004-6>
- Secretario, E., Generales, P., Generales, P., Decreto, R., Reglamento, E., Sanitaria, A. C., & Decreto, R. (1998). *Ministerio de economía y hacienda 18794*. 130570.
- Shaya, J., Srour, H., & Karamé, I. (2016). An Outline of Carbon Dioxide Chemistry, Uses and Technology. *Intech, I*, 13.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- Shrubsole, C., Dimitroulopoulou, S., Foxall, K., Gadeberg, B., & Doutsis, A. (2019). IAQ guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK. *Building and Environment*, 165(September), 106382.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106382>
- Śmiełowska, M., Maré, M., & Zabiegała, B. (2017). Indoor air quality in public utility environments—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11166–11176. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8567-7>

- Sonetti, G., Brown, M., & Naboni, E. (2019). About the triggering of UN sustainable development goals and regenerative sustainability in higher education. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su11010254>
- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017a). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Energy Procedia*, 128, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.039>
- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017b). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Encyclopedia of Environmental Health*, 128, 213–220. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52272-6.00262-2>
- Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Oman, L. D., & Strahan, S. E. (2019). The Effects of a 1998 Observing System Change on MERRA-2-Based Ozone Profile Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 3(2018), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2019JD030257>
- Stull, R. B. (1988). *AN INTRODUCTION TO BOUNDARY LAYER METEOROLOGY*.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air, Supplement*, 14(SUPPL. 7), 51–58. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Tang, W., Arellano, A. F., DiGangi, J. P., Choi, Y., Diskin, G. S., Agustí-Panareda, A., Parrington, M., Massart, S., Gaubert, B., Lee, Y., Kim, D., Jung, J., Hong, J., Hong, J.-W., Kanaya, Y., Lee, M., Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Flynn, J. H., & Woo, J.-H. (2018). Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 11007–11030. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11007-2018>
- Tang, X., Bai, Y., Duong, A., Smith, M. T., Li, L., & Zhang, L. (2009). Formaldehyde in China: Production, consumption, exposure levels, and health effects. *Environment International*, 35(8), 1210–1224. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.06.002>
- Topham, S., Bazzanella, A., Schiebahn, S., Luhr, S., Zhao, L., Otto, A., & Stolten, D. (2014). Carbon Dioxide. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (p. 39). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/14356007.a05>
- Ulrich, R. S., Zimring, C., Zhu, X., DuBose, J., Seo, H. B., Choi, Y. S., Quan, X., & Joseph, A. (2008). A review of the research literature on evidence-based healthcare design. *Herd*, 1(3), 61–125. <https://doi.org/10.1177/193758670800100306>
- Unidas, N. (1997). *LEY 629 Diciembre 27 de 2000: Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Vol. 61702).
- Vallejo, C. (2018). *Evaluación del material particulado micro-plásticos y su relación con la calidad del aire en el interior de los hogares, Comas, 2018*.
- Vivienda, M. de. (2006). *Código Técnico de la Edificación Partes I y II*. 1061.

- Wang, Z. (2018). Energy and Air Pollution. *Comprehensive Energy Systems*, 1–5, 909–949. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00127-9>
- Ware, J. H., Thibodeau, L. A., & Speizer, E. (1981). Assessment of the health effects of atmospheric sulfur oxides and particulate matter: Evidence from observational studies. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 41(October), 255–276. <https://doi.org/10.2307/3429322>
- Warheit, D. B., Hart, G. A., Hesterberg, T. W., Collins, J. J., Dyer, W. M., Swaen, G. M. H., Castranova, V., Soiefer, A. I., & Kennedy, G. L. (2001). Potential pulmonary effects of man-made organic fiber (MMOF) dusts. *Critical Reviews in Toxicology*, 31(6), 697–736. <https://doi.org/10.1080/20014091111965>
- Warren, P. (2000). Multizone Air Flow Modelling (COMIS). *International Energy Agency*, 48.
- Wu, F., Jacobs, D., Mitchell, C., Miller, D., & Karol, M. H. (2007). Improving indoor environmental quality for public health: Impediments and policy recommendations. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 953–957. <https://doi.org/10.1289/ehp.8986>
- Xia, Y., Wang, J., Gu, C., Ling, Y., & Gao, Z. (2020). *MnO₂ / Al foil decorated air cleaner with self-driven property for the abatement of indoor formaldehyde*. 382(August 2019).

CAPÍTULO 04. LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y LOS VÍNCULOS INTERNACIONALES

4.1 Introducción

La regulación sobre la calidad del aire se remonta más allá del presente siglo, incluso al considerar a este como el momento de mayor contaminación, y a su definición, como uno de los principales problemas de salud a nivel mundial (Chiesa *et al.*, 2019; Pineda Espinoza *et al.*, 2015). No cabe duda que eventos de contaminación del aire se han dado a lo largo de la historia (Sundell, 2004). Ejemplos de relevancia se ubican en el valle de Mosa (Bélgica 1930), Donora (Pennsylvania, 1948) y Londres (Inglaterra, 1952) (Ware *et al.*, 1981), por ser los casos más alarmantes. Estos proporcionaron los puntos de partida para el desarrollo de diversas acciones en primera instancia correctivas, y luego normativas del siglo XX.

Desde entonces, organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Comisión Europea (CE), el Consejo Internacional de Investigación de Edificios (CIBC), OSHA y organizaciones privadas como la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), *Action on Smoking and Health* (ASH), entre otras, y países como Estados Unidos y Canadá a través de instituciones especializadas trabajan en la elaboración de normas y directrices ante la exposición (Sáez, 2017). Por su parte, las entidades españolas se enfocan en informes, estudios y legislación relacionados a la contaminación del aire exterior, y en algunos casos incluyen apartados específicos y menciones al aire interior (AI) a falta de desarrollo autónomo. De hecho, este particular sigue siendo a día de hoy motivo de preocupación en temas de salud pública, y ello demanda su estudio sistemático. Recientemente los análisis médicos definen diversas enfermedades que se acentuaron en la antigüedad e incluyen afecciones al sistema respiratorio (Entralgo Laín, 1978). La contaminación ambiental y la deficiente calidad del aire interior ciertamente dieron alertas de graves afecciones al espacio familiar en la antigüedad y se acentúan a día de hoy.

A su vez, y desde 1946, la OMS genera diversos lineamientos relacionados a la salud a nivel mundial (PRUNEDA, 1950), no obstante, estos tienen únicamente carácter orientativo. Es justamente sobre esta situación y el carácter consultivo de diversas

entidades, que desde el 2008 la CE instala componentes comunitarios para establecer los valores límite que afectan a la salud, ya sea de carácter indicativo u obligatorio para los estados miembros (Contaminación Del Aire de Interiores y Salud, n.d.). Es decir, por primera vez se toman medidas particulares, específicas y de obligatorio cumplimiento a fin de precautelar la integridad ciudadana, ejemplo de ello, el grupo humano de 21 científicos conforman el denominado Comité Científico SCOEL (*Scientific Committee on Occupational Exposure Limits*) que desarrollan esta labor de alto nivel luego de superar grandes estándares de selección, trabajo bajo gran exigencia y cualificación (Castejón Vilella, 2017), con el objetivo de establecer los límites de concentración del formaldehído permitidos en un ambiente interior.

Para llegar a este tipo de acciones, la preocupación a nivel internacional ha alarmado, y derivado mayoritariamente en la cooperación mutua para instaurar una especie de principios mínimos de calidad de aire interior. Un ejemplo de ello es el caso de la alarma por los riesgos ante la exposición laboral al humo ambiental del tabaco (ETS). Tres grupos de interés público solicitaron a la Agencia Oficina de Seguridad y Salud en el trabajo (OSH) en mayo de 1987 la Norma Temporal de Emergencia bajo la sección 6 (c) de la Ley de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) 29 USC 655 (c). Por su parte, las organizaciones *American Public Health Association* (APHA) y *Public Citizen* (PC) presentaron una petición conjunta; *Action on Smoking and Health* (ASH) hizo lo propio. Lo cierto es que, la prohibición de fumar dentro de la mayoría de lugares interiores pasó varias instancias para que la norma incluya acciones regulatorias. Hoy a nivel mundial supone un hecho indiscutible, con o sin ella.

De otro lado, y para impulsar situaciones como la previa, la OMS ha posicionado como primera causa de muerte prematura a las enfermedades atribuibles a la deficiente calidad del aire interior (CAI) (Contaminación Del Aire de Interiores y Salud, n.d.). No obstante, la información disponible para evaluar tal riesgo es todavía limitada (Calidad Del Aire Interior, 2011). Aun así, el incremento sustancial de las afecciones por una deficiente CAI ha impulsado al menos en la comunidad europea y anglosajona, la definición reglamentos y normativas en distintos niveles y con distintas connotaciones. Aun así, estos se presentan incompletos en el ámbito de la regulación.

A nivel específico, el Comité Europeo de Normalización (CEN) y el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios y Medioambientales (CCRSM) que reemplazó al Comité Científico de Toxicidad, Ecotoxicidad y Medio Ambiente (CCTEMA) como ente asesor en materia de seguridad de los consumidores, salud pública y medioambiente, determinan mediante informe vinculante desde el año 2008 que, evaluar los riesgos para la salud desde la contaminación del AI es muy difícil, ya que puede contener más de 900 productos químicos, partículas y materiales biológicos con posibles efectos (Diario Oficial L 298/2008, n.d.). Además, los niveles de concentración de contaminantes son mayormente desconocidos, las medidas de gestión de la CAI no pueden extrapolarse y tampoco existe un registro integral sobre fuentes de contaminación. Pese a ello, es indiscutible que los efectos para la salud posicionen a las enfermedades respiratorias como las recurrentes (Wang, 2018), y que por otro lado, tampoco se descarten otras afecciones. Es decir, si bien el problema es real, el camino para resolverlo es altamente complejo.

En el ámbito de la arquitectura, inmerso en el preámbulo anterior, hablar de un AI es hablar de todo espacio en uso activo o pasivo, y al ser la CAI determinante en las condiciones de habitabilidad y convivencia saludable, la relación tripartita (arquitectura-AI-CAI) es indisoluble. A tal efecto, la presente investigación considera como marco para su desarrollo dicha relación aplicables a los ambientes no industriales, esto es, viviendas, edificios de oficinas y edificios públicos (colegios, hospitales, teatros, restaurantes, entre otros) (Guardino Solá, 1998). Es decir, aquellos espacios que potencialmente superan para su comprensión integral los límites disciplinares arquitectónica en torno a los cuales, la norma acompañada de la actuación técnica constituye un segmento de constante y continuo desarrollo. Idealmente se trataría de un ámbito tan vertiginoso como la investigación científica, sin embargo, el desarrollo histórico no lo muestra como tal, si bien la necesidad es latente y crece progresivamente.

Este preámbulo refleja el objetivo de la investigación; por un lado, recorrer los altibajos normativos y legales sobre el ambiente interior y la calidad del aire interior, pero a su vez, evidenciar los potenciales de articulación práctica en disciplinas constantemente desvinculadas como la arquitectura, pese a su vocación de aporte natural en el tema. Por otro lado, encaminar al análisis de nuevas regulaciones sobre las afecciones de nuevos contaminantes de un AI con orientación hacia lo acontecido por el confinamiento a causa del SARS-CoV-2.

El ambiente interior y la CAI constituyen segmentos de relevancia en el ámbito de la salud pública en el contexto europeo y español. Si bien el avance es significativo en los diferentes frentes normativos, existen componentes externos a la propia norma y al espíritu del comité de normalización a cargo, e incluso a la planificación macro como el caso de los planes nacionales de calidad de aire. En este escenario, el recorrido histórico sobre el AI, las fuentes de contaminación, la gestión y determinación de la CAI ofrece múltiples altibajos, así como una ruta hacia una mayor articulación interdisciplinar y desarrollo futuro.

4.2 Ambiente interior, fuentes de deterioro de la calidad del aire interior y normativa

Al no existir un ambiente interior característico o típico debido a la diversidad de espacios habitables, horarios de funcionamiento y formas de ocupación, se puede determinar al menos tres fuentes de incidencia en el deterioro de la calidad del aire interior; 1) la contaminación exterior, 2) los contaminantes que se encuentran al interior, y, 3) las deficiencias de la ventilación (García Nieto & Moarta Morales, 2018). Para cada caso existen acciones regulatorias que son objeto de revisión a nivel nacional e internacional.

4.2.1 Acciones regulatorias de contaminación exterior

La normalización sobre la contaminación ambiental hasta el actual repertorio técnico inicia mucho tiempo atrás, más en el contexto de la presente revisión identifica en la década de los 80s como una preocupación derivada de la calidad del aire exterior y su incidencia en la salud humana (Aránguez *et al.*, 1999). La gestión ambiental mundial presenta una labor continua desde marcados daños a la salud manifiesta en la normativa. En la actualidad, la contaminación ambiental tiene graves consecuencias globales, y la normativa no hace más que ratificarla sobre el hecho de que se construye históricamente bajo casos lamentables de mortandad. Además, se incrementa por efectos del virus SARS-CoV-2, enfermedad respiratoria aguda que puede conducir a la neumonía con síntomas como fiebre, tos y disnea, y también, al ser un virus de transmisión aérea deteriora al sistema respiratorio de

los seres humanos al tiempo de que la contaminación exterior con altos valores de dióxido de nitrógeno facilita su transmisión (Ogen, 2020).

En cualquier caso, y retomando el hilo histórico, las acciones primarias en este campo se remontan a 1972, cuando en la primera Cumbre de la Tierra se plantean el Acuerdo de Estocolmo que incluye el planteamiento contra la adificación, y el convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a gran distancia (CLRTAP) para la reducción de la contaminación ambiental mediante políticas y estrategias para combatir la liberación de contaminantes ambientales. Quince años más tarde, el protocolo de Montreal propone controlar la capa de Ozono, y el mismo año (1987), la OMS publica la primera edición de las *Guías de calidad del aire para Europa*, con 28 compuestos peligrosos; para el año de 1999 pasan a ser 38 y la preocupación se incrementa. Por su parte, el protocolo de Kioto (1997) lo deja ver, al ampliar la protección y mejora de los sumideros y depósitos de gases de efecto invernadero no controlados previamente (Unidas, 1997). Es decir, las acciones son progresivas y complementarias, aunque disten cuando menos una década.

En el caso de España, la primicia normativa es la Ley 38/1972 según el Real Decreto 833/1975 del 6 de febrero. Esta acción que plantea la protección de la atmósfera, promueve a través de la Directiva 96/62/CE del Consejo de 27 de septiembre de 1996, la normativa sobre evaluación y gestión de la calidad del AI o Directiva Marco (Análisis de La Calidad Del Aire En España, Evolución 2001-2012, 2012).

Este planteamiento fue posteriormente desarrollado para diferentes grupos de contaminantes a través de una serie (4) de normas conocidas como Directivas Hijas, como lo son; 1) la Directiva 1999/30/CE del Consejo, de 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de NO₂, NO, partículas de Pb en el aire ambiente (1ª Directiva Hija), 2) la Directiva 2000/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de noviembre de 2000 sobre valores límite para el C₆H₆, CO en el ambiente (2ª Directiva Hija); 3) la Directiva 2002/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de febrero de 2002 relativa al O₃ en el ambiente (3ª Directiva Hija), y 4) la Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004 relativa al As, Cd, Ni y los hidrocarburos aromáticos poli cíclicos en el ambiente (4ª Directiva Hija) (Figura 4.1).

La Ley 38/1972 se reemplaza 35 años después con la Ley 34/2007 de 15 de noviembre publicada en el BOE n 275. Con ello se incluye la noción calidad del aire, y se ratifica la necesidad de proteger la atmósfera. A detalle, el Art. 1. *Objeto* establece las bases

en materia de prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica con el fin de evitar y según sea factible, disminuir los daños que de esta pueda derivarse en la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de la naturaleza (España, 2007).

Entre el 2007 y la actualidad, la Ley 34/2007 se mantiene vigente, no obstante, el Real Decreto 355/2018 plantea la reestructuración ministerial que implica que el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) cese funciones de la entrega de informes anuales sobre la calidad del aire, y que se encargue el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (BOE 4/2015, 2015). Desde entonces, esta entidad coordina los informes de calidad del aire y la formulación de los planes nacionales de calidad de aire en España, a través de sus redes de comunidades autónomas. A su vez, las redes autónomas incluyen entidades locales como es el caso el Ayuntamiento de Madrid y el de Zaragoza que mediante estaciones meteorológicas indican la calidad del aire. Las zonas rurales remotas son analizadas a través de la Agencia Española de Meteorología (AEMET).

Por su parte, la OMS aporta en el 2015 con el proyecto de hoja de ruta para reforzar la respuesta mundial a los efectos adversos de la contaminación del AE en la salud tomando en cuenta la resolución WHA68.8 (Salud, 2015). El punto de partida fue el Acuerdo de París del año 2015 que buscaba reducir la emisión de los gases de efecto invernadero y los contaminantes atmosféricos insalubres tales como las partículas contaminantes y el hollín (Partes, n.d.). Esto exigía además la identificación de muchas tecnologías y políticas ineficientes que generan emisiones de contaminantes relacionadas con el clima. Es decir, la regulación ambiental del aire y su recuento nos ubica en el proceso complejo a lo largo del tiempo; en este esfuerzo por normar y controlar las emisiones contaminantes, los procesos de control apuntan hacia la reducción de contaminantes y sustancias peligrosas, mismas que posteriormente ingresan al ambiente interior pero que, en efecto, presenta un nivel de desarrollo bastante menor.

Finalmente, cabe acotar que actualmente, propuestas internacionales como el Programa Macro de Investigación e Innovación de la Unión Europea Horizonte 2020 encuentra su asidero de aplicación contemporánea a través de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Al tiempo permiten armonizar los planes nacionales con los compromisos mundiales de los países (La Agenda Para El Desarrollo Sostenible – Desarrollo Sostenible, n.d.) en materia de salud, bienestar,

disminución de la contaminación, energías limpias, producción responsable y otros. Y, de hecho, las reducciones de la carga de morbilidad por enfermedades relacionadas con la contaminación del aire (interior y exterior) permiten dar seguimiento a la consecución del ODS 3 (O. M. de la S. OMS, 2016)¹.

4.2.2 Contaminantes del ambiente interior y acciones normativas

Un ambiente interior con menor cantidad de contaminantes dañinos a la salud es una prioridad actual. Los problemas de mala CAI son recurrentes en todos los tipos, estados de conservación y antigüedad de los edificios. Reportes del Instituto de Estadística de España (IEE) del año 2018 indican las graves afecciones respiratorias que se producen por un ambiente interior de baja calidad, y el hecho de que los casos de deceso por afecciones al sistema respiratorio se ubican en el tercer lugar (Ruíz, 2019) a nivel nacional. Para el año 2020 estos valores podrían variar por el tránsito de la emergencia sanitaria asociada al SARS-CoV-12. Por ello, y otras acciones antrópicas cotidianas, el estudio del ambiente interior y la CAI se incrementarían, y con ello, las determinantes a gestionar a nivel normativo y práctico.

Por su parte, las regulaciones para la CAI (Figura 4.1) se inician en el año de 1980 con el RD 1618/1980 que aprueba el reglamento de instalaciones de calefacción climatización y agua caliente, a la par de la aprobación de AENOR a través del RD 1614/1985, del primero de agosto. En particular, sobre aire interior el Art. 13 describe la instrucción técnica para las instalaciones de calefacción y el mantenimiento de los niveles de temperatura (Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua Caliente, 1980). Nueve años más tarde, la evolución de la normativa se concreta el RD 1406/1989 del 10 de noviembre, en el que se establecen limitaciones a la comercialización y el uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos. Pese a la evidente connotación científica de la norma, las valoraciones empíricas de la CAI también se consideran. A través de la percepción sensorial se valora un ambiente interior con baja calidad y es fácilmente reconocido a través del olfato (Klaassen & Watkins, 1999). De hecho, la sensación resultante de la recepción de un estímulo por el sistema sensorial olfativo es considerada como el primer ensayo para la determinación de una deficiente CAI, y seguramente, fue el indicio primigenio para el posterior estudio teórico.

¹ Otros ODS asociados son el 7 y 11, además de las metas 3.9, 7.1 y 11.6.

Pese a ello, esta valoración sensitiva se trata a penas en 1990 en el Comité Europeo para la estandarización (CEN), que en lo posterior constituye un comité técnico (TC264) para desarrollar una propuesta de estándar que derivó en la norma prEN13725 (Rey Martínez & Ceña Callejo, 2006).

Figura 4.1 Síntesis de cuerpos normativos españoles y los vínculos europeos y mundiales. Fuente: Presidencia de Gobierno 16729, Ministerio de Vivienda 18400, Boletín Oficial del Estado (BOE) Legislación Consolidada. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Para el año 1998, mediante el RD 1751/1998 del 31 de julio se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (Secretario *et al.*, 1998) que contempla atender los requisitos de bienestar térmico y de higiene en los edificios, se procede a ingresar a la limpieza interior de un ambiente interior, y consecuentemente, al ingreso de contaminantes químicos. No obstante, no es solo hasta el año 2003 que mediante el RD 117/2003 se establecen límites de emisiones de COVs. El Art. 01 plantea evitar o reducir los efectos directos o indirectos de las emisiones de COVs sobre el medio ambiente y la salud de las personas; además, contempla en el anexo I los límites para la actividad de limpieza de superficies (Real Decreto 117/2003, de 31 de Enero, Sobre Limitación de Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Debidas Al Uso de Disolventes En Determinadas Actividades, 2003).

En adelante, en el año 2007 se aprueban el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios mediante el RD 1027/2007 del 20 de julio, y el Código Técnico de la Edificación (CTE) mediante el RD 1371/2007 de 19 de octubre, que viabilizan concretamente las acciones de prevención y corrección conjuntamente. En términos específicos, el CTE establece los requisitos básicos relativos a seguridad y habitabilidad a cumplirse en los edificios.

Desde 2008, la UE a través del Parlamento Europeo presenta una resolución de la Directiva 2008/50/CE referente a la calidad del aire ambiente. Esta delega a la Comisión Europea el proponer una lista de sustancias a prohibirse, diferenciar los ambientes interiores a analizar, mantenimiento del aire acondicionado y ventilación, y normas para edificios abiertos al público (*Texte Adopté Du Parlement, Lecture Unique*, 2019). Es decir, antes del año 2008 no existen consideraciones específicas sobre el AI o la CAI vinculados a los espacios interiores, a la edificación o a la habitabilidad en general.

Por otro lado, para analizar la CAI de un ambiente interior preexistente se recurre a documentos normativos tipo UNE² creados en los Comités Técnicos de Normalización (CTN), y de acuerdo con el reglamento interior de CEN/CENELEC. En consecuencia, es obligatorio el adoptar la norma europea del CEN de Comisión Europea CEN del cual se desarrollan; AEN/CTN GET 15/GT 3 *Salud seguridad y*

² Antes denominada AENOR, designada por Orden del Ministerio de Industria y Energía, de 26 de febrero de 1986. de acuerdo con el Real Decreto 1614/1985, de 1 de agosto, queda reconocida como Organismo de normalización de los establecidos en el capítulo II del Reglamento que se aprueba por este Real Decreto.

medio ambiente, AEN/ GET 15/4 *Especificaciones en materiales*, AEN/CTN 77 *Medio Ambiente*, AEN/CTN 171 *Calidad ambiental en interiores*, AEN/CTN 81 *Prevención y medios de protección personal y colectiva*, AEN/CTN 100 *Climatización*, cuyas secretarías desempeña AENOR e INSHT respectivamente y elaboran desde 1985 el conjunto de normas vigentes a la fecha

Tales instrumentos han facilitado la caracterización del ambiente interior (UNE 77204), la identificación de fuentes de contaminación y el mecanismo de medición de contaminantes (UNE 77233, UNE 77213, UNE-EN ISO 14956, UNE EN 13528, UNE-EN 14662, UNE EN ISO 16000, UNE-EN ISO 13138, UNE-CEN/TR 16269 IN, UNE-EN 16516), el diagnóstico del ambiente interior y determinación de la calidad del aire interior (UNE 17330) y la gestión de los ambientes interiores (UNE-EN ISO 14644, UNE 17330) (Tabla 4.1). No obstante, no solo se debería realizar un estudio para la CAI de un ambiente edificado, el planteamiento va dirigido hacia los ambientes interiores que se van a proyectar. Por ello, es ideal adicionar la normativa de características de la materialidad constitutiva de los productos de construcción y de los propios materiales (Jesús & García, 2006), a fin de evaluar desde el proceso de elaboración, la reducción de contaminación por CO₂ o escenarios de contagio viral, por ejemplo. En este camino, la norma UNE-EN ISO 16000-10 del año 2009 analiza la emisión de COV de los productos de construcción y del mobiliario. Igual es el caso del Reglamento (UE) 605/2014 de la CE /categoría 1b) que define como cancerígenas a la radiación emitida por los materiales de construcción y el formaldehído en concreto.

Por su parte, desde el año 2019 el Ministerio de Fomento, de la Secretaría de Estado de infraestructura, Transporte y Vivienda de la Secretaría General de Vivienda, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, aportan con el Documento Básico Hs, el cual a su vez incluye en el segmento HS 3 el componente de calidad del aire interior y la disponibilidad de recintos ventilados, para eliminar los contaminantes producidos de forma frecuente en el uso del espacio interior, y garantizar caudales suficientes que provienen de la ambiente exterior (Vivienda, 2006). Para el caso del material particulado y específicamente las PM_{2.5} y PM₁₀ que llevan seis criterios de contaminación que están normados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Normativa de Calidad del Aire elaborada por la Asociación Española de Normalización (AENOR)

Código Técnico de Normalización	Descripción de la Norma	Observaciones
CTN GET 15/GT 3	Salud, seguridad y medio ambiente	36 normas vigentes, 33 normas anuladas; por ejemplo, UNE 77213:1997, UNE-CEN/TR 17238:2018 (RATIFICADA), UNE-EN ISO 13408-7:2015
CTN GET 15/GT 5	Análisis químico de superficies	5 normas vigentes, 4 normas anuladas. La mayoría de normas son referenciadas a alimentos y superficies silicatadas.
CTN 40/GT 10*	Micro plásticos de origen textil	7 normas vigentes, 4 normas anuladas. Normas referenciadas a los materiales plásticos que conducen el agua, y las envolturas de los alimentos, no existe la norma que regule el microplástico que se encuentre en un ambiente interior.
CTN 77	Medio Ambiente	1241 normas, entre el control de calidad del agua y la calidad ambiente, se tiene normas similares a CTN 77/SC2; UNE 77204:1998, y se debe seleccionar entre las de calidad del aire.
CTN 77/SC2	Aire	165 normas vigentes, 82 normas anuladas; por ejemplo, UNE 77204:1998, UNE 77217:1995, UNE 77231:1997, UNE-EN 14902:2006/AC:2006
CTN 81/SC 4/AHG	Formaldehído	31 normas vigentes, 22 normas anuladas; por ejemplo, UNE 77260-3:2004, UNE 81589:2018, UNE-CEN/TS 13130-23:2007 EX, UNE-EN ISO 105-X09:1996, UNE-EN ISO 14527-1:2000, UNE-ISO 16000-4:2019
CTN 100/GT 10	Calidad del ambiente interior	No existen normas en esta categoría
CTN 100/GT 12	Legionela	Crecimiento de la legionela en las instalaciones de distribución de agua de consumo humano en el interior de los edificios. 1 norma vigente y 3 normas anuladas
CTN 171	Calidad ambiental en interiores	24 normas vigentes, 2 normas anuladas; por ejemplo, UNE 171212:2008, UNE 171330-1:2008, UNE-CWA 15793:2013, UNE-EN ISO 16000-10:2006, UNE-EN 16516:2018
CTN 171/SC 3/GT 7	Amianto	5 normas vigentes, 18 normas anuladas; por ejemplo, UNE 171370-1:2014, UNE 77236:1999, UNE 77253:2003, UNE 81752:2006, UNE 88412:2006
CTN 81/SC 4	Energía y medio ambiente	

* Este conjunto de normas determinan el contenido de este material en el agua y envolturas de alimento, pero al momento no existe ensayos que den alcance a la determinación de microplástico en un ambiente interior.

Tabla 4.1: Reporte sintético de normativa española sobre calidad del aire interior. Fuente: Portal AENOR de la Asociación Española de Normalización 2020.
Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

En resumen y de manera global, un análisis detallado de la calidad del aire interior se podría realizar con base en ensayos técnicos y la aplicación de 25 normas vigentes y 10 normas anulada, pero potencialmente complementarias, recogidas en el CTE (CTN171, 2018). Es evidente también que, en su integridad la norma, los ensayos y las valoraciones se mantienen en desarrollo y transformación. De hecho, la Directiva (UE) 2019/904 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 se pronuncia en la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente. Acciones antropogénicas como las anteriores cubren las necesidades actuales, pero repercuten en daños en la salud humana y se requiere tomar prevenciones (Reducción Del Impacto de Determinados Productos de Plástico En El Medio Ambiente, 2019). Si bien el coste relativamente económico del plástico hace que este material se haga omnipresente en un AI (Gasperi et al., 2018), el coste ambiental y humano de su utilización exhaustiva ratifica aplicar la norma para la toma de decisiones sobre el partido arquitectónico de todo tipo de espacios de producción o restauración.

4.3 La ventilación y acciones de normativas

Una mejora para la CAI es la ventilación, y las primeras regulaciones internacionales sobre ventilación coinciden con tal mejora. En el caso francés, la ventilación y la aireación obligatorias de los edificios están previstas en la reglamentación para la construcción desde 1955 y se buscaba combatir el envenenamiento por CO. Asimismo, la reactivación de una política de reducción de las viviendas precarias en 1970 (*Loi Vivien*) introduce el mismo requisito de ventilación para los edificios existentes (Le Bourhis, 2019). Cerca de 3 décadas más tarde, se elabora a través del CEN CR 1752 Ventilación para edificios, y con él, los criterios de diseño para el ambiente interior y caudales mínimos de ventilación que anulen o reduzcan los riesgos para la salud.

Desde entonces múltiples aportes se han sumado; la ASHRAE desde el año 1990 define equipos y métodos para evaluar la difusión del aire en los ambientes interiores tratados con sistemas HVAC. Por su parte, la OSHA desde 1991 emite conjuntamente con la mejora de calidad del aire interior, los lineamientos del rendimiento de los sistemas de ventilación. En junio del 2007, la OMS publicó las guías sobre la prevención y el control de las infecciones denominadas *Prevención y*

control de infección en enfermedades respiratorias agudas con tendencia epidémica y pandémica durante la atención sanitaria: Guías provisionales de la OMS (WHO, 2007). En estas guías, la ventilación natural se considera por primera vez como una de las medidas eficaces de control de las infecciones en entornos de atención de la salud.

En el ámbito español, la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, y en concreto en el RD 486/1997 del 14 de abril publicado en el BOE 23/4/97, fija las *Disposiciones Mínimas de Seguridad y Salud en los lugares de trabajo*. En su contenido se referencia la temperatura, humedad relativa y velocidad de aire como determinantes de la habitabilidad, pero, sobre todo, la renovación mínima del aire en locales de trabajo. En específico el CTE dispone que para mejorar la CAI en viviendas debe disponerse de un sistema general de ventilación mecánica o híbrida, pero además hacer un análisis de ventilación y el manejo de caudales óptimos y la renovación del AI.

Hasta este punto parece sencilla la solución, sin embargo, variadas fuentes contaminantes que afectan la salud humana se encuentran dispersas en un AI y provocan baja CAI; al inducir ventilación mecánica (Hernández, 2004) por ejemplo, como la más común, se aporta con mayores problemas a la habitabilidad. A esto se suma el hecho de que, los materiales de construcción y las sustancias introducidas en cualquier edificio durante el uso y ocupación aportan progresivamente a la deficiente calidad del aire interior (Persily & Hewett, 2010), incluso es imperceptible pero capaz de derivar en afecciones por efecto acumulado.

Tampoco debe descartarse que, un AI con alta concentración de seres humanos genera presencia, circulación y estancamiento de virus, por lo que, la ventilación es una acción que se recomienda y minimiza la recirculación del aire. Bajo estas consideraciones hacia el año 2006, la Norma Técnica de Prevención 742 (NTP) define que el número de contaminantes de un ambiente interior pueden ser elevados y variados; más los niveles de concentración son aún más variados y su determinación depende de varios factores que son causa de estudios puntuales con resultados de alta y baja concentración (Gunschera *et al.*, 2013).

Trece años después, la norma UNE-CEN/TR 16798-2: 2019³ incluye las mejoras de

³ La norma en cuestión titula de manera íntegra: UNE-CEN/TR 16798-2: 2019 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación para edificios Parte 2: Interpretación de los requisitos de la Norma EN 167 98-1. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la

las normas tratadas en el CTN 100/GT 2, Ventiladores y ventilación y CTN 100/ GT 6 Bombas de Calor/ acondicionadores de aire que en su contenido se encuentran 156 normas vigentes y 45 normas anuladas, proyectando una mejora potencial a la calidad del aire interior. Sin embargo, a ciencia cierta, mejorar la calidad del aire interior en un ambiente interior, no evidencia a día de hoy una solución efectiva, tanto a nivel español como en la proyección internacional en sentido general.

4.3.1 Gestión pública actual y proyección desde la calidad del aire interior

La prevención de contaminación en ambientes interiores tiene vigencia desde hace pocas décadas como se describe anteriormente, más desde comienzos del siglo XXI se enfoca a cuestiones más específicas (Ferron & Crespín, 2016). Si bien el recuento de normativas, en general se reconoce de manera específica el peligro asociado a las exposiciones del ser humano en ambiente interior, el debate sigue siendo sobre el control y los medios de protección individuales o, por el contrario, las intervenciones y cuidados colectivos, en particular mediante reglamentos dirigidos a los contaminantes o prácticas en cuestión. Desde este punto de vista, la calidad del aire interior se enlaza a algunos problemas de salud pública como el tabaquismo o la obesidad, lo que también plantea la cuestión de la autonomía de las prácticas individuales y el papel vinculante de los poderes públicos (Le Bourhis, 2019).

En última instancia, el ambiente interior, y la calidad del aire interior, a más de exponer a través de la normalización de los recursos para su gestión integral, evidencian a través de la factibilidad técnica su implementación territorial algunas variables de inequidad. Para tal efecto, la *Hoja de ruta para reforzar la respuesta mundial a los efectos adversos de la contaminación del aire en la salud* establece como prioritario abordar los determinantes sociales de la salud relacionados con el desarrollo en los entornos urbanos y rurales, incluida la erradicación de la pobreza, como elemento indispensable del desarrollo sostenible y para reducir el impacto sanitario de la contaminación del aire interior asociado a la quema de combustibles, y abogar por enfoques intersectoriales de acción sanitaria (O. M. de la S. OMS, 2016), es decir, implementar la equidad sanitaria mediante una gestión comunitaria.

De otro lado, y de cara a la pandemia 2019-2020, es claro reconocer que el

calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido (Módulo 1-6). (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en junio de 2019).

confinamiento domiciliario y el aislamiento social, al tiempo de resguardar a la población del SARS-CoV-2, ha expuesto a gran parte de ella a fuentes permanentes de contaminación de un ambiente interior y a muy bajos niveles de calidad del aire interior. Centros hospitalarios saturados, o unidades habitacionales distantes de garantizar habitabilidad y confort, son ejemplos concluyentes. También es importante acotar que la falta evidente de gestión pública frente a problemas evidenciados por la OMS en junio del año 2007 (Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud, 2009) en torno al confinamiento, ya se recogían en las *guías de Prevención y control de infección en enfermedades respiratorias agudas con tendencia epidémica y pandémica durante la atención sanitaria*, y tienen como objeto describir los principios básicos sobre diseño, construcción, funcionamiento y mantenimiento de un sistema de ventilación natural eficaz para el control de infecciones.

Varios estudios recientes determinan que el virus SARS-CoV-2 puede generar mayor incidencia en espacios geográficos con mayor contaminación exterior como es el caso del contaminante dióxido de nitrógeno que en grandes concentraciones generan hipertensión en las personas (Shin *et al.* 2020) y que el virus afecta a exposición a largo plazo al NO₂ en la mortalidad por coronavirus. Es un ejemplo que pone en evidencia que una contaminación exterior puede ocasionar incrementos de contagios por el SARS-CoV-2 y que se debe tomar en consideración aún más a las regulaciones de la contaminación del aire exterior.

Si las incidencias del aire exterior son una fuente de contaminación del aire exterior y esta se considera en valores a 5 veces por contaminación del aire interior, que es el lugar en donde se desarrolla el ser humano por casos de confinamiento, es importante poner en consideración que la expansión del virus se produce por contagio a través partículas o gotas con un diámetro superior a 100 μm capaces de impulsarse a través del aire por distancias cortas (menores a 1m) y se depositan en superficies animadas o inanimadas. Por otro lado, las gotas más pequeñas (o aerosoles, generalmente de menos de 10 μm de tamaño) o los residuos de partículas pequeñas de las gotas evaporadas generalmente se transportan por el aire (más de 1,8m) y se arrastran en el aire durante un período prolongado y pueden asentarse en las áreas circundantes y objetos (Li *et al.* 2004; Kutter *et al.* 2018; Su *et al.* 2020; Xuan, Rayner & Luo 2020) a temperatura ambiente hasta por 9 días, lo que puede explicar la infección de portadores asintomáticos (Kutter *et al.* 2018).

En el mismo tema, como parte de las recomendaciones generalizadas para combatir el contagio se encuentra la desinfección de superficies de contacto frecuente, plenamente aplicable al caso de objetos y artefactos incluso en el ámbito del material cultural, sin embargo, son de poco calado en el caso de elementos o entidades arquitectónicas que no solo están en contacto con el ser humano, sino que lo contienen.

De esta manera, el considerar que la permanencia de SARS-CoV-2 es viable en superficies de cobre, cartón, acero inoxidable, y plástico por 4, 24, 48 y 72 horas, respectivamente cuando se mantiene a 21-23° C y con 40 % de humedad relativa (Van Doremalen *et al.* 2020); en superficies de papel, a 22° C y con 60 % de humedad durante 3 horas, en madera, ropa o vidrio, entre 1 y 2 días, y más de 4 en acero inoxidable, dinero y mascarillas (Chin *et al.* 2020), las limitaciones crecen. En inicio porque gran parte de los elementos muebles que componen un ambiente interior de definen por los materiales detallados, luego por la imposibilidad de mantener un ambiente aséptico a tal magnitud en condiciones domésticas, y en última instancia, porque los productos de limpieza higiénica ya sea convencional o farmacéutica son fuentes de contaminación del ambiente interior (Li *et al.* 2017; Larrea-Killinger, Muñoz, & Mascaró 2017).

Esta dicotomía tiende a forzar severamente las condiciones de exposición del ser humano, ya sea a fuentes directas de emisión de contaminantes como los materiales de construcción (Missia *et al.*, 2010), o en su defecto exponerse al contagio de enfermedades que como el SARS-CoV-2 coexisten con él. En ambos casos se posiciona a la salud colectiva como el foco de interés ya sea para garantizar el confinamiento sin afecciones posteriores, o para atender la crisis humanitaria, ambos escenarios recaen a su vez en la ética y responsabilidad profesional (*Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Profesionales - Documentos Técnicos Para Profesionales - Coronavirus*, n.d.).

4.4 Conclusiones

Como proceso histórico la construcción de insumos técnicos y normativos deja ver a nivel español, europeo y anglosajón las preocupaciones temporales de la gestión pública con el apoyo de la académica y científica, al punto de constituirse en un corpus teórico y práctico que consolida la postura sobre el ambiente interior, la

calidad del aire interior, así como su trascendencia sobre el hábitat saludable. Este panorama extrapolable a otras geografías particulares y el estudio prospectivo del ambiente interior y la CAI es un segmento de interés entre disciplinas, cuyos esfuerzos aunados suponen garantizar el cumplimiento normativo vigente en diferentes niveles de injerencia político y relevancia social, y a su vez, desarrollar medidas futuras, para superar la actuación arquitectónica de carácter reparadora.

Las políticas sobre el ambiente interior han afirmado predominantemente el carácter privado y la responsabilidad individual de las medidas preventivas. Los valores límite y umbrales de peligro, incluyendo su determinación, hacia la salud humana son asumidos por actores públicos, pero la intervención sobre la contaminación interior ha seguido siendo la principal responsabilidad de los ocupantes de los locales de cualquier tipo que estos sean. Estos a su vez, están llamados a reaccionar adoptando buenas prácticas de ventilación, asegurando el autocontrol y comprando productos recomendados por el etiquetado normalizado, no obstante, se tratan de medidas insuficientes y de difícil monitoreo. En este sentido, conforme se estipula la normativa, el usuario debe aportar con acciones capaces de mejorar la calidad del aire interior, pero sobre la base del conocimiento efectivo de su importancia y trascendencia en la salud.

Se debe remarcar también que, las normas ante incumplimiento en la mejora de la calidad del aire interior a nivel español, carecen de aplicabilidad y es necesario tomar referentes vecinos que actúan y fundamentan su aplicabilidad en el aporte individual. Asimismo, la mayoría parte de la normativa española como internacional sobre calidad del aire interior apunta a edificaciones de carácter público, por lo que, la presente investigación ha buscado evidenciar la importancia del mismo tratamiento para las edificaciones no industriales, entre las cuales la importancia de aplicación en la vivienda en general es superior y debería acometerse lo antes posible.

Finalmente, hablar de normativa de ambiente interior y calidad del aire interior es complejo, y a través de la revisión presentada se logra a penas contextualizar. La definición, alcance y aplicabilidad ratifican lo previo, y la extensión disciplinar también. No obstante, al acercarse a las dimensiones socio económicas puede incluso ser utópico. Ni el ambiente interior ni la calidad del aire interior pueden desarticularse de otros componentes como la desigualdad social, la operatividad del sistema de salud público o el diseño arquitectónico y la construcción, lo cual deviene

en una maraña de implicaciones técnicas, legales y éticas, que frenan en buena medida la aplicación, pero ciertamente son las últimas las que presentan el escenario más desfavorable. El tratamiento de las superficies de materiales de construcción y regulaciones sobre los mismos son alternativas que se deben considerar bajo la observancia y participación arquitectónica, más cuando existen contaminantes aéreos como el SARS-CoV-2 que mantiene en confinamiento general y que más datos de indagación indican su propagación por acción de los mismos o en el caso de la contaminación exterior que aporta en el aumento de casos de mortandad.

4.5 Referencias

- Adán, A., & Huber, D. (2011). Análisis de datos 3D para generación automática de modelos BIM de interiores habitados. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 8(4), 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.010>
- Adhanom, T. (2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas*. OMS. <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Alonso, P., & Valeska, E. (2014). *Análisis técnico y constructivo de los tableros de madera y su uso en la construcción*.
- Alsmo, T., & Holmberg, S. (2007). *Sick Buildings or Not : Indoor Air Quality and Health Problems in Schools*. 16(6), 548–555. <https://doi.org/10.1177/1420326X07084414>
- Alvarado, M. J., McVey, A. E., Hegarty, J. D., Cross, E. S., Hasenkopf, C. A., Lynch, R., Kennelly, E. J., Onasch, T. B., Awe, Y., Sanchez-Triana, E., & Kleiman, G. (2019). Evaluating the use of satellite observations to supplement ground-level air quality data in selected cities in low- and middle-income countries. *Atmospheric Environment*, 218(November 2018), 117016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117016>
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 123–132. <https://doi.org/10.1590/s1135-57271999000200003>
- Arya, S. P. (2001). Introduction to Micrometeorology. In R. Dmowska, J. Holton, & T. Rossby (Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Second Edi, Vol. 79, Issue 9).
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2014). Formaldehído 4.15. *La Evolución*, 3(34), 237–254. <http://www.anla.gov.co/documentos/Guia15.pdf>
- Ayyagari, V. N., Januszkiewicz, A., & Nath, J. (2004). Pro-inflammatory responses of human bronchial epithelial cells to acute nitrogen dioxide exposure. *Toxicology*, 197(2), 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2003.12.017>

- Basta, A., Serror, M. H., & Marzouk, M. (2020). A BIM-based framework for quantitative assessment of steel structure deconstructability. *Automation in Construction*, 111(October 2019), 103064. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103064>
- Bluyssen, P. M., Aries, M., & van Dommelen, P. (2011). Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project. *Building and Environment*, 46(1), 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.024>
- BOE 4/2015. (2015). Boletín Oficial del Estado. *Boletín Oficial Del Estado*, 61561–61567.
- Bourdin, D., Mocho, P., Desauziers, V., & Plaisance, H. (2014). Formaldehyde emission behavior of building materials : On-site measurements and modeling approach to predict indoor air pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.065>
- Brown, M., Haselsteiner, E., Apró, D., Kopeva, D., Luca, E., & Pulkkinen, K. (2017). *Restorative to Regenerative RESTORE Working Group One Report : Restorative Sustainability Project Name REthinking Sustainability TOwards a Regenerative Economy*.
- Burrowes, K. S., Swan, A. J., Warren, N. J., & Tawhai, M. H. (2008). Towards a virtual lung: Multi-scale, multi-physics modelling of the pulmonary system. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1879), 3247–3263. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0073>
- Cakmak, S., Dales, R. E., Liu, L., Kauri, L. M., Lemieux, C. L., Hebborn, C., & Zhu, J. (2014). Residential exposure to volatile organic compounds and lung function: Results from a population-based cross-sectional survey. *Environmental Pollution*, 194, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.020>
- Calidad del aire interior*. (2011). https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/contaminacion-aire-interior/index.htm
- Cao, Z., Wang, M., Chen, Q., Zhu, C., Jie, J., Li, X., Dong, X., Miao, Z., Shen, M., & Bu, Q. (2019). Spatial, seasonal and particle size dependent variations of PAH contamination in indoor dust and the corresponding human health risk. *Science of the Total Environment*, 653, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.413>
- Caraballo, J. M. S. (2012). Características fisicoquímicas de los gases y partículas contaminantes del aire. Su impacto en el asma. *Iatreia*, 25(4), 369–379.
- Carazo Fernández, L., Fernández Alvarez, R., González-Barcala, F. J., & Rodríguez Portal, J. A. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- Texte adopté du Parlement, lecture unique, 2246 7 (2019).
- Castejón Vilella, E. (2017). Propuesta europea sobre los valores límite del formaldehído. *MC Salud Laboral*, 14–17.
- Chiesa, M., Urgnani, R., Marzuoli, R., Finco, A., & Gerosa, G. (2019). Site- and

- house-specific and meteorological factors influencing exchange of particles between outdoor and indoor domestic environments. *Building and Environment*, 160(May). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106181>
- Clerbaux, C., Coheur, P., Scharf, O., & Hurtmans, D. (2009). The potential of MTG-IRS and S4-TIR to detect high pollution events at urban and regional scales. In *Carbon* (Issue December 2008).
- Contaminación del aire de interiores y salud*. (n.d.). Retrieved October 23, 2019, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Cooke, T. F. (1991). *Indoor Air Pollutants A Literature Review*. 9(3). <https://doi.org/10.1515/reveh.1991.9.3.137>
- CTN171, C. T. (2018). *Norma Española Productos de construcción : Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas Determinación de las emisiones al aire interior*.
- Delfino, R. J., Sioutas, C., & Malik, S. (2005). Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 934–946. <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>
- Diario Oficial L 298/2008*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2008:298:FULL&from=FR>
- Reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente, 2019 1 (2019).
- Eastman, C. (2016). *BIM Handbook BIM Handbook Rafael Sacks*.
- Entralgo Laín, P. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. Salvat Editores (Ed.)). file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf
- Entralgo, P. L. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. SALVAT EDITORES (Ed.); Primera ed). file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf
- ESA - Call for Media: Last glimpse of the Sentinel-6 satellite*. (n.d.). Retrieved January 22, 2020, from https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Call_for_Media_Last_glimpse_of_the_Sentinel-6_satellite
- Real Decreto 117/2003, de 31 de enero, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades, Boletín Oficial del Estado 5030 (2003).
- España. (2007). Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. *Boletín Oficial Del Estado*, 16 noviembre de 2007 (275), 46962–46987.
- Espinoza Molina, C., & Palacios Espinoza, E. (2013). UNIVERSIDAD DE CUENCA - TESIS.pdf. *Articulo Ecuador*, 1(5), 1–127.
- European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe. In *EEA Report No 4/2012* (Issue 9). <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>

- Fan, Y., Deng, C., Zhang, X., Li, F., Wang, X., & Qiao, L. (2018). Numerical study of CO₂-enhanced coalbed methane recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 76(June), 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.016>
- Fernández Tena, A., & Casan Clarà, P. (2012). Depósito pulmonar de partículas inhaladas. *Archivos de Bronconeumología*, 48(7), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.02.003>
- Ferron, B., & Crespin, R. (2016). An Acceptable Daily Intake of Bad News . Public / Private Problems and Media Trivialization of Environmental Health Issues : The Case of Indoor Air Pollution in France. *Politiques de Communication*, 7(May), 151–181.
- García Nieto, A., & Moarta Morales, I. (2018). Calidad del ambiente interior en edificios de uso público. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 119. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- Ghio, A. J., Funkhouser, W., Pugh, C. B., Winters, S., Stonehuerner, J. G., Mahar, A. M., & Roggli, V. L. (2006). Pulmonary fibrosis and ferruginous bodies associated with exposure to synthetic fibers. *Toxicologic Pathology*, 34(6), 723–729. <https://doi.org/10.1080/01926230600932448>
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2018). *2018 Global Status Report*. 325. [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018 GlobalABC Global Status Report.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20Global%20Status%20Report.pdf)
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudios Avanzados*, 21(59), 7–20.
- Graham, C., Laffan, K., & Pinto, S. (2018). Well-being in metrics and policy. *Science*, 362(6412), 287–288. <https://doi.org/10.1126/science.aau5234>
- Guardino Solá, X. (1998). Calidad del aire interior. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo*, 44.1-44.33. <https://doi.org/10.1590/S1020-49891998001200018>
- Guerrero, L. F. (2015). Sostenibilidad y conservación del patrimonio edificado. *Palapa*, 3(17), 102. https://www.researchgate.net/publication/303369539_Sostenibilidad_y_conservacion_del_patrimonio_edificado
- Gunschera, J., Mentese, S., Salthammer, T., & Andersen, J. R. (2013). Impact of building materials on indoor formaldehyde levels: Effect of ceiling tiles, mineral fiber insulation and gypsum board. *Building and Environment*, 64, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.001>
- Harrison, R. M., Delgado-saborit, J. M., Baker, S. J., Aquilina, N., Meddings, C., Harrad, S., Matthews, I., Vardoulakis, S., & Ross Anderson, H. (2009). Measurement and Modeling of Exposure to Selected Air Toxics for Health Effects Studies and Verification by Biomarkers. In *Health Effects Institute* (Issue 143).

- https://www.researchgate.net/publication/40648065_Measurement_and_modeling_of_exposure_to_selected_air_toxics_for_health_effects_studies_and_verification_by_biomarkers/link/00b7d5194d22cead35000000/download
- Headquarters Corporata. (2014). Carbon dioxide. *Air Products and Chemicals, Inc.*
- Hematabadi, H., Behrooz, R., Shakibi, A., & Arabi, M. (2012). The reduction of indoor air formaldehyde from wood based composites using urea treatment for building materials. *Construction and Building Materials*, 28(1), 743–746. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.018>
- Hernández, A. (2004). NTP 742: Ventilación general de edificios. *Insht*, 9. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NT P/Ficheros/701a750/ntp_742.pdf
- Herrero Uceda, M. (2007). Árboles e insectos : *Foresta*, 37, 63–67.
- I. Leirós, L. (2009). Historia de la Ergonomía, o de cómo la Ciencia del Trabajo de basa en verdades tomadas de la Psicología. *Revista de Historia de La Psicología*, 30(4), 33–53. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3130680>
- IARC Working Group. (2004). INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Formaldehyde , 2-Butoxyethanol. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol62/>.
- Issn, L. A. (2012). Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm10. *Luna Azul*, 34, 195–213. <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.12>
- Jackson, R. J., & Cummins, S. K. (2001). The built environment and children's health. *Pediatr Clin North Am*, 48, 1241–1252.
- Jesús, G. M., & García, J. (2006). *Assessment of the decrease of CO 2 emissions in the construction field through the selection of materials : Practical case study of three houses of low environmental impact*. 41, 902–909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Kam, W., Cheung, K., Daher, N., & Sioutas, C. (2011). Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro. *Atmospheric Environment*, 45(8), 1506–1516. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.049>
- Kerns, W. D., Pavkov, K. L., Donofrio, D. J., Gralla, E. J., & Swenberg, J. A. (1983). Carcinogenicity of Formaldehyde in Rats and Mice after Long-Term Inhalation Exposure. *Cancer Research*, 43(9), 4382–4392.
- Kershaw, Y. (1998). VOC legislation on the threshold of change. *European Coatings Journal*, 49(4), 230–235.
- Klaassen, K. D., & Watkins, J. B. (1999). *Manual de Toxicología*. http://www.ghbook.ir/index.php?name=های_رسانه_و_فرهنگ&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chkhask=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component
- Kleinstreuer, C., & Zhang, Z. (2010). Airflow and Particle Transport in the Human

- Respiratory System. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(1), 301–334. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145453>
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- La Agenda para el Desarrollo Sostenible – Desarrollo Sostenible*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Laird, T. (1997). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th Edition VCH: Weinheim, Germany. 1996/1997. Section A, 28 vols. Section B, 8 vols. DM 19 400. *Organic Process Research & Development*, 1(5), 391–392. <https://doi.org/10.1021/op970020u>
- Le Bourhis, J.-P. (2019). Du prive au public et retour. Les politiques de l'air intérieur entre regulation et responsabilisation. *Environnement Risque Sante*, 18, 318–322.
- Lee, K. P., Barras, C. E., Griffith, F. D., Waritz, R. S., & Lapin, C. A. (1981). Comparative pulmonary responses to inhaled inorganic fibers with asbestos and fiberglass. *Environmental Research*, 24(1), 167–191. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(81\)90143-2](https://doi.org/10.1016/0013-9351(81)90143-2)
- Lee, R. J., & Van Orden, D. R. (2008). Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 50(2), 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.10.005>
- Lema, W., & Castillo, E. (2018). Relaciones agua/cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9(1), 125–140. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.12>
- Li, Y., Chen, N., Deng, D., Xing, X., Xiao, X., & Wang, Y. (2017). Formaldehyde detection: SnO₂ microspheres for formaldehyde gas sensor with high sensitivity, fast response/recovery and good selectivity. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 238, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.051>
- Libro de Resúmenes*. (2017).
- Liddament, M. (2019). *The AIVC of the 20 th century* (Issue 9). <https://www.aivc.org/resources/collection-papers/volume/40th-aivc-8th-tightvent-6th-venticool-conference-ghent-belgium-15>
- Luo, H. Y., & Liu, Y. (2008). Modeling the bifurcating flow in a CT-scanned human lung airway. *Journal of Biomechanics*, 41(12), 2681–2688. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.06.018>
- Makarem, M. A., Farsi, M., & Rahimpour, M. R. (2020). CFD simulation of CO₂ removal from hydrogen rich stream in a microchannel. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.221>
- Maroni, M., Seifert, B., & Lindvall, T. (1995). Indoor Air Quality. In *Elsevier Science* (Primera).
- Martin, C. (2000). Putting patients first: Integrating hospital design and care.

- Lancet*, 356(9228), 518. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)74196-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)74196-9)
- Martin, C. N., McDermid, A. C., & Garner, R. C. (1978). Testing of Known Carcinogens and Noncarcinogens for Their Ability to Induce Unscheduled DNA Synthesis in HeLa Cells. *Cancer Research*, 38(8), 2621–2627.
- Martínez C, G. (2019). Análisis meteorológico en la mar. In U. Ediciones (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (1998th ed., Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Maruo, Y. Y., Yamada, T., & Nakamura, J. (2009). Sensor element for indoor formaldehyde measurement. *NTT Technical Review*, 7(10).
- Matínez, M. C., & Becerra, Á. M. (2017). *Evaluación de un modelo difusivo convectivo del formaldehído en un ambiente cerrado de trabajo*. (Vol. 1). FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Meiss, A., Feijó-Muñoz, J., & Padilla-Marcos, M. A. (2016). Evaluación, diseño y propuestas de sistemas de ventilación en la rehabilitación de edificios residenciales españoles. Estudio de caso. *Informes de La Construcción*, 68(542), 0–11. <https://doi.org/10.3989/ic.15.101>
- Mendell, M. J., Lei-Gomez, Q., Mirer, A. G., Seppänen, O., & Brunner, G. (2008). Risk factors in heating, ventilating, and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: The US EPA BASE study. *Indoor Air*, 18(4), 301–316. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00531.x>
- Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua caliente, (1980). *Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Profesionales - Documentos técnicos para profesionales - Coronavirus*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCoV-China/documentos.htm>
- Ministerio de vivienda 18400*. (2007).
- Missia, D. A., Demetriou, E., Michael, N., Tolis, E. I., & Bartzis, J. G. (2010). Indoor exposure from building materials: A field study. *Atmospheric Environment*, 44(35), 4388–4395. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.049>
- Mitchell, C. S., Zhang, J., Sigsgaard, T., Jantunen, M., Liou, P. J., Samson, R., & Karol, M. H. (2007). Current state of the science: Health effects and indoor environmental quality. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 958–964. <https://doi.org/10.1289/ehp.8987>
- MohseniBandpi, A., Eslami, A., Shahsavani, A., Khodagholi, F., & Alinejad, A. (2017). Physicochemical characterization of ambient PM_{2.5} in Tehran air and its potential cytotoxicity in human lung epithelial cells (A549). *Science of the Total Environment*, 593–594, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.150>
- Naboni, E., & Havinga, L. (2019). *Regenerative Design in* (D. Harkness, E. Naboni, & L. Havinga. (Eds.)).
- Ng, L. C., Musser, A., Persily, A. K., & Emmerich, S. J. (2012). NIST Technical Note 1734 - Airflow and indoor air quality models of DOE reference commercial buildings. *National Institute of Standards and Technology*, 163.

- [http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech Note 1734 - CONTAM reference bldgs.pdf](http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech%20Note%201734%20-%20CONTAM%20reference%20bldgs.pdf)
- Núñez, A., González, M., & Saura, G. (2015). Proceso de recuperación de CO₂. Generalidades. *ICIDCA : Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 49(2), 24–32.
- Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of the Total Environment*, 726, 138605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>
- OMS / Amianto. (2016). WHO; World Health Organization. https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/asbestos/es/
- OMS, O. (2016). *Hoja de ruta del programa de calidad del aire de la OPS/OMS*. https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=guias-9833&alias=45330-hoja-ruta-calidad-aire-ops-oms-agenda-estrategica-inclusion-salud-gestion-calidad-aire-2018-330&Itemid=270&lang=es
- OMS, O. M. de la S. (2016). *Salud y medio ambiente Proyecto de hoja de ruta para reforzar la respuesta mundial a*. 13.
- Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud. (2009). *Ventilación natural para el control de las infecciones en entornos de atención de la salud*. http://www2.paho.org/hq/dmdocuments/2011/ventilacion_natual_spa_25mar11.pdf
- Análisis de la Calidad del aire en España, evolución 2001-2012, (2012).
- Partes, L. (n.d.). *Acuerdo de París*.
- Permentier, K., Vercammen, S., Soetaert, S., & Schellekens, C. (2017). Carbon dioxide poisoning : a literature review of an often forgotten cause of intoxication in the emergency department. *International Journal of Emergency Medicine*, 10, 17–20. <https://doi.org/10.1186/s12245-017-0142-y>
- Persily, A., & Hewett, M. (2010). Using ASHRAE's new IAQ guide. *ASHRAE Journal*, 52(5), 75–82.
- Pierantozzi, R. (2003). Carbon dioxide. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4(1), 803–820. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0301180216090518.a01.pub2>
- Pineda Espinoza, C., García Alvear, N., Astudillo Alemán, A., & Vázquez Freire, V. (2015). Quantification of the particulate matter in the work environment of the production sector in Cuenca-Ecuador. *Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias*, 6(14), 70–83.
- Piñon, H. (2006). *Teoría del proyecto*. 221.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., & Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation*, 109(1), 71–77. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>

- PRUNEDA, A. (1950). La organización Mundial de la Salud. *Medicina*, 30(617), 175–178.
- Qi, H., Xiao, S., Shi, R., Ward, M. P., Chen, Y., Tu, W., Su, Q., Wang, W., Wang, X., & Zhang, Z. (2020). COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: A time-series analysis. *Science of the Total Environment*, 728, 138778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138778>
- Quality, I. A., Building, O., Chandra, J., Putra, P., Degree, M., & Engineering, C. (2015). *Effects of Indoor Air Quality on the Occupant's Health and Productivity in an Office Building* (Issue April). University Tun Hussein Onn Malaysia.
- Quan, X., Joseph, A., Nanda, U., Moyano-Smith, O., Kanakri, S., Ancheta, C., & Loveless, E. A. (2016). Improving Pediatric Radiography Patient Stress, Mood, and Parental Satisfaction Through Positive Environmental Distractions: A Randomized Control Trial. *Journal of Pediatric Nursing*, 31(1), e11–e22. <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2015.08.004>
- Querol, X., Viana, M., & Moreno, T. (2012). *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de Calidad del Aire* (Cyan, Proy).
- Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 8, 53–66.
- Ranzani, O. T., Milà, C., Kulkarni, B., Kinra, S., & Tonne, C. (2020). *Association of Ambient and Household Air Pollution With Bone Mineral Content Among Adults in Peri-urban South India*. 1–14. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.18504>
- Reglamento, E., Europeo, P., & Decreto, R. (2015). *Texto Consolidado*. 1–24.
- Rehfuess, E. & W. H. O. (2007). *Combustibles para una vida mejor*. 56. http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43705/9789243563169_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reingruber, H., & Pontel, L. B. (2018a). Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.07.001>
- Reingruber, H., & Pontel, L. B. (2018b). Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9(2018), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.07.001>
- Restrepo, J. A. (2006). *Compuestos orgánicos volátiles*. 24–26.
- Rey Martínez, F. J., & Ceña Callejo, R. (2006). *Edificios saludables para trabajadores sanos, calidad de ambientes interiores*.
- Roffael, E., Khoo, K. C., Koh, M. P., & C L Ong. (1993). *Formaldehyde release from particleboard and other wood based panels*. (Kuala Lumpur (Ed.)). Forest Research Institute Malaysia.
- Rojo, N., Obregón, I., Manrique, R., & Elías, A. (2012). Aproximación a La Problemática Del Aire Interior. *Aeipro.Com*, 11–13. http://aeipro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12_1162_1174.3791.pdf

- Ruiz, A. A. B. (2019). *España en cifras 2019* (Vol. 3, Issue 2). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Ruiz Bautista, L. (2019). Cardiovascular impact of PM_{2.5} from the emissions of coal-fired power plants in Spain during 2014. *Medicina Clínica*, 153(3), 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2018.11.017>
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(9), 805–814. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- Sáez, E. (2017). Análisis de la calidad del aire interior en función de la tipología de vivienda. *Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de La Comunidad de Madrid*, 2(Ii), 1–98. <https://doi.org/M-48.739-2010>
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536–2572. <https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- Salthammer, T., Schieweck, A., Gu, J., Ameri, S., & Uhde, E. (2018). Future trends in ambient air pollution and climate in Germany – Implications for the indoor environment. *Building and Environment*, 143(May), 661–670. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.050>
- Salud, 68. Asamblea Mundial de la. (2015). *65 Asamblea Mundial De La Salud*. <https://doi.org/10.1080/00222349508219502>
- Schneider, T., Sundell, J., Bischof, W., Bohgard, M., Cherrie, J. W., Clausen, P. A., Dreborg, S., Kildesø, J., Kjærgaard, S. K., Løvik, M., Pasanen, P., & Skyberg, K. (2003). “EUROPART”. Airborne particles in the indoor environment. A European interdisciplinary review of scientific evidence on associations between exposure to particles in buildings and health effects. *Indoor Air*, 13(1), 38–48. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.02025.x>
- Schultz, M. M. (2014). Chemicals of Environmental Concern. In *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (Third Edit, Vol. 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01004-6>
- Secretario, E., Generales, P., Generales, P., Decreto, R., Reglamento, E., Sanitaria, A. C., & Decreto, R. (1998). *Ministerio de economía y hacienda 18794*. 130570.
- Shaya, J., Srour, H., & Karamé, I. (2016). An Outline of Carbon Dioxide Chemistry, Uses and Technology. *Intech, I*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- Shrubsole, C., Dimitroulopoulou, S., Foxall, K., Gadeberg, B., & Doutsis, A. (2019). IAQ guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK. *Building and Environment*, 165(September), 106382. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106382>
- Śmiełowska, M., Marć, M., & Zabiegała, B. (2017). Indoor air quality in public utility environments—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11166–11176. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8567-7>
- Sonetti, G., Brown, M., & Naboni, E. (2019). About the triggering of UN sustainable development goals and regenerative sustainability in higher education. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–17.

<https://doi.org/10.3390/su11010254>

- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017a). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Energy Procedia*, 128, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.039>
- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017b). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Encyclopedia of Environmental Health*, 128, 213–220. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52272-6.00262-2>
- Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Oman, L. D., & Strahan, S. E. (2019). The Effects of a 1998 Observing System Change on MERRA-2-Based Ozone Profile Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 3(2018), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2019JD030257>
- Stull, R. B. (1988). *AN INTRODUCTION TO BOUNDARY LAYER METEOROLOGY*.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air, Supplement*, 14(SUPPL. 7), 51–58. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Tang, W., Arellano, A. F., DiGangi, J. P., Choi, Y., Diskin, G. S., Agustí-Panareda, A., Parrington, M., Massart, S., Gaubert, B., Lee, Y., Kim, D., Jung, J., Hong, J., Hong, J.-W., Kanaya, Y., Lee, M., Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Flynn, J. H., & Woo, J.-H. (2018). Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 11007–11030. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11007-2018>
- Tang, X., Bai, Y., Duong, A., Smith, M. T., Li, L., & Zhang, L. (2009). Formaldehyde in China: Production, consumption, exposure levels, and health effects. *Environment International*, 35(8), 1210–1224. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.06.002>
- Topham, S., Bazzanella, A., Schiebahn, S., Luhr, S., Zhao, L., Otto, A., & Stolten, D. (2014). Carbon Dioxide. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (p. 39). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/14356007.a05>
- Ulrich, R. S., Zimring, C., Zhu, X., DuBose, J., Seo, H. B., Choi, Y. S., Quan, X., & Joseph, A. (2008). A review of the research literature on evidence-based healthcare design. *Herd*, 1(3), 61–125. <https://doi.org/10.1177/193758670800100306>
- Unidas, N. (1997). *LEY 629 Diciembre 27 de 2000: Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Vol. 61702).
- Vallejo, C. (2018). *Evaluación del material particulado micro-plasticos y su relación con la calidad del aire en el interior de los hogares, Comas, 2018*.
- Vivienda, M. de. (2006). *Código Técnico de la Edificación Partes I y II*. 1061.
- Wang, Z. (2018). Energy and Air Pollution. *Comprehensive Energy Systems*, 1–5, 909–949. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00127-9>

- Ware, J. H., Thibodeau, L. A., & Speizer, E. (1981). Assessment of the health effects of atmospheric sulfur oxides and particulate matter: Evidence from observational studies. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 41(October), 255–276. <https://doi.org/10.2307/3429322>
- Warheit, D. B., Hart, G. A., Hesterberg, T. W., Collins, J. J., Dyer, W. M., Swaen, G. M. H., Castranova, V., Soiefer, A. I., & Kennedy, G. L. (2001). Potential pulmonary effects of man-made organic fiber (MMOF) dusts. *Critical Reviews in Toxicology*, 31(6), 697–736. <https://doi.org/10.1080/20014091111965>
- Warren, P. (2000). Multizone Air Flow Modelling (COMIS). *International Energy Agency*, 48.
- Wu, F., Jacobs, D., Mitchell, C., Miller, D., & Karol, M. H. (2007). Improving indoor environmental quality for public health: Impediments and policy recommendations. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 953–957. <https://doi.org/10.1289/ehp.8986>
- Xia, Y., Wang, J., Gu, C., Ling, Y., & Gao, Z. (2020). *MnO₂/Al foil decorated air cleaner with self-driven property for the abatement of indoor formaldehyde*. 382(August 2019).

CAPÍTULO 05. COMPOSICIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE CONTAMINANTES AL INTERIOR DE UN AMBIENTE

5.1 Introducción

Si se considera que la infraestructura de la modernidad en la edificación, sea concebidos por obra nueva o adecuaciones, remodelaciones o intervención patrimonial a nivel europeo, cada vez son más herméticas para el ahorro energético interior (Matínez & Becerra, 2017). Mas la evaluación a exposición a diversos contaminantes del aire de origen interior y exterior toma consideraciones especiales por lo mencionado al deterioro de la salud humana. En la actualidad los contaminantes que representan problemas severos en la salud humana son las Formaldehído, $PM_{2.5}$, CO, SO_2 , NO_x , NH_3 , HAP y COV (Issn, 2012), de entre los que se encuentran en un ambiente interior (Figura 4.1). A medida que la mejora del rendimiento energético del edificio (*Ministerio de Vivienda 18400*, 2007) mejora bajo las regulaciones propias del confort (Bluyssen *et al.*, 2011), es inversamente proporcional a la calidad del aire interior. Si bien las normas de ventilación son una aproximación a la mejora de la CAI mediante el uso de diversos y variados equipos, éstos también deberían ser más eficaces para la mitigación de contaminantes del aire exterior introducido al interior.

Figura 5.1 Gráfica de contaminantes al interior, afectados por la contaminación del aire exterior y fuentes interiores. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Selectivamente se sesgan contaminantes en función de su materialidad y uso en el interior de un espacio considerado en capítulos anteriores como son viviendas, edificios de oficina entre otros, quedando fuera del análisis edificaciones de tipo industrial. Bajo esta consideración se utiliza el CO₂ como un gas trazador para el proceso de análisis de la CAI que es producido por el hombre y en referencia adicional el formaldehído (como contaminante relacionado con los materiales de construcción) y el material particulado PM_{2.5} por los efectos severos a la salud humana. Conocer el contaminante desde las propiedades físicas y químicas nos encamina a la comprensión para que se pueda manejar de maneras diversas al momento de la simulación y la introducción de datos al programa.

5.2 Formaldehído

El formaldehído en el medio ambiente se encuentra de manera natural, y en la mayoría de los organismos vivos que lo producen en cantidades reducidas como parte de procesos metabólicos normales (Pérez & Becerra, 2017). En 1828 fue experimentado por primera vez por el químico ruso Aleksandr Mijáilovich Bútlerov, sintetizando el glicol metilénico por hidrólisis del diacetato de metileno, como error de fórmula (Matínez & Becerra, 2017). A partir de ello, y tras evolución de su obtención se produce alrededor del mundo a gran escala por la oxidación del metano o metanol en la presencia de un catalizador de cobre (Laird, 1997).

En Estados Unidos se produce 9 millones de libras anuales que, da a conocer el gran uso comercial del formaldehído como aldehído (Kerns *et al.*, 1983). Existen una cantidad considerable de usos del formaldehído en el área de salud -desinfectantes, estabilizantes-, en materiales de construcción -aglomerados, pisos, textiles-, en el mundo textil se utiliza para la producción de revestimientos plásticos y en el industrial en la fabricación de sustancias químicas (Kerns *et al.*, 1983).

El espacio interior lleva consigo mobiliario, y más elementos, que hacen posible el desarrollo de las actividades humanas, el equipar de mobiliario depende de decisiones personales o de un especialista en diseño de interiores. Se opta actualmente por mobiliario que usa para el efecto aglomerados de madera y pasan por un proceso superficial para determinar el tipo de acabado que mejora la estética, para ello en su proceso se debe incorporan elementos que elevan su costo. Lo que se adiciona generalmente son barnices, lacas, papel impregnado, plásticos, resinas,

aglomerante de las chapas decorativas en ambas caras del tablero. Con la adición de chapas decorativas se suelen utilizar diversos tipos de adhesivos que contienen: Urea formaldehído (UF) para interiores, Urea - melamina formaldehído (UMF) o Fenol formaldehído (PF) para exteriores, introduciendo también isocianato (MDI, PMDI). (Alonso & Valeska, 2014) (Tabla 5.1).

Propiedades físicas y químicas del formaldehído		
Estructura	<div><div><div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div> <div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div></div></div></div></div>	

Tabla 5.1: Propiedades físicas y químicas del formaldehído. Fuente: Alonso & Valeska 2014. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Hace varias décadas se realiza estudios referenciales sobre los efectos a la salud de este compuesto, para ello, la OMS, determina para la calidad del aire en ambientes interiores una exposición límite de 30 minutos de formaldehído de 80 partes por billón (ppb) (Maruo *et al.*, 2009). Los efectos que producen luego de un prolongado tiempo de este tipo de componente son muy perjudiciales para la salud humana. Los estudios primarios de sus efectos se iniciaron en el año de 1980, las incidencias fueron analizadas en roedores, que fueron expuestos por inhalación a 0, 2.0, 5,6 y 14.3 ppm de gas formaldehído 6 horas, 5 días a la semana, durante 24 meses (Kerns *et al.*, 1983). Se determinó que, bajo una exposición de 24 meses con una cantidad 14.3 ppm, produce cáncer nasal en ambos sexos, y diversos síntomas como tumores en afecciones a las vías respiratorias.

5.2.1 Propiedades físicas del formaldehído

El formaldehído puro a temperatura y presión ambiente es un gas incoloro de olor fuerte e irritante. A temperaturas menores de -20 °C es un líquido transparente e incoloro. Es irritante para los ojos y el tracto respiratorio aun a bajas concentraciones (1ppm) causando sensación de ardor a mayores concentraciones; los vapores de soluciones de Formaldehído son inflamables y explosivos (Laird, 1997). Además, es soluble en agua, etanol, éter dietílico y acetona (Salthammer *et al.*, 2010). En solución acuosa con mínimo 25 % de formaldehído, se forman metilenglicol [$\text{CH}_2(\text{OH})_2$] y polimetilenglicoles [$\text{H}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{OH}$](Roffael *et al.*, 1993).

Su formulación es COH_2 , su enlace es a través de enlaces del carbono, unidos al oxígeno e hidrógeno, u otros elementos con enlaces en su última capa, y tiene una estructura de resonancia dipolar, lo que hace que la molécula sea un electrófilo típico. (Salthammer *et al.*, 2010) su peso molecular de 30,03 g/mol. Existen diferentes formas de encontrar el formaldehído, entre estos se encuentra el formaldehído anhidro, es decir; en estado puro, formaldehído en solución que presentan variación en sus propiedades físicas.

5.2.2 Propiedades químicas del formaldehído

El Formaldehído es una sustancia muy reactiva, pudiendo aun reaccionar consigo misma a través de un proceso de auto polimerización para su obtención, se combina

químicamente con casi todos los tipos de compuestos orgánicos a excepción de las parafinas (Matínez & Becerra, 2017). Se descompone por acción del calor, a temperaturas mayores de 150 °C, por reducción el formaldehído, se transforma en y metanol, y por oxidación en ácido fórmico o gas carbónico. Este proceso de degradación también se lleva a cabo en presencia de luz solar, donde sufre oxidación hasta CO₂. Es muy inflamable y forma mezclas explosivas en el aire en el intervalo de 7 % a 73 % en volumen a 25 °C. Reacciona con rapidez al entrar en contacto con agentes oxidantes fuertes, álcalis, ácidos, fenoles y urea (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014). En soluciones acuosas se hidroliza y polimeriza y puede existir como metilenglicol, polioximetileno y otros compuestos. Las soluciones de formaldehído en concentraciones mayores del 30 % se enturbian debido a la precipitación de los polímeros del formaldehído, esto se evita adicionando estabilizantes como Metanol a la solución o manteniéndola a temperatura mayor de 100 °C (10) (Laird, 1997).

El Formaldehído es una sustancia de amplia aplicación industrial debido a la gran gama de productos y usos a los que se puede aplicar. Se aprecian seis tipos de reacciones principales en las que interviene el formaldehído: descomposición, polimerización, de reducción y oxidación, de adición, de condensación y de formación de resinas.

5.2.3 Materialidad Constructiva

Los COV son contaminantes que son tomados de interés por ser peligrosos para la salud, que generan atmósferas con contenido de mal olor. Para el caso en desarrollo se referencia a un alto contenido de fuentes contaminantes producidos por los materiales de construcción, muebles, quema de productos petrolíferos, el humo de tabaco, las emanaciones de electrodomésticos (impresoras, computadoras entre otros), productos químicos y de limpieza, se encontraron que hay en mayores concentraciones de contaminantes al interior de un espacio que al exterior (Alsmo & Holmberg, 2007). Por su parte, el comportamiento de la emisión de formaldehído de los materiales de construcción se puede visualizar a través de diversos estudios en donde las mediciones realizadas en madera, poliéster entre otros (Tabla 5.2) indica una concordancia buena entre las concentraciones, pese a la variación estándar alta.

CAPÍTULO 05. COMPOSICIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE CONTAMINANTES AL INTERIOR DE UN AMBIENTE

Componente	Contabilidad primera semana ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Suelo de plástico	13.3 ± 2.1
Techo suspendido	< LOD
Sillas	< LOD
La parte inferior de los escritorios (Tablero de partículas barnizado)	28 ± 5
La parte superior de los escritorios (Tablero de partículas en bruto)	49 ± 8
Paredes pintadas	< LOD
Cortinas de poliéster	$5,4 \pm 0,9$
Puerta	$6,5 \pm 1,0$
Calentador	$0,6 \pm 0,1$

Tabla 5.2: Concentración media de formaldehído medida y modelada en el aula durante cinco semanas (LOD= $0,005 \mu\text{g m}^{-3}$). Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich & Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

En algunos casos las mediciones son menores a $0,005 \mu\text{g m}^{-3}$ que determinan una baja emisión de en un espacio recién construido fue investigado mediante mediciones in situ de la concentración superficial y la cuantificación de la transferencia de masa convectiva a través de la capa límite en la superficie del material (Bourdin et al., 2014). El experimento estima parámetros de mediciones superficiales como una referencia de emisiones de materiales en una cámara de pruebas. En este caso se busca cuantificar la contribución de los materiales de construcción a la contaminación de un AI, bajo observancia de las condiciones de ventilación.

Las mediciones in situ de la concentración de la fase gaseosa en la superficie del material pusieron de manifiesto que podían producirse fenómenos de adsorción/desorción. Esto induce una variabilidad temporal del comportamiento de algunos materiales de construcción, actuando como fuentes o sumideros de formaldehído de acuerdo con las condiciones de uso o de construcción. Además, incluso el material libre de formaldehído (por ejemplo, las cortinas de poliéster) podrían convertirse en emisores potenciales después de una absorción significativa de formaldehído. Estos resultados muestran el interés de las mediciones in situ de la concentración de la superficie del material para investigar la transferencia de masa de material/aire interior y para predecir la contaminación del aire interior.

También se investigó que el mobiliario interior como los escritorios en su composición son los materiales que emiten la mayor cantidad de formaldehído, lo que no era sorprendente ya que estaban hechos con tableros de partículas y aglomerantes. La difusión del formaldehído desde el tablero de partículas a la superficie era muy diferente dependiendo de los lados. El tablero descubierto (sin melaminas) presenta

concentraciones superficiales relativamente alta; esto se debía ciertamente a una resina de melamina (formaldehído continuo).

5.2.4 Efectos sobre la salud

El ser humano puede estar expuesto al formaldehído por inhalación directa o ingestión de formaldehído por productos o moléculas que pueden metabolizarse en formaldehído. Los niveles del formaldehído se encuentran entre el 0.1 y 0.5 partes por millón (ppm, aproximadamente 0.12-0.6 mg/m³) detectables por la sensibilidad del ser humano, entre 0.5 y 1.0 ppm (0.6-1.2 mg/m³) puede causar irritación en los ojos, y por sobre 1.0 ppm (1.23 mg/m³) puede causar irritación de la nariz y garganta.

Existen hábitos desarrollados por actividades humanas, como fumar cigarrillos, que liberan cantidades sustanciales de formaldehído, cuando se usa con un alto poder de vapeo (Reingruber & Pontel, 2018a). De los estudios realizados en roedores se complementa dos sistemas: desintoxicación de formaldehído (ADH5) cuando estos dos sistemas son inactivados simultáneamente, el formaldehído endógeno causa un daño generalizado en el ADN (Figura 5.2) que conduce a insuficiencia de la médula ósea, disfunción hepática renal, cáncer de hígado y leucemia, el efecto se produce bajo concentraciones altas del gas y permanencias alargadas (IARC Working Group, 2004). Mas estudios realizados sobre roedores evidencia el perjuicio del formaldehído (Reingruber & Pontel, 2018a).

El Formaldehído se puede encontrar adicionalmente en algunos seres vivos como metabolito natural en los hongos shiitake (*Lentinula edodes*), que tiene un contenido desde 40 a 380 mg/kg. (X. Tang *et al.*, 2009).

Figura 5.2 Esquema de influencia de agentes de DNA al Formaldehído. Fuente: Lennard-Jones 2017.

Fumar puede generar hasta 150 mg de compuestos liberadores de formaldehído por cigarrillo, y la concentración interior puede alcanzar más de 0.2 mg/m³ en una habitación donde alguien fuma.

5.3 Dióxido de Carbono

El CO₂ se libera al ambiente exterior durante los procesos de combustión (hornos artificiales y motores de combustión), puede ser liberado naturalmente por los océanos y la vegetación, mientras que el CO₂ está presente en el aire interior por tres causas, 1) dióxido de carbono que ingresa del aire exterior (naturaleza); 2) producto de la respiración de los habitantes de la habitación 3) procesos de combustión (calefacción y cocción) (Cooke, 1991).

El dióxido de carbono fue uno de los primeros gases descubiertos como una sustancia diferente del aire, alrededor del año 1649 el químico Jan Baptist van Helmont observó que al quemar un pedazo de carbón en un recipiente cerrado se producía una sustancia invisible que la llamó “gas”, mientras que las propiedades del dióxido de carbono fueron estudiadas por Joseph Black en el año 1750, al calentar o tratar con ácidos piedra caliza(carbonato de calcio), producía un gas más denso que el aire, que no mantenía las llamas ni la vida animal (Núñez *et al.*, 2015).

El CO₂ se encuentra en bajas concentraciones en la atmósfera de manera natural, es necesario en el ciclo de vida de plantas y animales. Además, posee numerosas aplicaciones industriales como carbonatación de bebidas, extinción de incendios, refrigerante (hielo seco), fabricación de productos químicos, preparación de moldes de fundición, operaciones mineras, recuperación secundaria de pozos petroleros, volteo del caucho, soldadura y procesos de extracción (Pierantozzi, 2003). Según Hui *et al.* (2008), el CO₂, es un producto de la respiración humana, se usa como un indicador de la calidad de aire interior, es decir la acumulación de contaminantes en interiores, así como de la eficiencia de la ventilación, la medida y el análisis de la concentración promedio en interiores es útil para comprender el rendimiento de un sistema de ventilación.

Los niveles de CO₂ se elevan sino existe un suministro de aire fresco adecuado, por otra parte, en lugares con pocas personas, no se genera suficiente cantidad de dióxido de carbono para que sea un predictor de la eficiencia del sistema de ventilación del edificio. Para evaluar la CAI, existen dos límites recomendados comúnmente aceptados, ASHRAE recomienda que los niveles de CO₂ en interiores no superen los 700 ppm.

5.3.1 Propiedades físicas del dióxido de carbono

El CO₂ también conocido como anhídrido carbónico o gas carbónico, a temperatura y presión normal es un gas incoloro, inodoro e inflamable, moderadamente reactivo, con un ligero sabor agrio, asfixiante simple, aunque también puede actuar como estimulante respiratorio (Topham *et al.*, 2014). El dióxido de carbono es una molécula triatómica, una molécula de CO₂ presenta una estructura estable lineal simétrica en la cual el carbono se halla unido a cada átomo de oxígeno a través de un enlace sigma y pi formado dos enlaces C=O, cuyo momento dipolar eléctrico es de cero (Shaya *et al.*, 2016).

A pesar que el CO₂ existe principalmente en forma gaseosa, es posible encontrarlo en forma sólida a una temperatura de -78° C conocido como hielo seco, en estado líquido únicamente existe únicamente cuando se disuelve en agua y será soluble solamente cuando la presión se mantiene constante, cuando la presión disminuye el CO₂ intentará escapar al aire dejando burbujas de aire en el agua, El dióxido de carbono es un gas que se encuentra en muy baja concentración atmosférica de manera natural. Es un ingrediente necesario en el ciclo de vida de animales y plantas, se libera en la respiración de los seres vivos y es retenido por las plantas en forma de carbono a través de la fotosíntesis (Núñez *et al.*, 2015).

5.3.2 Propiedades químicas del dióxido de carbono

El dióxido de carbono gaseoso, es el producto de la oxidación del carbono, es poco reactivo a temperaturas ordinarias, pero en soluciones acuosas forma ácido carbónico (H₂CO₃), que a su vez formará sales y ésteres a través de una reacción de un ácido débil. La primera constante de ionización del dióxido de carbono es $3,5 \times 10^{-7}$ a una temperatura de 291K y la segunda es de $4,4 \times 10^{-11}$ a una temperatura de 298K. El pH de las soluciones saturadas de dióxido de carbono varía entre 3,7 a 1 atm y 3,2 a 23,4 atm (Pierantozzi, 2003). El CO₂ es relativamente estable a temperaturas normales, si se calienta por encima de los 1700°C. Esta reacción también avanza hacia la derecha en un grado limitado al hacer uso de altas temperatura, luz ultravioleta o una descarga eléctrica se puede producir su descomposición obteniendo monóxido de carbono y oxígeno (Topham *et al.*, 2014) (Tabla 5.3).

El CO₂ se puede disolver en agua para formar un ácido débil, ácido carbónico.

Únicamente el 0,1 % existirá en forma de ácido carbónico, de acuerdo a su constante de disociación primaria el CO₂ presenta una naturaleza débilmente ácida.

Propiedades físicas y químicas del Dióxido de Carbono	
Estructura	$O = C = O$
Sinónimos	Óxido de Carbono (IV) Anhídrido Carbónico Gas Carbónico
Fórmula molecular	CO ₂
Peso molecular	44,01 g mol ⁻¹
Punto de congelación	-57 °C
Punto de sublimación (101,325kPa)	-78,5 °C
Triple punto	518 kPa -56,57 °C
Temperatura crítica	31,04 °C
Presión crítica	7383 kPa
Momento bipolar	0 D
Solubilidad en agua (20°C, 1atm)	87,8 %
Densidad del gas (20°C, 1atm)	1.84 kg m ⁻³
Densidad del líquido (-37°C, 11atm)	1101,10 kg m ⁻³
Densidad del sólido (-79°C, 11atm)	1560,19 kg m ⁻³
Gravedad Específica del gas (20°C, 1atm)	1,53
Gravedad Específica del líquido (-37°C, 11atm)	1,10
Volumen Especifico (20°C, 1atm)	139.36 kg m ⁻³
Calor latente de sublimación	25288 J mol ⁻¹

Tabla 5.3: Resumen de las concentraciones de contaminantes calculadas. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

A presión atmosférica, el pH de una solución de dióxido de carbono es 3.7 y a una presión de 560 kPa es 3.3 y permanecerá en este nivel a presiones aún más altas (Topham *et al.*, 2014). Las reacciones entre el dióxido de carbono con otros compuestos se producen generalmente a temperaturas elevadas y mediante el uso de catalizadores. El dióxido de carbono puede reducirse por varios medios a monóxido de carbono. El más común de estos es la reacción con hidrógeno, produciendo una reacción reversible, es decir, el monóxido de carbono puede transformarse en dióxido de carbono (Pierantozzi, 2003).

Esta reacción $CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO$ es de suma importancia en procesos de fundición de minerales de hierro, al que se le adiciona piedra caliza como fundente y coque como combustible; primero la piedra caliza se descompone y forma dióxido de carbono, que luego se reducirá a monóxido de carbono por acción del coque caliente, la transformación del mineral en metal (hierro) se produce por la acción del monóxido de carbono. Así también el dióxido de carbono puede reducirse a carbono por la acción de metales como el aluminio o el magnesio y usando temperaturas elevadas (Pierantozzi, 2003).

Otras reacciones que involucran el dióxido de carbono son de importancia comercial como es el caso de la reacción del dióxido de carbono con amoníaco, que forma carbomato de amonio que al deshidratarse se transforma en urea que es utilizado como fertilizante concentrado y como reactivo en la industria del plástico (Topham *et al.*, 2014).

El agua que se liberada puede combinarse con el carbamato para producir carbonato de amonio o para formar carbonato ácido de amonio.

La mezcla gaseosa de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrógeno puede transformarse en metanol a una temperatura y presión moderada, usando un catalizador de cobre y zinc.

La adición del dióxido de carbono al fenolato de sodio, produce salicilato de sodio, compuesto importante en la fabricación de la aspirina (Pierantozzi, 2003).

5.3.3 Materialidad Constructiva

Grandes cantidades de CO₂ se emiten a la atmósfera, producto de distintas fases del ciclo de vida de una edificación, ya sea por la elaboración de materiales y productos o la construcción del propio edificio, rehabilitación e incluso demolición (Jesús & García, 2006). La demanda del sector inmobiliario repercute en la incidencia de las emisiones de CO₂, que puede ser cuantificada y medida en términos energéticos como en términos de emisiones. Al sector de la construcción se le atribuye un tercio del gasto energético (Goldemberg & Lucon, 2007). La importancia a nivel global con referente a este gas es que si sus valores superan los límites podremos hablar de un calentamiento global con daños irreversibles. Esto en referencia a las zonas exteriores, para un ambiente interior los valores pueden incrementarse debido a que las personas en permanencia de descaso puede aportar con valores aproximados a 2400 ppm que sobre pasa los valores mínimos requeridos en ambientes interiores que es de 600 ppm, aunque es un gas de fácil concentración, también lo es de fácil disipación. Debido a su aporte considerable en un AI, se lo toma como referencia y como un gas trazador para el análisis de sus trayectorias.

5.3.4 Efectos sobre la salud

La concentración de dióxido de carbono en el aire ambiente son bajos alrededor de 0,04 %, al ser un gas 1,5 veces más pesado que el aire hace que se acumule en tornos cerrados, provocando desplazamiento del oxígeno del área (Permentier *et al.*, 2017). La baja concentración de dióxido de carbono se puede tolerar durante un período de tiempo considerable sin un efecto notable, cuando el aire interior que se respira presenta concentraciones entre el 1,5 % a 3 % en volumen de CO₂, la respiración es afectada, se vuelve más rápida y difícil, en concentraciones entre el 3 a 5 % en

CAPÍTULO 05. COMPOSICIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE CONTAMINANTES AL INTERIOR DE UN AMBIENTE

volumen se observa dolor de cabeza, mareos, náuseas y trastornos respiratorios. A concentraciones entre el 8 a 10 % en volumen, provoca calambres, pérdida de conocimiento, paro respiratorio y muerte, independientemente de la concentración de oxígeno que es del 19 % en volumen, lo que es suficiente, es decir que los efectos fisiológicos perjudiciales que se producen en el ser humano no se deben a la falta de oxígeno, sino al efecto directo del dióxido de carbono (Maroni *et al.*, 1995) (Tabla 5.4).

Elemento de edificación	Material	Elemento específico	Energía incorporada	Emisión de CO ₂ (kg)
Estructura	Hormigón	Hormigón 30 Mpa	1.20	0.0194
	Hormigón	Hormigón (acero reciclado)	10.10	0.1631
	Acero	Acero crudo	32.00	0.5168
	Madera	Secado al aire	1.20	0.0000
	Aluminio	Aluminio crudo	191.00	3.0847
Revestimiento de cubierta	Baldosa de concreto		0.80	0.0129
	Azulejos de cerámica		2.50	0.0404
	Fibrocemento		9.50	0.1534
Material impermeable para cubierta	Láminas de impermeabilización	Poliéster	53.70	0.8673
	Caucho sintético	En general	110.00	1.7765
Mampostería	Ladrillo		2.50	0.0404
	Tabiques de Yeso laminado	Prefabricado	6.10	0.0985
Marcos externos de ventanas y puertas	Perfiles de PVC	PVC general	66.00	1.0659
	Perfiles	Aluminio	191.00	3.0847
Carpintería			2.00	0.0000
Revestimiento	De Madera	Secado en autoclave	3.10	0.0000
	De cemento		7.80	0.1260
	De yeso		4.50	0.0727
Pisos	Cerámica de piso	Azulejos de cerámica	2.50	0.0404
	Madera	Parquet	3.10	0.0000
	Piedra artificial		2.50	0.0404
	Placas de piedra natural para el suelo	Local	5.90	0.0953
	Cerámica de paredes		2.50	0.0404
	Placas de terrazas		2.50	0.0404
Cubierta del techo	Humedad en el sitio	Yeso	4.50	0.0727
	Tablero	Yeso	6.10	0.0985
Aislamiento vertical	Poliestireno expandido		117.00	1.8896
	Poliuretano rígido		72.20	1.1660
	Corcho	Láminas	0.20	0.0032
Int. impermeabilización	Polietileno	Alta densidad	98.20	1.5859
Impermeabilización del suelo	Asfalto	Caucho sintético	110.00	1.7765
	Polietileno	Baja densidad	90.00	1.4535
Vidriado	Vidrio	Vidrio simple	15.90	0.2568
Tuberías	Tubo de PVC sintético	General PVC	66.00	1.0659
	Tubo de PE sintético	Baja densidad	90.00	1.4535
	Tubo de PP sintético	Baja densidad	90.00	1.4535
	Cobre	No reciclado	0.60	0.0097

Tabla 5.4 Análisis de CO₂/Kg, de algunos materiales de construcción que evidencia el gran aporte de contaminación global. Fuente: González 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

A una concentración del 15 %, la inconsciencia acompañada de rigidez y temblores ocurre en menos de 1 minuto, y en el rango del 20 % al 30 % produce inconsciencia y

convulsiones en menos de 30 segundos. Los efectos ocurren rápidamente ya que el dióxido de carbono se difunde en los fluidos de los tejidos a una velocidad aproximadamente 20 veces más rápida que el oxígeno (Headquarters Corporata, 2014). Las altas concentraciones de dióxido de carbono pueden asfixiarse rápidamente sin advertencia y sin posibilidad de auto rescate, así también la tolerancia al CO₂ disminuye con la edad y los fumadores podrían presentar mayor tolerancia debido a la familiarización con niveles altos de CO₂ en el humo del cigarrillo (Permentier *et al.*, 2017).

El CO₂ resulta peligroso y provoca intoxicación como hielo seco, cuando se somete a sublimación (conversión directa de estado sólido a gas), si es calentado rápidamente genera grandes cantidades de CO₂ que resulta peligroso en ambientes cerrados (Permentier *et al.*, 2017), si el CO₂ criogénico licuado o CO₂ enfriado por expansión, entra en contacto con la piel en forma de aerosol o nieve, puede causar quemaduras criogénicas dolorosas, y grandes áreas afectadas pueden incluso causar la muerte.

5.4 Características físicas y químicas de las partículas PM_{2,5}

La tropósfera contiene diferentes componentes, entre ellos el material particulado, que se precisa como una suspensión de gotas líquidas y/o partículas sólidas que se asocia particularmente como sinónimo al término aerosol (partículas atmosféricas). Las partículas atmosféricas tienen diferentes orígenes, entre ellos figura la formación, composición, tamaño y son emitidas por una variedad de fuentes de origen natural o biogénicas (mineral, erupciones volcánicas, re suspensión del suelo, incendios forestales, sal marina), como la degradación de compuestos procedentes de la vegetación terrestre. En la actualidad las de fuentes antropogénicas asociadas a emisiones debidas al tráfico rodado, procesos de la industria como la construcción y demolición, usos de combustibles domésticos, entre otros, también aportan de manera significativa.

Las partículas PM_{2,5} se producen en forma líquida o sólida, denominadas partículas primarias, por su parte las partículas secundarias son producto de reacciones químicas atmosféricas (Caraballo, 2012). Elementos complejos entre la interacción de compuestos gaseosos en la atmosfera, que forman una nueva especie con diferencia de presión que hace aparecer en la fase particulada o la interacción entre compuesto gaseoso y partícula atmosférica. Es un contaminante con características

físicas (masas, tamaño, densidad) y químicas (compuestos orgánicos, inorgánicos, metales, contaminantes primarios y secundarios-anexo 01-), y depende de las fuentes locales y las acciones de meteorología. Se pueden denominar como partículas volátiles a las que tienen un tamaño menor $10\text{ }\mu\text{m}$ y se fragmentan en tres grupos según su tamaño: partículas gruesas (PM_{10}), partículas finas ($\text{PM}_{2,5}$) y partículas ultrafinas ($\text{PM}_{0,1}$) (Delfino et al., 2005). El material $\text{PM}_{2,5}$ de composición compleja afecta severamente el sistema respiratorio y con ello las altas concentraciones que pueden vulnerar a la población, es por ello que se toma en relación para el análisis en este proceso de investigación.

5.4.1 Propiedades físicas de $\text{PM}_{2,5}$

La contaminación causada por material particulado conocido también como polvos en suspensión, es uno de los mayores problemas para la salud de las personas, hay que tener en cuenta que existe la fracción respirable, es decir aquella parte del aire que respiramos, ingresa a nuestro tracto respiratorio, pasa por la tráquea y se deposita en los pulmones, a esta se lo conoce como PM_{10} , mientras que las partículas que se depositan en lo más profundo de las vías respiratorias (sacos alveolares), se conocen como $\text{PM}_{2,5}$. Es necesario conocer la composición química del material articulado $\text{PM}_{2,5}$, para lo cual se utiliza absorción atómica, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X, a partir de los cuyos estudios se encuentran metales como Cr, Fe, K, Mn, Ni, Pb y Zn (Quijano *et al.*, 2010).

En la capa límite tomada como referencia CLP, las concentraciones de partículas totales en número y eso varían en el intervalo de 10^2 - 10^5 partículas por cm^3 y 1 - $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. El MPA el material particulado atmosférico se agrupa en partículas finas y gruesas. Se denominan partículas finas aquellas cuyo diámetro es inferior a $1\text{ }\mu\text{m}$, subdividiéndose en nano-partículas ($<0,05\text{ }\mu\text{m}$) y en partículas ultra finas ($<0,1\text{ }\mu\text{m}$). Se denominan partículas gruesas aquellas con diámetro superior a $1\text{ }\mu\text{m}$, subdividiéndose en aquellas con tamaños inferiores a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ diámetro aerodinámico (llamadas partículas $\text{PM}_{2,5}$) y aquellas que presentan un tamaño inferior a $10\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico (PM_{10}). Dentro de las partículas gruesas también se encuentran aquellas cuyo tamaño alcanza hasta los $100\text{ }\mu\text{m}$.

5.3.2 Propiedades químicas de PM_{2,5}

Los estudios e investigaciones apuntan a la detección del material particulado y de los metales a través de un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) *Perkim Elmer Analyst 300* (Mohseni Bandpi *et al.*, 2017). Para realizar la curva de calibración se usaron patrones Analíticos de Merck (Tabla 5.5).

Metal	λ (nm)	Slit (nm) (μ g/L)	Revisión característica de concentración	Rango lineal (μ g/L)	Tipo de llama
Cd	228,8	0,7	1,5	2	Aire-C ₂ H ₂
Cr	357,9	0,7	4	5	Aire-C ₂ H ₂
Fe	305,9	0,2	100	-----	Aire-C ₂ H ₂
K	404,4	0,7	350	600	Aire-C ₂ H ₂
Mn	279,5	0,2	2,5	2	Aire-C ₂ H ₂
Ni	232,0	0,2	7	2	Aire-C ₂ H ₂
Pb	217,0	0,7	9	20	Aire-C ₂ H ₂
Zn	213,9	0,7	1	1	Aire-C ₂ H ₂

Tabla 5.5 Características de concentración del contaminante PM_{2,5}. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

5.3.2.1 Determinación de elementos químicos en el material particulado PM_{2,5}

Se toma de referencia la fluorescencia de Rayos X es una técnica de ensayo no destructiva, que permite conocer con alta exactitud la composición química elemental del material, determinando todos los elementos presentes en forma simultánea desde el Sodio (Quijano *et al.*, 2010). Para la determinación de la composición química del filtro PM_{2,5} se utilizó el Equipo de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersa Shimadzu EDX 800 HS para la determinación de metales y la concentración de aquellos hallados de material particulado PM_{2,5} en Pamplona (Tablas 5.6 y 5.7).

Metal	Concentración (ug/m3)
<i>Cd</i>	<i>N.D</i>
<i>Cr</i>	<i>0.8854</i>
<i>Fe</i>	<i>22.97</i>
<i>K</i>	<i>651.34</i>
<i>Mn</i>	<i>0.3385</i>
<i>Ni</i>	<i>0.2729</i>
<i>Pb</i>	<i>1.02</i>
<i>Zn</i>	<i>245.83</i>

Tabla 5.6 Las mayores concentraciones de metales presentes en el aire de Pamplona corresponden a K, Zn, Fe, Pb, Cr, Mn, Ni. Fuente: Quijano et al., 2010. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

<i>Análisis</i>	<i>Resultado</i>	<i>(Std. Dev)</i>	<i>Proc.-Calc</i>	<i>Line</i>	<i>Intensidad</i>
Si	56.955 %	(0.090)	Quant.-Fp	Sika	18.083
Ca	11.438 %	(0.043)	Quant.-Fp	CaKa	3.681
Ba	10.793 %	(0.056)	Quant.-Fp	BaLa	6.904
K	7.211 %	(0.035)	Quant.-Fp	K Ka	2.14
Al	4.969 %	(0.033)	Quant.-Fp	Al Ka	1.169
Na	4.891 %	(0.058)	Quant.-Fp	NaKa	0.393
Zn	3.086 %	(0.008)	Quant.-Fp	ZnKa	26.334
Fe	0.306 %	(0.004)	Quant.-Fp	FeKa	1.354
S	0.250 %	(0.007)	Quant.-Fp	S Ka	0.145
Sr	0.048 %	(0.001)	Quant.-Fp	SrKa	0.880
Mg	0.038 %	(0.014)	Quant.-Fp	MgKa	0.006
Cu	0.012 %	(0.002)	Quant.-Fp	CuKa	0.086
Ni	0.002 %	(0.002)	Quant.-Fp	NiKa	0.011

Tabla 5.7: Los elementos de mayor concentración en el aire de Pamplona son: Si, Ca, Ba, K, de acuerdo con la T 5.6. Fuente: Quijano et al., 2010. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

5.3.2.2 Análisis por Fluorescencia de Rayos-X (FRX)

La investigación tomada como referencia se basa en el resultado por un equipo de análisis de rayos X, que se obtuvo el espectro sacado de un captador de partículas PM_{2.5} constituyente de un filtro (Figura 5.3).

Figura 5.3 Resultado de la cuantificación química para la muestra del material particulado PM_{2.5} de Pamplona. Fuente: Quijano et al., 2010.

5.3.3 Materialidad Constructiva

Aunque no exista un material constructivo que se relacione con la emisión directa del material particulado, más se puede relacionar con el proceso de fabricación de los materiales, que generan en su proceso elementos contaminantes tipo PM_{2.5}.

5.3.4 Efectos sobre la salud

Por las características descritas ya sea físicas y químicas son complejas de determinar los efectos sobre la salud humana. Por ello, toma relevancia varios estudios epidemiológicos actuales que demuestran que una exposición a largo plazo del MP está asociado a enfermedades cardiovasculares (Pope *et al.*, 2004), lesiones pulmonares (Kam *et al.*, 2011) y trastornos neurodegenerativos (Issn, 2012). su importancia radica en que pueden quedar suspendidas en el aire por largo tiempo y alcanzar fácilmente las vías aéreas inferiores.

Las PM_{2.5}, agrupa a partículas generalmente ácidas, son una fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100 % y tienen mayor efecto en la salud, ya que pueden ingresar al sistema respiratorio depositándose en los alveolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo produciendo efectos negativos en la misma, tales como aumento en las enfermedades respiratorias y cardiacas, asma, bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar, y disminución del funcionamiento pulmonar. Las partículas PM_{2.5} están compuestas de elementos que son tóxicos como metales pesados (Hierro, Aluminio, Calcio, Sodio, Potasio, Magnesio y Plomo) y compuestos orgánicos. Los principales componentes del material particulado atmosférico (MP) son sulfato, nitrato, amonio, ion hidrógeno, agua adherida a las partículas, carbono elemental, una gran variedad de compuestos orgánicos (Quijano *et al.*, 2010).

5.3.4.1 *Cantidades emitidas y valores límite del Material Particulado*

Para determinar la cantidad de partículas PM_{2.5} se indaga en lo que se produce según el caso en particular, ya sea antropogénico o natural. La producción del material particulado se estima alrededor de 2400-4900 x 10⁶ toneladas por año, lo que se genera por efecto de procesos atmosféricos el material particulado orgánico con 150 TgC por año. Hay que tomar en cuenta que las cantidades generadas por las fuentes naturales son superiores a las fuentes antropogénicas. Para el caso en particular las erupciones volcánicas como es el caso del volcán Sangay (Ecuador) y las fechas de

septiembre del 2020 que marca valores extremos (Figura 5.4). Es claro y reiterativo que la naturaleza del material particulado dependa de su localización como fuentes de contaminación del aire, sus variaciones y el traslado de un espacio a otro debido a las corrientes de viento.

Figura 5.4 Valores excedidos por las acciones volcánicas 2020: Fuente: <https://aqicn.org/map/ecuador/es/>. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

5.3.5 Conclusiones

En este capítulo se recopila la composición física, química de los contaminantes que se identifican en un ambiente interior bajo el análisis de, emanación interior, mobiliario, y compuesto del material particulado que generan afecciones pulmonares, considerados peligrosos para la salud en función de la concentración del gas contaminante (CO_2 y formaldehído) y el tamaño de las partículas ($\text{PM}_{2.5}$). En general las afecciones son al sistema respiratorio, que contienen un conjunto de órganos (pulmones, diafragma entre otros), que se encuentran en contacto directo con ellos por su funcionamiento propio, ello lo hace vulnerable y punto de partida para que la investigación se dirija al conocimiento de los componentes de los contaminantes. El formaldehído en gran concentración puede causar diversas afecciones entre ellas insuficiencia de la médula ósea, disfunción hepática renal entre otros descritos. Este gas se encuentra en la naturaleza y en su mayoría es producida para diferentes usos al interior de un ambiente, como es el caso de mobiliario realizado a través del contrachapado que son utilizados en la mayoría para la elaboración de mobiliarios y pisos flotantes que en su proceso utilizan aglomerantes que tienen alto contenido de formaldehído que al paso del tiempo son

desprendidos en el ambiente interior. Por su parte las concentraciones del CO₂, mayoritariamente son producidas por efecto de la respiración que se realiza por los ocupantes de un ambiente interior, aún mas cuando este contiene envolventes herméticos y deficiencias en la ventilación. Estas altas concentraciones de CO₂ genera fatiga en el ser humano provocando estrés y malestar. En este proceso de análisis y el gran contenido de ensayos para su caracterización se utiliza como un gras trazador para los capítulos subsiguientes (simulación). Estas condiciones físicas y químicas de este gas actualmente han provocado el calentamiento global y sus consecuencias nos afectan gravemente. El aporte de esta investigación para el conocimiento de la trayectoria de este gas en un ambiente interior, direcciona a tomar alternativas de absorción o mejoras en la ventilación mediante la colocación de ventanas o sistemas mecánicos que puedan ser óptimos al momento de ser planificados. Es por ello que, con el conocimiento a fondo de sus características físicas y químicas, direccionan de manera técnica a la proyección arquitectónica que genera evidencias para su aplicación. El material particulado por su composición sólida contiene diferentes tipos de metales que son muy perjudiciales a la salud al tener dimensiones prácticamente imperceptibles que atraviesan el sistema pulmonar hasta llegar a los alveolos y se introducen en el torrente sanguíneo que producen diversos tipos de cáncer. Las PM_{2,5} se encuentran en la naturaleza a través de las erupciones volcánicas que en algunos casos saturan varias zonas aledañas, ello genera problemas severos no solo al sistema pulmonar sino a los sembríos. La materialidad constructiva en cada caso analizado es un referente que se considera fuertemente para que sea una evidencia y punto de vista diferente para el momento de la proyección arquitectónica y que este enfocado hacia la mejora de las condiciones ambientales en una reducción ya sea a través de absorción de los contaminantes o dispersión.

5.3.6 Referencias

- Adán, A., & Huber, D. (2011). Análisis de datos 3D para generación automática de modelos BIM de interiores habitados. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 8(4), 357–370.
<https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.010>
- Adhanom, T. (2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas*. OMS.
<https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Alonso, P., & Valeska, E. (2014). *Análisis técnico y constructivo de los tableros de*

madera y su uso en la construcción.

- Alsmo, T., & Holmberg, S. (2007). *Sick Buildings or Not : Indoor Air Quality and Health Problems in Schools*. 16(6), 548–555.
<https://doi.org/10.1177/1420326X07084414>
- Alvarado, M. J., McVey, A. E., Hegarty, J. D., Cross, E. S., Hasenkopf, C. A., Lynch, R., Kennelly, E. J., Onasch, T. B., Awe, Y., Sanchez-Triana, E., & Kleiman, G. (2019). Evaluating the use of satellite observations to supplement ground-level air quality data in selected cities in low- and middle-income countries. *Atmospheric Environment*, 218(November 2018), 117016.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117016>
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 123–132.
<https://doi.org/10.1590/s1135-57271999000200003>
- Arya, S. P. (2001). Introduction to Micrometeorology. In R. Dmowska, J. Holton, & T. Rossby (Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Second Edi, Vol. 79, Issue 9).
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2014). Formaldehído 4.15. *La Evolución*, 3(34), 237–254. <http://www.anla.gov.co/documentos/Guia15.pdf>
- Ayyagari, V. N., Januszkiewicz, A., & Nath, J. (2004). Pro-inflammatory responses of human bronchial epithelial cells to acute nitrogen dioxide exposure. *Toxicology*, 197(2), 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2003.12.017>
- Basta, A., Serror, M. H., & Marzouk, M. (2020). A BIM-based framework for quantitative assessment of steel structure deconstructability. *Automation in Construction*, 111(October 2019), 103064.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103064>
- Bluyssen, P. M., Aries, M., & van Dommelen, P. (2011). Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project. *Building and Environment*, 46(1), 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.024>
- BOE 4/2015. (2015). Boletín Oficial del Estado. *Boletín Oficial Del Estado*, 61561–61567.
- Bourdin, D., Mocho, P., Desauziers, V., & Plaisance, H. (2014). Formaldehyde emission behavior of building materials : On-site measurements and modeling approach to predict indoor air pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.065>
- Brown, M., Haselsteiner, E., Apró, D., Kopeva, D., Luca, E., & Pulkkinen, K. (2017). *Restorative to Regenerative RESTORE Working Group One Report : Restorative Sustainability Project Name REthinking Sustainability TOWARDS a Regenerative Economy*.
- Burrowes, K. S., Swan, A. J., Warren, N. J., & Tawhai, M. H. (2008). Towards a virtual lung: Multi-scale, multi-physics modelling of the pulmonary system. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1879), 3247–3263.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0073>
- Cakmak, S., Dales, R. E., Liu, L., Kauri, L. M., Lemieux, C. L., Hebborn, C., & Zhu,

- J. (2014). Residential exposure to volatile organic compounds and lung function: Results from a population-based cross-sectional survey. *Environmental Pollution*, 194, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.020>
- Calidad del aire interior*. (2011). https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/contaminacion-aire-interior/index.htm
- Cao, Z., Wang, M., Chen, Q., Zhu, C., Jie, J., Li, X., Dong, X., Miao, Z., Shen, M., & Bu, Q. (2019). Spatial, seasonal and particle size dependent variations of PAH contamination in indoor dust and the corresponding human health risk. *Science of the Total Environment*, 653, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.413>
- Caraballo, J. M. S. (2012). Características fisicoquímicas de los gases y partículas contaminantes del aire. Su impacto en el asma. *Iatreia*, 25(4), 369–379.
- Carazo Fernández, L., Fernández Alvarez, R., González-Barcala, F. J., & Rodríguez Portal, J. A. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- Texte adopté du Parlement, lecture unique, 2246 7 (2019).
- Castejón Vilella, E. (2017). Propuesta europea sobre los valores límite del formaldehído. *MC Salud Laboral*, 14–17.
- Chiesa, M., Urgnani, R., Marzuoli, R., Finco, A., & Gerosa, G. (2019). Site- and house-specific and meteorological factors influencing exchange of particles between outdoor and indoor domestic environments. *Building and Environment*, 160(May). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106181>
- Clerbaux, C., Coheur, P., Scharf, O., & Hurtmans, D. (2009). The potential of MTG-IRS and S4-TIR to detect high pollution events at urban and regional scales. In *Carbon* (Issue December 2008).
- Contaminación del aire de interiores y salud*. (n.d.). Retrieved October 23, 2019, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Cooke, T. F. (1991). *Indoor Air Pollutants A Literature Review*. 9(3). <https://doi.org/10.1515/reveh.1991.9.3.137>
- CTN171, C. T. (2018). *Norma Española Productos de construcción : Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas Determinación de las emisiones al aire interior*.
- Delfino, R. J., Sioutas, C., & Malik, S. (2005). Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 934–946. <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>
- Diario Oficial L 298/2008*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2008:298:FULL&from=FR>
- Reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente,

- 2019 1 (2019).
- Eastman, C. (2016). *BIM Handbook BIM Handbook Rafael Sacks*.
- Entralgo Laín, P. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. Salvat Editores (Ed.)). file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf
- Entralgo, P. L. (1978). *Historia de la medicina* (S. A. SALVAT EDITORES (Ed.); Primera ed). file:///C:/Users/Home/Downloads/historia-de-la-medicina.pdf
- ESA - *Call for Media: Last glimpse of the Sentinel-6 satellite*. (n.d.). Retrieved January 22, 2020, from https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Call_for_Media_Last_glimpse_of_the_Sentinel-6_satellite
- Real Decreto 117/2003, de 31 de enero, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades, Boletín Oficial del Estado 5030 (2003).
- España. (2007). Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. *Boletín Oficial Del Estado, 16 noviembre de 2007 (275)*, 46962–46987.
- Espinoza Molina, C., & Palacios Espinoza, E. (2013). UNIVERSIDAD DE CUENCA - TESIS.pdf. *Articulo Ecuador, 1*(5), 1–127.
- European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe. In *EEA Report No 4/2012* (Issue 9). <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>
- Fan, Y., Deng, C., Zhang, X., Li, F., Wang, X., & Qiao, L. (2018). Numerical study of CO₂-enhanced coalbed methane recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 76*(June), 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.016>
- Fernández Tena, A., & Casan Clarà, P. (2012). Depósito pulmonar de partículas inhaladas. *Archivos de Bronconeumología, 48*(7), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.02.003>
- Ferron, B., & Crespin, R. (2016). An Acceptable Daily Intake of Bad News . Public / Private Problems and Media Trivialization of Environmental Health Issues : The Case of Indoor Air Pollution in France. *Politiques de Communication, 7*(May), 151–181.
- García Nieto, A., & Moarta Morales, I. (2018). Calidad del ambiente interior en edificios de uso público. *Journal of Chemical Information and Modeling, 53*(9), 119. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health, 1*, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- Ghio, A. J., Funkhouser, W., Pugh, C. B., Winters, S., Stonehuerner, J. G., Mahar, A. M., & Roggli, V. L. (2006). Pulmonary fibrosis and ferruginous bodies associated with exposure to synthetic fibers. *Toxicologic Pathology, 34*(6), 723–729. <https://doi.org/10.1080/01926230600932448>

- Global Alliance for Buildings and Construction. (2018). *2018 Global Status Report*. 325. [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018 GlobalABC Global Status Report.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20GlobalABC%20Global%20Status%20Report.pdf)
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudios Avanzados*, 21(59), 7–20.
- Graham, C., Laffan, K., & Pinto, S. (2018). Well-being in metrics and policy. *Science*, 362(6412), 287–288. <https://doi.org/10.1126/science.aau5234>
- Guardino Solá, X. (1998). Calidad del aire interior. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo*, 44.1-44.33. <https://doi.org/10.1590/S1020-49891998001200018>
- Guerrero, L. F. (2015). Sostenibilidad y conservación del patrimonio edificado. *Palapa*, 3(17), 102. https://www.researchgate.net/publication/303369539_Sostenibilidad_y_conservacion_del_patrimonio_edificado
- Gunschera, J., Mentese, S., Salthammer, T., & Andersen, J. R. (2013). Impact of building materials on indoor formaldehyde levels: Effect of ceiling tiles, mineral fiber insulation and gypsum board. *Building and Environment*, 64, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.001>
- Harrison, R. M., Delgado-saborit, J. M., Baker, S. J., Aquilina, N., Meddings, C., Harrad, S., Matthews, I., Vardoulakis, S., & Ross Anderson, H. (2009). Measurement and Modeling of Exposure to Selected Air Toxics for Health Effects Studies and Verification by Biomarkers. In *Health Effects Institute* (Issue 143). https://www.researchgate.net/publication/40648065_Measurement_and_modeling_of_exposure_to_selected_air_toxics_for_health_effects_studies_and_verification_by_biomarkers/link/00b7d5194d22cead35000000/download
- Headquarters Corporata. (2014). Carbon dioxide. *Air Products and Chemicals, Inc.*
- Hematabadi, H., Behrooz, R., Shakibi, A., & Arabi, M. (2012). The reduction of indoor air formaldehyde from wood based composites using urea treatment for building materials. *Construction and Building Materials*, 28(1), 743–746. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.018>
- Hernández, A. (2004). NTP 742: Ventilación general de edificios. *Insht*, 9. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/701a750/ntp_742.pdf
- Herrero Uceda, M. (2007). Árboles e insectos : *Foresta*, 37, 63–67.
- I. Leirós, L. (2009). Historia de la Ergonomía, o de cómo la Ciencia del Trabajo de basa en verdades tomadas de la Psicología. *Revista de Historia de La Psicología*, 30(4), 33–53. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3130680>
- IARC Working Group. (2004). INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Formaldehyde , 2-Butoxyethanol. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol62/>.

- Issn, L. A. (2012). Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm10. *Luna Azul*, 34, 195–213. <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.12>
- Jackson, R. J., & Cummins, S. K. (2001). The built environment and children's health. *Pediatr Clin North Am*, 48, 1241–1252.
- Jesús, G. M., & García, J. (2006). *Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials : Practical case study of three houses of low environmental impact*. 41, 902–909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Kam, W., Cheung, K., Daher, N., & Sioutas, C. (2011). Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro. *Atmospheric Environment*, 45(8), 1506–1516. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.049>
- Kerns, W. D., Pavkov, K. L., Donofrio, D. J., Gralla, E. J., & Swenberg, J. A. (1983). Carcinogenicity of Formaldehyde in Rats and Mice after Long-Term Inhalation Exposure. *Cancer Research*, 43(9), 4382–4392.
- Kershaw, Y. (1998). VOC legislation on the threshold of change. *European Coatings Journal*, 49(4), 230–235.
- Klaassen, K. D., & Watkins, J. B. (1999). *Manual de Toxicología*. http://www.ghbook.ir/index.php?name=های رسانه و فرهنگ&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chkhask=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component
- Kleinstreuer, C., & Zhang, Z. (2010). Airflow and Particle Transport in the Human Respiratory System. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(1), 301–334. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145453>
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- La Agenda para el Desarrollo Sostenible – Desarrollo Sostenible*. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Laird, T. (1997). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th Edition VCH: Weinheim, Germany. 1996/1997. Section A, 28 vols. Section B, 8 vols. DM 19 400. *Organic Process Research & Development*, 1(5), 391–392. <https://doi.org/10.1021/op970020u>
- Le Bourhis, J.-P. (2019). Du privé au public et retour. Les politiques de l'air intérieur entre régulation et responsabilisation. *Environnement Risque Sante*, 18, 318–322.
- Lee, K. P., Barras, C. E., Griffith, F. D., Waritz, R. S., & Lapin, C. A. (1981). Comparative pulmonary responses to inhaled inorganic fibers with asbestos and fiberglass. *Environmental Research*, 24(1), 167–191. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(81\)90143-2](https://doi.org/10.1016/0013-9351(81)90143-2)
- Lee, R. J., & Van Orden, D. R. (2008). Airborne asbestos in buildings. *Regulatory*

- Toxicology and Pharmacology*, 50(2), 218–225.
<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.10.005>
- Lema, W., & Castillo, E. (2018). Relaciones agua/cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9(1), 125–140.
<https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.12>
- Li, Y., Chen, N., Deng, D., Xing, X., Xiao, X., & Wang, Y. (2017). Formaldehyde detection: SnO₂ microspheres for formaldehyde gas sensor with high sensitivity, fast response/recovery and good selectivity. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 238, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.051>
- Libro de Resúmenes*. (2017).
- Liddament, M. (2019). *The AIVC of the 20 th century* (Issue 9).
<https://www.aivc.org/resources/collection-papers/volume/40th-aivc-8th-tightvent-6th-venticool-conference-ghent-belgium-15>
- Luo, H. Y., & Liu, Y. (2008). Modeling the bifurcating flow in a CT-scanned human lung airway. *Journal of Biomechanics*, 41(12), 2681–2688.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.06.018>
- Makarem, M. A., Farsi, M., & Rahimpour, M. R. (2020). CFD simulation of CO₂ removal from hydrogen rich stream in a microchannel. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.221>
- Maroni, M., Seifert, B., & Lindvall, T. (1995). Indoor Air Quality. In *Elsevier Science* (Primera).
- Martin, C. (2000). Putting patients first: Integrating hospital design and care. *Lancet*, 356(9228), 518. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)74196-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)74196-9)
- Martin, C. N., McDermid, A. C., & Garner, R. C. (1978). Testing of Known Carcinogens and Noncarcinogens for Their Ability to Induce Unscheduled DNA Synthesis in HeLa Cells. *Cancer Research*, 38(8), 2621–2627.
- Martínez C, G. (2019). Análisis meteorológico en la mar. In U. Ediciones (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (1998th ed., Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Maruo, Y. Y., Yamada, T., & Nakamura, J. (2009). Sensor element for indoor formaldehyde measurement. *NTT Technical Review*, 7(10).
- Matínez, M. C., & Becerra, Á. M. (2017). *Evaluación de un modelo difusivo convectivo del formaldehído en un ambiente cerrado de trabajo*. (Vol. 1). FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Meiss, A., Feijó-Muñoz, J., & Padilla-Marcos, M. A. (2016). Evaluación, diseño y propuestas de sistemas de ventilación en la rehabilitación de edificios residenciales españoles. Estudio de caso. *Informes de La Construcción*, 68(542), 0–11. <https://doi.org/10.3989/ic.15.101>
- Mendell, M. J., Lei-Gomez, Q., Mirer, A. G., Seppänen, O., & Brunner, G. (2008). Risk factors in heating, ventilating, and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: The US EPA BASE study. *Indoor Air*, 18(4), 301–316. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00531.x>
- Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua caliente, (1980).

Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Profesionales - Documentos técnicos para profesionales - Coronavirus. (n.d.). Retrieved May 21, 2020, from <https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCoV-China/documentos.htm>

Ministerio de vivienda 18400. (2007).

Missia, D. A., Demetriou, E., Michael, N., Tolis, E. I., & Bartzis, J. G. (2010). Indoor exposure from building materials: A field study. *Atmospheric Environment*, 44(35), 4388–4395. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.049>

Mitchell, C. S., Zhang, J., Sigsgaard, T., Jantunen, M., Liou, P. J., Samson, R., & Karol, M. H. (2007). Current state of the science: Health effects and indoor environmental quality. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 958–964. <https://doi.org/10.1289/ehp.8987>

MohseniBandpi, A., Eslami, A., Shahsavani, A., Khodagholi, F., & Alinejad, A. (2017). Physicochemical characterization of ambient PM_{2.5} in Tehran air and its potential cytotoxicity in human lung epithelial cells (A549). *Science of the Total Environment*, 593–594, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.150>

Naboni, E., & Havinga, L. (2019). *Regenerative Design in* (D. Harkness, E. Naboni, & L. Havinga. (Eds.)).

Ng, L. C., Musser, A., Persily, A. K., & Emmerich, S. J. (2012). NIST Technical Note 1734 - Airflow and indoor air quality models of DOE reference commercial buildings. *National Institute of Standards and Technology*, 163. [http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech Note 1734 - CONTAM reference bldgs.pdf](http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech%20Note%201734%20-%20CONTAM%20reference%20bldgs.pdf)

Núñez, A., González, M., & Saura, G. (2015). Proceso de recuperación de CO₂. Generalidades. *ICIDCA : Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 49(2), 24–32.

Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of the Total Environment*, 726, 138605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>

OMS / Amianto. (2016). WHO; World Health Organization. https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/asbestos/es/

OMS, O. (2016). *Hoja de ruta del programa de calidad del aire de la OPS/OMS.* https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=guias-9833&alias=45330-hoja-ruta-calidad-aire-ops-oms-agenda-estrategica-inclusion-salud-gestion-calidad-aire-2018-330&Itemid=270&lang=es

OMS, O. M. de la S. (2016). *Salud y medio ambiente Proyecto de hoja de ruta para reforzar la respuesta mundial a.* 13.

Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud. (2009). *Ventilación natural para el control de las infecciones en entornos de atención de la salud.* http://www2.paho.org/hq/dmdocuments/2011/ventilacion_natual_spa_25mar11.pdf

Análisis de la Calidad del aire en España, evolución 2001-2012, (2012).

Partes, L. (n.d.). *Acuerdo de París*.

Permentier, K., Vercammen, S., Soetaert, S., & Schellemans, C. (2017). Carbon dioxide poisoning: a literature review of an often forgotten cause of intoxication in the emergency department. *International Journal of Emergency Medicine*, 10, 17–20. <https://doi.org/10.1186/s12245-017-0142-y>

Persily, A., & Hewett, M. (2010). Using ASHRAE's new IAQ guide. *ASHRAE Journal*, 52(5), 75–82.

Pierantozzi, R. (2003). Carbon dioxide. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4(1), 803–820. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0301180216090518.a01.pub2>

Pineda Espinoza, C., García Alvear, N., Astudillo Alemán, A., & Vázquez Freire, V. (2015). Quantification of the particulate matter in the work environment of the production sector in Cuenca-Ecuador. *Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias*, 6(14), 70–83.

Piñon, H. (2006). *Teoría del proyecto*. 221.

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., & Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation*, 109(1), 71–77. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>

PRUNEDA, A. (1950). La organización Mundial de la Salud. *Medicina*, 30(617), 175–178.

Qi, H., Xiao, S., Shi, R., Ward, M. P., Chen, Y., Tu, W., Su, Q., Wang, W., Wang, X., & Zhang, Z. (2020). COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: A time-series analysis. *Science of the Total Environment*, 728, 138778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138778>

Quality, I. A., Building, O., Chandra, J., Putra, P., Degree, M., & Engineering, C. (2015). *Effects of Indoor Air Quality on the Occupant's Health and Productivity in an Office Building* (Issue April). University Tun Hussein Onn Malaysia.

Quan, X., Joseph, A., Nanda, U., Moyano-Smith, O., Kanakri, S., Ancheta, C., & Loveless, E. A. (2016). Improving Pediatric Radiography Patient Stress, Mood, and Parental Satisfaction Through Positive Environmental Distractions: A Randomized Control Trial. *Journal of Pediatric Nursing*, 31(1), e11–e22. <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2015.08.004>

Querol, X., Viana, M., & Moreno, T. (2012). *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de Calidad del Aire* (Cyan, Proy).

Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 8, 53–66.

Ranzani, O. T., Milà, C., Kulkarni, B., Kinra, S., & Tonne, C. (2020). *Association of Ambient and Household Air Pollution With Bone Mineral Content Among*

- Adults in Peri-urban South India*. 1–14.
<https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.18504>
- Reglamento, E., Europeo, P., & Decreto, R. (2015). *Texto Consolidado*. 1–24.
- Rehfuess, E. & W. H. O. (2007). *Combustibles para una vida mejor*. 56.
http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43705/9789243563169_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reingruber, H., & Pontel, L. B. (2018a). Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9, 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.07.001>
- Reingruber, H., & Pontel, L. B. (2018b). Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9(2018), 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.07.001>
- Restrepo, J. A. (2006). *Compuestos orgánicos volátiles*. 24–26.
- Rey Martínez, F. J., & Ceña Callejo, R. (2006). *Edificios saludables para trabajadores sanos, calidad de ambientes interiores*.
- Roffael, E., Khoo, K. C., Koh, M. P., & C L Ong. (1993). *Formaldehyde release from particleboard and other wood based panels*. (Kuala Lumpur (Ed.)). Forest Research Institute Malaysia.
- Rojó, N., Obregón, I., Manrique, R., & Elías, A. (2012). Aproximación a La Problemática Del Aire Interior. *Aeipro.Com*, 11–13.
http://aeipro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12_1162_1174.3791.pdf
- Ruiz, A. A. B. (2019). *España en cifras 2019* (Vol. 3, Issue 2).
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Ruiz Bautista, L. (2019). Cardiovascular impact of PM2.5 from the emissions of coal-fired power plants in Spain during 2014. *Medicina Clinica*, 153(3), 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2018.11.017>
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(9), 805–814.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- Sáez, E. (2017). Análisis de la calidad del aire interior en función de la tipología de vivienda. *Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de La Comunidad de Madrid*, 2(Ii), 1–98. <https://doi.org/M-48.739-2010>
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536–2572.
<https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- Salthammer, T., Schieweck, A., Gu, J., Ameri, S., & Uhde, E. (2018). Future trends in ambient air pollution and climate in Germany – Implications for the indoor environment. *Building and Environment*, 143(May), 661–670.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.050>
- Salud, 68. Asamblea Mundial de la. (2015). *65 Asamblea Mundial De La Salud*.
<https://doi.org/10.1080/00222349508219502>
- Schneider, T., Sundell, J., Bischof, W., Bohgard, M., Cherrie, J. W., Clausen, P. A.,

- Dreborg, S., Kildesø, J., Kjærgaard, S. K., Løvik, M., Pasanen, P., & Skyberg, K. (2003). “EUROPART”. Airborne particles in the indoor environment. A European interdisciplinary review of scientific evidence on associations between exposure to particles in buildings and health effects. *Indoor Air*, 13(1), 38–48. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.02025.x>
- Schultz, M. M. (2014). Chemicals of Environmental Concern. In *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (Third Edit, Vol. 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01004-6>
- Secretario, E., Generales, P., Generales, P., Decreto, R., Reglamento, E., Sanitaria, A. C., & Decreto, R. (1998). *Ministerio de economía y hacienda 18794*. 130570.
- Shaya, J., Srour, H., & Karamé, I. (2016). An Outline of Carbon Dioxide Chemistry, Uses and Technology. *Intech, I*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- Shrubsole, C., Dimitroulopoulou, S., Foxall, K., Gadeberg, B., & Doutsis, A. (2019). IAQ guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK. *Building and Environment*, 165(September), 106382. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106382>
- Śmielowska, M., Marć, M., & Zabiegała, B. (2017). Indoor air quality in public utility environments—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11166–11176. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8567-7>
- Sonetti, G., Brown, M., & Naboni, E. (2019). About the triggering of UN sustainable development goals and regenerative sustainability in higher education. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su11010254>
- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017a). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Energy Procedia*, 128, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.039>
- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017b). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Encyclopedia of Environmental Health*, 128, 213–220. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52272-6.00262-2>
- Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Oman, L. D., & Strahan, S. E. (2019). The Effects of a 1998 Observing System Change on MERRA-2-Based Ozone Profile Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 3(2018), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2019JD030257>
- Stull, R. B. (1988). *AN INTRODUCTION TO BOUNDARY LAYER METEOROLOGY*.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air, Supplement*, 14(SUPPL. 7), 51–58. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Tang, W., Arellano, A. F., DiGangi, J. P., Choi, Y., Diskin, G. S., Agustí-Panareda, A., Parrington, M., Massart, S., Gaubert, B., Lee, Y., Kim, D., Jung, J., Hong, J., Hong, J.-W., Kanaya, Y., Lee, M., Stauffer, R. M., Thompson, A. M., Flynn, J. H., & Woo, J.-H. (2018). Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field

- campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 11007–11030. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11007-2018>
- Tang, X., Bai, Y., Duong, A., Smith, M. T., Li, L., & Zhang, L. (2009). Formaldehyde in China: Production, consumption, exposure levels, and health effects. *Environment International*, 35(8), 1210–1224. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.06.002>
- Topham, S., Bazzanella, A., Schiebahn, S., Luhr, S., Zhao, L., Otto, A., & Stolten, D. (2014). Carbon Dioxide. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (p. 39). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/14356007.a05>
- Ulrich, R. S., Zimring, C., Zhu, X., DuBose, J., Seo, H. B., Choi, Y. S., Quan, X., & Joseph, A. (2008). A review of the research literature on evidence-based healthcare design. *Herd*, 1(3), 61–125. <https://doi.org/10.1177/193758670800100306>
- Unidas, N. (1997). *LEY 629 Diciembre 27 de 2000: Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Vol. 61702).
- Vallejo, C. (2018). *Evaluación del material particulado micro-plásticos y su relación con la calidad del aire en el interior de los hogares, Comas, 2018*.
- Vivienda, M. de. (2006). *Código Técnico de la Edificación Partes I y II*. 1061.
- Wang, Z. (2018). Energy and Air Pollution. *Comprehensive Energy Systems*, 1–5, 909–949. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00127-9>
- Ware, J. H., Thibodeau, L. A., & Speizer, E. (1981). Assessment of the health effects of atmospheric sulfur oxides and particulate matter: Evidence from observational studies. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 41(October), 255–276. <https://doi.org/10.2307/3429322>
- Warheit, D. B., Hart, G. A., Hesterberg, T. W., Collins, J. J., Dyer, W. M., Swaen, G. M. H., Castranova, V., Soiefer, A. I., & Kennedy, G. L. (2001). Potential pulmonary effects of man-made organic fiber (MMOF) dusts. *Critical Reviews in Toxicology*, 31(6), 697–736. <https://doi.org/10.1080/20014091111965>
- Warren, P. (2000). Multizone Air Flow Modelling (COMIS). *International Energy Agency*, 48.
- Wu, F., Jacobs, D., Mitchell, C., Miller, D., & Karol, M. H. (2007). Improving indoor environmental quality for public health: Impediments and policy recommendations. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 953–957. <https://doi.org/10.1289/ehp.8986>
- Xia, Y., Wang, J., Gu, C., Ling, Y., & Gao, Z. (2020). *MnO₂ / Al foil decorated air cleaner with self-driven property for the abatement of indoor formaldehyde*. 382(August 2019).

CAPÍTULO 06. EL MODELO CFD-RANS

6.1 Introducción

La aplicación de los modelos de CFD son utilizados para análisis de los flujos de aire, ya sea para macro elementos como es el aire urbano, o como elementos más específicos como es el sistema respiratorio dentro del campo de la medicina. La capacidad de simular el rendimiento de un edificio es necesaria para muchos aspectos de su diseño y funcionamiento. Se incluyen la conservación de la energía acotaba Warren (2000), para posicionar la importancia del sistema de modelado en tiempo real, que progresivamente se perfecciona con los avances en la concepción física de edificios y los requisitos de habitabilidad y confort, el conocimiento del comportamiento de los ocupantes, el acceso a los datos meteorológicos y el aumento de la velocidad de procesamiento de las herramientas computacionales y lógicamente, la potencia de las computadoras u ordenadores. Es decir, conforme se asimilan las variables que interactúan para condicionar un espacio interior, se incrementan los recursos para caracterizarlo.

En el último caso la incorporación de contaminantes tales como el CO₂, las partículas en suspensión (PM_{2.5}), el formaldehído y otros, se consideran relevantes por su incidencia en la conservación de la salud.

A nivel general, el uso de sistema de modelado en tiempo real o para proyección de escenarios en materia de medio ambiente ha tenido un gran desarrollo en los últimos años. Así lo expone Sánchez (2019) para simular la atmósfera urbana, incluyendo la vegetación y la química atmosférica. Con este referente, y las experiencias de autores como Vardoulakis *et al.* (2003) en torno a la calidad del aire urbano y la meteorología, Mochida & Lun (2008) sobre el viento y confort térmico, Buccolieri, Santiago, Rivas & Sánchez (2018) sobre los efectos de la vegetación urbana, Zhai & Chen (2005) en el diseño del clima interior/exterior, o Li *et al.* (2012) en energía renovable, el presente capítulo pretende contextualizar tales aplicaciones y otros casos de simulación mediante sistemas CFD, que si bien parten del interés exclusivo sobre el aire interior y su calidad, no desconocen su versatilidad para ámbitos complementarios.

Por otro lado, si bien la problemática base ha quedado descrita en apartados anteriores, conviene destacar que al momento de ejecución del presente estudio no se ha detectado proliferación de estudios actuales o anteriores vinculados a simulación mediante sistemas CFD. De hecho, desde finales del siglo XX, este campo de la simulación, ya representaba uno de los sectores menos desarrollados y conocidos. Por ello, se busca generar un aporte puntual mediante la utilización del modelo comercial COMOSOL *Multiphysics* al analizar su potencial para señalar las trayectorias de las partículas contaminantes y las interacciones que con ello se relacione e interactúe con las condiciones físicas de un AI.

6.2 Simulación mediante sistemas CFD

El estudio de la CAI mediante la modelización y la simulación ha atraído a varios investigadores (Quality *et al.*, 2015) a lo largo del tiempo. Tales procesos han utilizado diversos tipos de herramientas informáticas desde finales de los 70 (Liddament, 2019).

Un referente histórico en la materia es el programa COMIS (*Conjunction of multizone Infiltration Specialists*) desarrollado entre 1988 y 1989 entre *The Energy Performance of Buildings Group, Lawrence Berkeley National Laboratory* y un amplio grupo multinacional de expertos; en su momento este planteamiento revolucionó el estudio sobre el AI y los sistemas de modelado, ya que planteaba desarrollar un programa de infiltración multizona basado en los mejores algoritmos disponibles en la época, capaces de cubrir los principales mecanismos del aire en movimiento, incluyendo flujo a través de grietas, intercambio a través de grandes aberturas, entre otras variables (Warren, 2000). Sistemas previos como AIDA, AIRNET, ASCOS, BREEZE, BREVENT, CBSAIR, CONTAM, ESP, LBL *model*, MZAP, NORMA, PASSPORT-AIR, TURBUL y VENCON fueron utilizados para evaluar la eficiencia de COMIS. La mitad de ellos tenían la capacidad de evaluaciones multizonales, y el programa demostró alta eficacia. COMIS desarrolla la capacidad de resolución de movimientos naturales del aire dentro y fuera de un espacio analizado con las evaluaciones multizonas (Warren, 2000) entre los reportes de COMIS y las otras aplicaciones informáticas, determinando que el primero proporcionaba un buen medio para predecir la distribución de los contaminantes.

Como se evidencia, aunque exista relevancia en el estudio de los contaminantes, predomina el componente del flujo de aire para su transporte, de ello, la identificación de contaminantes frecuentes, no se desarrolla. Es así que, se inyectó CO₂ y vapor de agua, a una tasa media, en una zona (un dormitorio) durante dos horas, y se realizó la vigilancia de las concentraciones resultantes en cada zona bajo periodos específicos (Warren, 2000). Es decir, se tratan de modelos genéricos que estudiaron bajo dicho alcance el comportamiento de los contaminantes.

CONTAM es otro ejemplo destacado. Este software creado por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) de Estados Unidos, constituye uno de los modelos internacionales de simulación multizona más utilizados desde su creación en los años 80. Comenzó con el trabajo de Walton y Axley (Grot 1991) en un algoritmo de computadora para predecir el flujo de aire entre habitaciones, así como el flujo a través de pequeñas y grandes aberturas. Luego evolucionó a la *National Bureau of Standards* (ahora NIST) con el nombre de *General Indoor Air Pollution Concentration Model Project* iniciado en 1985 (Ng *et al.*, 2012). Esta versión se convirtió en CONTAM86. Desde entonces CONTAM ha pasado por muchas renovaciones y está en uso actualmente (Liddament, 2019). La diversidad de estudios realizados demuestra su solvencia en el área.

Musser (2000) expone que mediante el uso de CONTAM se pudo realizar cálculos de diseño para un nuevo edificio en un campus universitario de la Universidad de Ohio (Estados Unidos). El edificio incorpora características ambientalmente "progresivas", como ventilación natural, recuperación de energía, un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales y CO₂, por lo que era necesario dimensionar un extractor de aire para el aislamiento de la fuente, seleccionar cantidades mínimas de ventilación para controlar los contaminantes relacionados con el edificio, y especificar procedimientos para eliminar los contaminantes antes de la ocupación. De ello, el sistema está dimensionado para suministrar aire de ventilación para el máximo número de ocupantes, y el control de la demanda de CO₂ ajusta este volumen en base a la ocupación real.

Por su parte, Ng LC, Persily, Emmrich & Musser (2012) con base en 16 edificios del Departamento de Energía de los Estados Unidos, y el uso de *EnergyPlus* y CONTAM, estudian la evaluación de nuevas tecnologías y el apoyo al desarrollo de códigos de energía en la búsqueda de mejoras en la eficiencia energética. En concreto, análisis del flujo de aire y transporte de contaminantes mediante modelos multi zona

determina relaciones entre las tasas de cambio de aire exterior calculadas por CONTAM y el clima, aunque el modelo no puede ser considerado como realista. Pese a ello, el análisis de contaminantes para el dióxido de carbono generado por los ocupantes, compuestos orgánicos volátiles de fuentes internas, el aire libre partículas de materia, y el ozono exterior (Tabla 6.1) permitieron determinar una referencia útil para el uso posterior de estos modelos para investigar los enfoques de construcción ventilación y otras tecnologías para reducir simultáneamente el consumo de energía de los edificios mientras se mantiene o mejora la CAI (Ng LC, Persily, Emmrich & Musser 2012, 52).

Contaminante	Peso Molecular	Diámetro medio (µm)	Densidad efectiva (kg/m³)
CO ₂	44	N/A	N/A
Ozono	48	N/A	N/A
PM _{2.5}	N/A	0,3	1.000
VOC	92	N/A	N/A

Tabla 6.1 Propiedades de los contaminantes simulados en COTAM. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Además, el estudio es relevante por la diversidad de tipos arquitectónicos y funciones consideradas, es decir, restaurante, centros de atención a la salud, hoteles, oficinas, escuelas, supermercados, almacenes y otros (Tabla 6.2)

Restaurante de servicio completo	Concentraciones medias diarias de contaminantes		Concentraciones máximas diarias de contaminantes	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO ₂ , mg/m³	1020	1579	1352	2433
Ozono, µg/m³	3	62	5	86
PM _{2.5} , µg/m³	1	42	2	61
COV, µg/m³	27	62	31	343
Hospital	Concentraciones medias diarias de contaminantes		Concentraciones máximas diarias de contaminantes	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO ₂ , mg/m³	749	991	759	1145
Ozono, µg/m³	1	40	1	58
PM _{2.5} , µg/m³	<1	24	1	33
COV, µg/m³	38	242	42	243
Oficinas	Concentraciones medias diarias de contaminantes		Concentraciones máximas diarias de contaminantes	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO ₂ , mg/m³	826	1219	887	1416
Ozono, µg/m³	1	34	2	57
PM _{2.5} , µg/m³	<1	23	1	32
COV, µg/m³	75	291	104	812

Escuela Primaria	Concentraciones medias diarias de contaminantes		Concentraciones máximas diarias de contaminantes	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO ₂ , mg/m ³	793	1279	820	1683
Ozono, µg/m ³	2	74	5	98
PM _{2.5} , µg/m ³	<1	52	1	68
COV, µg/m ³	15	172	34	1186
Hotel Pequeño	Concentraciones medias diarias de contaminantes		Concentraciones máximas diarias de contaminantes	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO ₂ , mg/m ³	759	1054	847	1363
Ozono, µg/m ³	1	61	1	89
PM _{2.5} , µg/m ³	<1	41	1	60
COV, µg/m ³	16	282	22	306
Comercio de venta al por menor	Concentraciones medias diarias de contaminantes		Concentraciones máximas diarias de contaminantes	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO ₂ , mg/m ³	741	1173	757	1486
Ozono, µg/m ³	1	43	2	68
PM _{2.5} , µg/m ³	<1	32	1	45
COV, µg/m ³	20	180	24	436

Tabla 2.2 Resumen de las concentraciones de contaminantes calculadas. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Con base en los ejemplos previos, pero sobre todo en la versatilidad intrínseca de la herramienta informática, es posible determinar que las prestaciones de COTAM incluyen la capacidad de calcular las tasas de flujo de aire de un edificio y las presiones relativas entre zonas contiguas, evaluar la idoneidad de las tasas de ventilación de un edificio, así como su variación a lo largo del tiempo y la distribución del aire de ventilación dentro de un edificio, para estimar el impacto de los esfuerzos de estanqueidad de la envolvente en las tasas de infiltración y las implicaciones energéticas asociadas. El programa también se ha utilizado ampliamente para el diseño y análisis de sistemas de control de humo y la predicción de las concentraciones de contaminantes, llegando a aplicarse para determinar el rendimiento de la CAI de los edificios antes de que se construyan y ocupen, investigar los efectos de diversas decisiones de diseño relacionadas con los sistemas de ventilación y la selección de materiales de construcción, evaluar las tecnologías de control de la CAI, el rendimiento de la CAI de los edificios existentes y otras aplicaciones.

Lo cierto es que, desde hace aproximadamente 50 años, predecir el movimiento del aire de una habitación con suficiente realismo ha sido considerado de utilidad en la práctica del diseño (Lemaire 1993), y por ello, el conjunto de recursos informáticos ha proliferado en torno a esta necesidad y otras problemáticas asociadas como la CAI

que progresivamente tiene protagonismo. De hecho, si se considera que durante décadas el uso de la monitorización del movimiento del aire a través de gas trazador era usual, hoy resulta impensable, ya que gases típicos usados en este proceso como el hexafluoruro de azufre (SF_6), los perfluorocarburos (PFC), el freón, o el óxido de nitrógeno (N_2O) son importantes gases de efecto invernadero, o simplemente definidos como tóxicos (Liddament s/f), sobre todo a exposición prolongada. A su vez, esto está articulado a sus prestaciones químicas intrínsecas (estabilidad ambiental, no reactivo, y otras). Pese a esta situación, aún existe la excepción con el CO_2 , debido a su bajo costo y facilidad de aplicación para evaluar la adecuación de la ventilación en espacios ocupados.

Finalmente, conviene indicar que los sistemas CFD que iniciaron su recorrido teórico (descripción del comportamiento del aire interior) y práctico (aplicación del comportamiento del aire como condicionante de diseño) progresivamente, y desde los 80s se han orientado a mejorar el confort y bienestar de los usuarios. En este último espectro, la presencia del CO_2 como indicador de la presencia de otros contaminantes es de relevancia.

6.3 El caso de COMSOL Multiphysics ®

Conocido como FEMLAB antes de 2005, COMSOL *Multiphysics* ® es un paquete de software comercial de elementos finitos diseñado para abordar una amplia gama de fenómenos físicos (Cutress, Dickinson & Compton 2010; Dickinson, Ekström & Fontes 2013) tradicionalmente separados de la física aplicada y la ingeniería.

Los orígenes de la herramienta se remontan a los estudiantes graduados del profesor Germund Dahlquist en el *Royal Institute of Technology* (KTH) en Estocolmo (Suecia), con el propósito de desarrollar códigos (Li, Ito, Wu, Lpwry & Loheide II 2009). Desde entonces, se basa en la implementación de ecuaciones usando interfaces de física a partir de paquetes pre construidos y una selección de condiciones límite asociadas (Dickinson, Ekström & Fontes 2014). Mantiene la estructura general de las primeras herramientas computacionales dedicadas a la simulación de fluidos, lo cual lo hace altamente utilizado. Además, COMSOL *Multiphysics* ® viene con una biblioteca básica de insumos predeterminados para aplicaciones específicas (convección/difusión, dinámica de fluidos, transferencia de calor, entre otros) (Li, Ito,

Wu, Lpwry & Loheide II 2009), pero, además, permite construir sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales parciales.

A nivel informático, el paquete es compatible con casi todas las plataformas (por ejemplo, Windows, Mac, Linux, Unix), y ofrece una amplia interfaz para MATLAB de MathWorks (<http://www.mathworks.com/>) y sus cajas de herramientas para una gran variedad de programación, posibilidades de pre-procesamiento y post-procesamiento (Li, Ito, Wu, Lpwry & Loheide II 2009).

6.3.1 Casos de simulación

Debido a la versatilidad de las herramientas informáticas como COMSOL Multiphysics® y otras, investigaciones previas al AI y la CAI han llegado al punto de proponer sistemas de identificación de la presencia de CO₂ en la atmósfera terrestre (Sardar, Faisal & Ahmed 2020), y con ello, prever los contingentes necesarios para la conservación de la salud pública. Recortando la escala, el contexto urbano ha sido ampliamente estudiado con iguales fines, y no menos importante es dicha trascendencia en cuanto al AI, en torno a lo cual se desarrolla prioritariamente lo descrito a continuación. Normalmente, se desarrollan modelos CFD tridimensionales dependientes del tiempo para evaluar los patrones de flujo de aire, la velocidad del aire y la temperatura de distribución debido a la unidireccional laminar (vertical hacia abajo) de los flujos de aire (Méndez, San José, Villafuerte & Castro 2007), en otros casos flujos de aire turbulentos y también a las cortinas de aire para lograr la buena CAI y una óptima asepsia del aire (Balocco, Petrone & Cammarata 2015 citando a Pfof 1981). Estos modelos y su versatilidad encuentran aplicaciones directas para la evaluación del aire urbano, la dispersión de contaminantes, incluyendo reacciones químicas (Sánchez 2019).

En el último tema, según Lavacchi, Bardi, Borri, Caporali, Fossati & Perissi (2009), específicamente COMSOL *Multiphysics*® proporciona una ruta directa a la simulación de sistemas electroquímicos con geometría compleja. En la misma línea, Makarem, Farsi & Rahimpour (2020) desarrollan un marco matemático completo para simular el flujo hidrodinámico y las características de transferencia de masa del sistema, incluyen la continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes, el transporte de dos fases y el modelo de velocidad de reacción al software de COMSOL *Multiphysics*®, para realizar la simulación dinámica de la captura de CO₂ de

corrientes ricas en hidrógeno por medio de una solución acuosa de DEA en condiciones dinámicas (Figura 6.2).

Figura 6.2: Simulación de la magnitud de velocidad y las líneas de corriente. Fuente y Elaboración: Makarem, Farsi y Rahimpour 2020.

Como se ha enunciado, campos de aplicación de los sistemas CFD también se vinculan con la electroquímica. Tal es el caso descrito por Fan, Deng, Zhan, Li, Wang & Qiao (2018) para generar el modelo acoplado hidráulico-mecánico-térmico de CO₂-ECBM, que combina gases binarios (CO₂ y CH₄) infiltración y difusión, donde también se considera la adsorción no isotérmica. De ello, a través de COMSOL *Multiphysics*®, se demuestra que la inyección de CO₂ en el lecho de carbón tiene un buen efecto en la mejora de la producción de CH₄, y tanto la tasa de almacenamiento de CO₂ como la tasa de producción de CH₄ aumentan con el aumento de la presión de inyección. En esta área, varios autores acotan que, si bien los enfoques basados en COMSOL *Multiphysics*® han dado excelentes resultados en circunstancias específicas, estos dependen de la profunda experiencia de sus potenciales usuarios y, por lo tanto, puede fácilmente conducir a predicciones erróneas en manos de novatos (Klymenko, Svir & Amatore 2013). La última observación es cierta y extrapolable a cualquier área de conocimiento. En los otros escenarios de trabajo, y de cara a la diversidad de herramientas computacionales existentes, la simulación numérica se está volviendo cada vez más popular para entender diferentes fenómenos, pero sobre todo la del movimiento del aire en un espacio cerrado.

Allí son numerosos trabajos, estudiando el patrón del flujo del aire en un espacio cerrado por medio de CFD y validando su numeración con los datos experimentales (Méndez, San José, Villafruela & Castro 2008).

Según Patrama Putra (2017), los sistemas de modelación permiten evaluar la calidad ambiental interior en cuanto a la distribución de la velocidad del aire y la distribución de la temperatura interior, en complemento con la percepción de los ocupantes del edificio en cuanto a su satisfacción con el aire interior y la temperatura del interior del edificio. El caso en concreto se ha aplicado a oficinas para determinar que la utilización de técnicas de modelización y simulación son un enfoque exacto, no obstante, es más beneficioso si se complementa con la técnica del cuestionario para resolver problemas que implican la percepción humana. Además, resulta de interés para espacios con usuarios diversos y ocupación intensa.

Berglund (2018) expone en el caso de espacios interiores un ejercicio de interés al estudiar la eficiencia de la ventilación esperada y cómo los filtros afectan al flujo de aire. De hecho, existen aplicaciones en el campo de las dependencias de salud en donde en comparación con otros modelos, se aplican los sistemas CFD para proporcionar indicaciones útiles sobre las condiciones del microclima y la calidad del aire interior (Chow & Yang 2003; Balocco, Petrone & Cammarata 2015) y lograr la máxima asepsia del ambiente interior. De hecho, algunos autores han utilizado la simulación mediante sistemas CFD para un análisis tridimensional del confort térmico y la eliminación de contaminantes en hospitales: comprobando la validez del modelo mediante pruebas de la literatura experimental y la comparación de datos. Calculan el voto medio previsto (PMV), la eficacia de la eliminación de contaminantes (CRE) y la concentración media de contaminantes en la zona de respiración mediante resultados de simulación transitorios (Figura 6.3), con el fin de evaluar la eficacia del sistema (Balocco, Petrone & Cammarata 2015).

Como complemento, los modelos CFD muestran la eficacia de los diferentes sistemas de ventilación en la eliminación de bacterias y partículas utilizando una estrategia de retorno aducido para inducir el flujo de aire de las zonas limpias a las menos limpias (Yam, Yuen, Yung & Choy 2011). En este tipo de estudios normalmente se ha optado por el uso de programas informáticos comerciales que permiten un enfoque multi físico a través de soluciones de las ecuaciones rectoras relacionadas por un método de elementos finitos (COMSOL 2012). Tal es el interés por la sinergia en la aplicación de las herramientas informáticas como de los pormenores y las estrategias para la conservación de la salud que, en el mismo campo de estudio, el comportamiento del flujo del aire al interior del sistema respiratorio ha sido tratado por investigadores del área médica que desde inicios del siglo XX recurrían al modelo

matemático para explicar el depósito pulmonar de partículas, y con la misma intención han evolucionado hasta la dinámica computacional de fluidos debido a su capacidad de simular el comportamiento del aire de las partículas en su interior (Fernández Tena & Casan Clará 2012).

Figura 6.3 Reportes generales de simulación. Fuente y Elaboración: Balocco, Petrone y Cammarata 2015.

Li, Kleinstreuer & Zhang (2007) simularon la inhalación laminar transitoria con una forma de onda de entrada realista en un modelo asimétrico de deposición de micropartículas en las vías respiratorias superiores humanas mediante ecuaciones de Navier-Stokes. Por su parte, Kleinstreuer & Zhang (2010) parten de una comprensión del intercambio de O₂ - CO₂, la deposición de material tóxico inhalado y la posible eliminación de mucosidad, así como la presencia de un fármaco aerosol que se suministra para combatir las enfermedades pulmonares y sistémicas, para exponer que, las simulaciones precisas y realistas de las estructuras de flujos de aire y de las deposiciones de las partículas inhaladas en las vías respiratorias humanas son las más importantes para la comprensión de los fenómenos de transporte básicos,

de los estudios de dosimetría y de efectos sobre la salud, considerando las partículas tóxicas o terapéuticas (Figura 6.4).

Se recurren a la simulación de flujos mediante modelos CFD, y también se incluye el modelado de las partículas en suspensión según el método de Euler Lagrange (partículas micrónicas) y el marco de Euler-Euler (partículas nanopartículas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..4**)). Estudios futuros en la misma área ratifican los métodos aplicados hacia los análisis de la dinámica de las partículas no esféricas, las interacciones trifásicas de los flujos, los sustitutos realistas de las gotitas tóxicas y la estructura de los fluidos (Kleinstreuer & Zhang 2010).

Figura 6.4: Ejemplos de estructuras de flujo de aire en las cavidades nasales a una velocidad constante de entrada de 7,5 lts por minuto. a) líneas de corriente y contornos de velocidad en 3D, y b-g) velocidad de flujos en seis cortes seleccionados. Fuente y Elaboración: Kleinstreuer y Zhang 2010.

Sobre esta aproximación, Mead-Hunter, King, Larcombe & Mullins (2012) indican que, casi todos los modelos para el estudio del depósito de aerosoles respiratorios han utilizado análogos rígidos de las vías respiratorias, sin tener en cuenta los efectos del movimiento de los pulmones en la deposición de partículas. En consecuencia, examinan la deposición de partículas en una geometría tipo *Weibull* con un método de malla expansiva (Figura 5) que confirman diferentes campos de flujo y patrones de deposición en una geometría pulmonar simple, en consecuencia, el modelo de malla expansiva y el flujo inducido reflejan mayor proximidad con el comportamiento real de los pulmones. Con esta aproximación y considerando que, la individualización de las terapias aerosolizadas es una necesidad (Fernández Tena & Casan Clará

2012), el modelado CFD permitirá la reconstrucción tridimensional del árbol bronquial.

Figura 6.4: Ejemplos de estructuras de flujo de aire en las cavidades nasales a una velocidad constante de entrada de 7.5 lts por minuto. a) líneas de corriente y contornos de velocidad en 3D, y b-er y Zhang 2010.

Figura 6.5: Velocidad en varias secciones transversales en la máxima inspiración; a) con flujo constante, b) flujo oscilante y c) flujo oscilante en una malla móvil. Fuente y Elaboración: Mead-Hunter, King, Larcombe y Mullins 2012.

6.4 Referencias

- Axley, J. W. (1987). Indoor Air Quality Modeling Phase II Report. Nbsir 87-3661, October 1987.
- Balocco, C., Petrone, G., & Cammarata, G. (2015). Thermo-fluid dynamics analysis and air quality for different ventilation patterns in an operating theatre. *International Journal of Heat and Technology*, 33(4), 25–32.
<https://doi.org/10.18280/ijht.330404>
- Berglund, J. (2018). The prospect of living filters. UMEA UNIVERSITY.
- Buccolieri, R., Santiago, J. L., Rivas, E., & Sanchez, B. (2018). Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. *Urban Forestry and Urban Greening*, 31(July 2017), 212–220.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.003>
- Chow, T. T., & Yang, X. Y. (2003). Performance of ventilation system in a non-standard operating room. *Building and Environment*, 38(12), 1401–1411.
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00155-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00155-0)
- CONTAM Introduction | NIST. (n.d.). Retrieved November 28, 2020, from <https://www.nist.gov/el/energy-and-environment-division-73200/nist-multizone-modeling/software/contam>
- Dickinson, E. J. F., Ekström, H., & Fontes, E. (2014). COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 40, 71–74.
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2013.12.020>
- Fan, Y., Deng, C., Zhang, X., Li, F., Wang, X., & Qiao, L. (2018). Numerical study of CO₂-enhanced coalbed methane recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 76(June), 12–23.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.016>
- Fernández Tena, A., & Casan Clarà, P. (2012). Depósito pulmonar de partículas inhaladas. *Archivos de Bronconeumología*, 48(7), 240–246.
<https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.02.003>
- Grot, R. A. (1991). User Manual NBSAVIS.
- Kleinstreuer, C., & Zhang, Z. (2010). Airflow and Particle Transport in the Human Respiratory System. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(1), 301–334.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145453>
- Klymenko, O. V., Svir, I., & Amatore, C. (2013). A new approach for the simulation of electrochemiluminescence (ECL). *ChemPhysChem*, 14(10), 2237–2250.
<https://doi.org/10.1002/cphc.201300126>
- Lavacchi, A., Bardi, U., Borri, C., Caporali, S., Fossati, A., & Perissi, I. (2009). Cyclic voltammetry simulation at microelectrode arrays with COMSOL Multiphysics®. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39(11), 2159–2163.
<https://doi.org/10.1007/s10800-009-9797-2>
- Li, Q., Ito, K., Wu, Z., Lowry, C. S., & Loheide, S. P. (2009). COMSOL multiphysics: A novel approach to ground water modeling. *Ground Water*, 47(4), 480–487.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00584.>

- Li, Y., Paik, K. J., Xing, T., & Carrica, P. M. (2012). Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics. *Renewable Energy*, 37(1), 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.029>
- Liddament, M. (2019). The AIVC of the 20 th century (Issue 9). <https://www.aivc.org/resources/collection-papers/volume/40th-aivc-8th-tightvent-6th-venticool-conference-ghent-belgium-15>
- Makarem, M. A., Farsi, M., & Rahimpour, M. R. (2020). CFD simulation of CO2 removal from hydrogen rich stream in a microchannel. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.221>
- Mead-Hunter, R., King, A. J. C., Larcombe, A. N., & Mullins, B. J. (2013). The influence of moving walls on respiratory aerosol deposition modelling. *Journal of Aerosol Science*, 64, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.05.006>
- Méndez, C., San José, J. F., Villafruela, J. M., & Castro, F. (2008). Optimization of a hospital room by means of CFD for more efficient ventilation. *Energy and Buildings*, 40(5), 849–854. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.003>
- Mochida, A., & Lun, I. Y. F. (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1498–1527. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.033>
- Musser, A. (2000). MULTIZONE MODELINC AS IN INDOOR AIR QUALITY by NIST. *Proceedings of Healthy Buildings 2000*, 2, 455–460.
- Ng, L. C., Musser, A., Persily, A. K., & Emmerich, S. J. (2012). NIST Technical Note 1734 - Airflow and indoor air quality models of DOE reference commercial buildings. National Institute of Standards and Technology, 163. [http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech Note 1734 - CONTAM reference bldgs.pdf](http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/Tech%20Note%201734%20-%20CONTAM%20reference%20bldgs.pdf)
- Putra, J. C. P. (2017). A Study of Thermal Comfort and Occupant Satisfaction in Office Room. *Procedia Engineering*, 170, 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.057>
- Quality, I. A., Building, O., Chandra, J., Putra, P., Degree, M., & Engineering, C. (2015). Effects of Indoor Air Quality on the Occupant's Health and Productivity in an Office Building (Issue April). University Tun Hussein Onn Malaysia.
- Sánchez, B. (2019). Modelling the wind flow and dispersion of reactive pollutants in cities at microscale.
- Sardar, M. R., Faisal, M., & Ahmed, K. (2020). Design and characterization of rectangular slotted porous core photonic crystal fiber for sensing CO2 gas. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 30, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100379>
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: A review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)
- Warren, P. (2000). Multizone Air Flow Modelling (COMIS). *International Energy Agency*, 48.

- Yam, R., Yuen, P. L., Yung, R., & Choy, T. (2011). Rethinking hospital general ward ventilation design using computational fluid dynamics. *Journal of Hospital Infection*, 77(1), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2010.08.010>
- Zhai, Z. J., & Chen, Q. Y. (2005). Performance of coupled building energy and CFD simulations. *Energy and Buildings*, 37(4), 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.07.001>

CAPÍTULO 07. MODELANDO LA DISPERSIÓN DE FLUJOS DE PARTÍCULAS CONTAMINANTES

7.1 Introducción

El capítulo se enfoca en el uso de las herramientas digitales y aplicaciones de la herramienta computacional COMSOL *Multphysics*® que dan soporte a los flujos direccionales de contaminantes que se busca identificar con características determinadas, siguiendo corrientes europeas y que se relacionen con la salud humana, emisiones con parámetros fisiológicos particulares. La búsqueda del bienestar y la salud en el interior del espacio con el objetivo de aproximar las concentraciones de contaminantes con estos modelos de simulación y sus herramientas de evaluación que validen y se enfoque hacia un diseño sostenible que apunta a mejorar, tanto las condiciones de materialidad y su implicación en términos de salud humana.

Es importante considerar los datos a articular en las simulaciones y sus herramientas digitales con datos analizados químicamente en capítulos anteriores. Esto implica que el registro de datos como el uso de la simulación, pronostique mayoritariamente los comportamientos que se buscan y se transformen en evidencias de aporte desde la perspectiva arquitectónica. Las herramientas de software contienen sofisticados modelos digitales, datos y herramientas de vigilancia, más recursos para los diseños a través del uso BIM, con modelados que pueden utilizarse con una indeterminada cantidad de fines que persigan la sostenibilidad y el bienestar, confort y salud humana. Un confinamiento obligado por los efectos que produce el SARS-CoV-2 a la población mundial prolonga una estancia al interior de un espacio, que bajo las condiciones actuales y en referencia los estudios analizados en esta investigación apuntan a que se tienen niveles altos de contaminación ambiental interior.

7.2 Discriminación de un espacio interior

Mencionado en capítulo anterior, la Ordenación de la Edificación de la Ley 38/1999, que enmarca la funcionalidad y seguridad de los edificios y habitabilidad, que evidencia que el sector de la edificación es uno de los principales sectores económicos

con evidentes repercusiones en el conjunto de la sociedad y en los valores culturales que entraña el patrimonio arquitectónico (Reglamento *et al.*, 2015). Al respecto, las respuestas de planificación arquitectónica que materializan los criterios, al día de hoy van de la mano con la utilización de modelos *Building Information Modeling* (BIM) o *Heritage Building Informtaion Modeling* (HBIM) (Zanni *et al.*, 2019).

Estas herramientas computacionales han demostrado su potencial para facilitar el proceso de planificación, diseño, construcción y operación (Azhar *et al.*, 2008), sin embargo, con la incorporación de la simulación de elementos finitos, a través de la dinámica de fluidos computacionales (CFD), es posible además conocer de manera anticipada, los mencionado, flujos del aire (Adán & Huber, 2011). En este sentido, su utilidad trasciende hacia la gestión de la salud como una variable vinculada a todas las etapas. Por ello, el espacio a ser analizado corresponde a la revisión de las normativas europeas⁴, que abordan la preparación de métodos de medición/ensayo horizontal para determinar la emisión de sustancias peligrosas que estén reguladas por el producto de construcción al aire interior entre otras. A su vez, a partir de la norma particularmente la UNE EN 16516 se define un espacio interior de análisis de manera horizontal (Figura 7.1) y corresponden a:

- Un paralelepípedo de 3,00 m x 4,00m
- Tanto el suelo como el techo miden 3,00m x 4,00 m, resultando en superficies de 12,00 m² cada uno
- Las paredes son de altura 2,50 m
- Una puerta de 0,8 m (anchura) x 2 m (altura), resultando una superficie de 1,6 m²
- Una ventana de 2 m²;
- Selladores, y otras superficies muy pequeñas de hasta 0,2 m²
- El área total de la pared (menos la puerta y la ventana) es de 31,4 m².
- El volumen total de aire es de 30 m³

⁴ Norma bajo el mandato M/366 “Desarrollo de métodos de evaluación normalizados horizontales para enfoque armonizados relacionados con sustancias peligrosas en virtud de la directiva de Productos de construcción (DPC)”

Figura 7.1 Características geométricas del espacio modelo de simulación. Fuente: UNE EN 16516.
Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

7.2 Características bidimensionales del espacio modelo de simulación. Fuente: UNE EN 16516.
Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Por tanto, el estudio se centra de manera horizontal en este espacio (Figura 7.1) para el análisis de contaminantes, con discriminación de la mezcla turbulenta que no considera parte del análisis a desarrollarse por efecto de los efectos reactivos. En condiciones particulares de turbulencia y actividad química, las ecuaciones rectoras pueden ser comparables a los términos dinámicos. A su vez, para el desarrollo de la interfaz en un espacio dimensional (Figura 7.2) se maneja con las condiciones del compuesto presente en la muestra de aire y se calcula a partir del área de pico del detector utilizando el factor de respuesta del compuesto.

$$m_a = \frac{A_a - i_{st}}{b_{st}} \quad (6.1)$$

m_a es la masa del compuesto a en la muestra de aire [ng];

A_a es el área del pico del compuesto a en el cromatograma de la muestra [unidad de área];

i_{st} es la intersección de las ordenadas y la curva de calibración. Si la curva de calibración cruza el origen, i_{st} se considera 0;

b_{st} es la pendiente de la curva de calibración.

La concentración másica del compuesto en el aire muestreado se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$Ca = \frac{m_a}{V_a} - \frac{m_{ab}}{V_{ab}} \quad (6.2)$$

Ca es la concentración de la masa del compuesto a en el aire muestreado [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

Ma es la masa del compuesto presente en la muestra de aire de la cámara [ng];

m_{ab} es la masa del compuesto presente en el espacio en blanco de la cámara [ng]

V_a es el volumen de muestreo [l];

V_{ab} es el volumen de muestreo [l durante el muestreo del blanco].

La concentración de masa del compuesto en el aire de la sala de referencia se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$c_R = \frac{TEE_A L_{AR}}{AC_R} \quad (6.3)$$

c_R es la concentración de masa del compuesto a en el aire de la sala de referencia [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

TEE_A es la tasa de emisión específica de área [$\mu\text{g}/\text{m}^2 \text{ h}$] (también llamada factor de emisión);

L_{AR} es el factor de carga en la sala de referencia [$\text{m}^2/\text{sala de referencia m}^3$];

AC_R es la tasa de cambio de aire en la sala de referencia [cambios de aire/h].

7.2 Compuesto experimental

El compuesto experimental se basa en escoger un espacio que contenga dimensiones de manera horizontal para aplicar los valores de carga en su entorno de aire y condiciones propias del ambiente las presiones de aire para los modelos potenciales de CO₂, formaldehído y otros gases, que se utilizan para trazar isothermas en función de la presión reducida, se ajustaron a una ecuación viral calculada a partir del CFD. modelo de flujo laminar para investigar la hidrodinámica de los fluidos y los perfiles de velocidad en el micro canal considerado, se consideran las ecuaciones de continuidad de masa dinámica y de Navier-Stokes (Makarem et al., 2020) como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (6.4)$$

La interfaz de flujo laminar puede utilizarse para análisis estacionarios y dependientes del tiempo. Para números de Reynolds más altos, un flujo se vuelve inherentemente dependiente del tiempo y tridimensional, y se deben utilizar estudios dependientes del tiempo.

7.3 La geometría, la malla de elementos finitos y las condiciones de los límites

7.3.1 Mallado de elementos finitos tipo 1 condiciones físicas a tratar

La interfaz del CFD configura una interacción entre las partículas fluidas y el rastreo de partículas para el flujo de fluidos junto con la interfaz de flujo laminar (Eq. 6.4). La función de acoplamiento de la interacción y acoplamiento de la multifísica maneja un rol propio de resolución. La interfaz de interacción de partículas fluidas se usa para modelar el movimiento de partículas en un fluido. A medida que las partículas se aceleran o desaceleran por la fuerza de arrastre ejercida por el fluido, la fuerza de reacción correspondiente se aplica al fluido (Makarem *et al.*, 2020). El mallado de elementos finitos utilizado, en este caso a la física utiliza en programa para dar solución a los límites planteados en cada campo. Se considera el flujo laminar, con adiciones del rastreo de partículas y la interacción de del fluido de la partícula.

Las ecuaciones resueltas por la interfaz de flujo laminar se corresponden con las de Navier-Stokes para la conservación del momento y la ecuación de continuidad para

la conservación de la masa. Un modelo de propiedades de fluido está activo de forma predeterminada en toda la selección de interfaz (Figura 7.3). La selección del dominio de la interfaz de flujo puede editarse si el modelo contiene dominios sólidos. La malla se refina en los límites entre los dominios sólido y fluido y también cerca de las esquinas afiladas. Las condiciones físicas de la geometría son tratados a través de CAD kernel. Las condiciones de trabajo del equipo computacional para los resultados y análisis corresponden a un tiempo de 6 h 32 min 44 s, de manera continua que para el caso y con los errores que se han producido llevaron aproximadamente 60 días.

Para el CO₂ la viscosidad de referencia es $13.7 \frac{\eta}{\mu Pa \cdot s}$, la del aire es $17,2 \frac{\eta}{\mu Pa \cdot s}$ son valores iniciales con los que se pueden ingresar al modelo (Figura 7.3).

Property	Variable	Value	Unit	Property group
☒ Dynamic viscosity	mu	eta(T)	Pa-s	Basic
☒ Density	rho	rho(pA,T)	kg/m ³	Basic
Ratio of specific heats	gamma	1.3	1	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	Cp(T)	J/(kg-K)	Basic
Thermal conductivity	k_iso ; k...	k(T)	W/(m-K)	Basic

Figura 7.3 Datos de la interfaz. Fuente: COMOSOL *Multiphysics*. Elaboración: astillo Carchipulla 2020.

Para las condiciones del aire se introducen los valores que corresponden a la siguiente figura, donde la viscosidad dinámica del aire es $17,2 \frac{\eta}{\mu Pa \cdot s}$. Elemento de mallado de elementos finitos (Figura 7.4) corresponde a una normal que se interpreta con aproximación a 5cm en la estructura que compone el entorno a tratar.

Figura 7.4 Mallado de elementos finitos en condición normal. Fuente: COMOSOL *Multiphysics*. Elaboración Castillo Carchipulla 2020.

Property	Variable	Value	Unit	Property group
Coefficient of thermal expansion	alpha_i...	alpha_p(...	1/K	Basic
Mean molar mass	Mn	0.02897	kg/mol	Basic
Bulk viscosity	muB	muB(T)	Pa·s	Basic
Dynamic viscosity	mu	eta(T)	Pa·s	Basic
Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic
Electrical conductivity	sigma_i...	0[S/m]	S/m	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	Cp(T)	J/(kg·K)	Basic
Density	rho	rho(pA,T)	kg/m ³	Basic
Thermal conductivity	k_iso ; k...	k(T)	W/(m·K)	Basic
Speed of sound	c	cs(T)	m/s	Basic
Parameter of nonlinearity	BA	(def.gam...	1	Nonlinear model

Figura 7.5 Interfaz de introducción de datos de las condiciones físicas del material. Fuente: COMOSOL *Multiphysics*. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Se considera los coeficientes de expansión térmica lineal (1/k) a tomar en consideración si el material de las paredes se expande, la masa molar media 0.02897 kg/Mol, consideraciones básicas de la conductividad eléctrica, una densidad básica del contenido del aire 1,097117 kg/m³ (+/- 0,00015) (Medina & Rodríguez, 2018). Una capacidad de calor a presión constante, con valores mínimos para que el momento de enviar el modelo a solucionar no den problemas con el equipo que contiene limitados problemas de resolución. Con capacidad térmica de conductividad W/ (m · K) de carácter básico, y parámetros de no linealidad en valor de un modelo no lineal (Figura 7.5).

7.3.2 Mallado de elementos finitos tipo 2 para las concentraciones y rastreo de contaminantes

Para el caso de análisis de mallado de elementos finitos tipo 2 la interfaz CFD configura a más de las partículas fluidas y el rastreo, en flujo laminar, la trayectoria de las partículas con mayor cantidad del material particulado a tratar para observar el comportamiento de las trayectorias. De manera similar la interfaz es utilizada para que los datos ingresado al CFD puedan interactuar y el correspondiente movimiento de las partículas en el fluido.

El plantear un mallado de elementos finitos más fino del tipo 2 ocasiona que la resolución tenga mayor fiabilidad y los resultados se aproximen más a una realidad. Se mantiene las propiedades del fluido de forma predeterminada en toda la selección de la interfaz. Las condiciones de trabajo del equipo computacional para los resultados y análisis corresponden a un tiempo de 145 h 17 min 44 s, de manera continua que para el caso y con los errores que se han producido llevaron aproximadamente 45 días para que se pueda observar los valores obtenidos. Elemento de mallado de elementos finitos corresponde a una fina que se interpreta con aproximación a 2 cm en la estructura que compone el entorno a tratar. El cambio de malla de elementos finitos (Figura 7.6), normal a una fina, demuestra que mientras más pequeña sea la malla de elementos finitos, el tiempo se extiende considerablemente y podría trabajarse con computadoras con mayores capacidades para el análisis.

Figura 7.6 Mallado de elementos finitos en condiciones finas. Fuente: COMOSOL Multiphysics.
Elaboración Castillo Carchipulla 2020.

La interfaz física soporta flujos incompresibles y flujos comprimibles en números bajos de Mach (típicamente menos de 0,3). También soporta fluidos no newtonianos.

7.4 Resultados de la simulación

La simulación CFD-RANS se realiza en condiciones de análisis del flujo laminar⁵ con un mallado simple con rastreo de partículas, propiedades de las partículas, y una fuerza de arrastre que se reconocen con respuestas de ecuaciones que determinan la solución presentada. La rama de rastreo de partículas contiene interfaces para computar las trayectorias de las partículas, gotitas o burbujas de gas en los fluidos, incluyendo las interacciones unidireccionales y bidireccionales entre fluido y partículas.

7.4.1 Flujo laminar con mallado tipo 1

Propiedad del flujo laminar a través de la ecuación:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F + \rho_g \quad (6.5)$$

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (6.6)$$

$$k = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (6.7)$$

ρ representa la densidad del CO₂ y del aire (kg/m³)

u en la Eq (6.6) representa el vector de velocidad debido a la compresión o expansión del gas, mientras que u en la Eq. (6.7) representa la velocidad del flujo (m/s),

T representa la temperatura

(K) , k representa la conductividad térmica (W/m·K),

p representa la presión (Pa),

I representa el vector unitario,

F representa el vector de fuerza total (N/m³), y ∇ representa el campo vectorial

⁵ La interfaz del flujo laminar se utiliza para calcular la velocidad y los campos de presión para el flujo de un fluido monofásico en el régimen de flujo laminar. Un flujo permanecerá laminar mientras el número de Reynolds esté por debajo de un cierto valor crítico. A números de Reynolds más altos, las perturbaciones tienen tendencia a crecer y causan la transición a la turbulencia. Este número crítico de Reynolds depende del modelo, pero un ejemplo clásico es el flujo de tubería donde se sabe que el número crítico de Reynolds es de aproximadamente 2000.

Se determina sin C_p que representa la capacidad calorífica (J/(kg·K)), para evitar el análisis de reacciones con las temperaturas de las paredes y más elementos que componen el ambiente interior.

Propiedad del rastreo de partículas a través de la ecuación:

$$\frac{d(m_p v)}{dt} = F_T \quad (6.8)$$

La fuerza de arrastre corresponde a la siguiente ecuación:

$$F_D = \frac{1}{\tau_p} m_p M(\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (6.9)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (6.10)$$

$$M = \frac{1}{1 - \frac{9}{16}\alpha + \frac{1}{8}\alpha^3 - \frac{45}{256}\alpha^4 - \frac{1}{16}\alpha^4 - \frac{1}{16}\alpha^5} (l - P(n)) + \frac{1}{1 - \frac{9}{8}\alpha + \frac{1}{2}\alpha^3} P(\mathbf{n}) \quad (6.11)$$

$$\alpha = \frac{r_p}{L} \quad (6.12)$$

En donde L es la distancia más cercana

$P(\mathbf{n})$ es la proyección sobre el vector normal a la pared. Eq. (6.11)

La presión absoluta considerada es de 1 [atm], con una temperatura de 293.15[K] la velocidad de aplicación del viento corresponde a la ecuación. Eq.

Interacción del fluido de la partícula corresponde a la ecuación:

$$\frac{\partial F_v}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_t} f_{rel} F_D \delta(\mathbf{r} - \mathbf{q}_j) \quad (6.13)$$

En el mallado de elementos finitos de la figura 7.7 que pudo ser replicada bajo las condiciones y parámetros manejados bajo el análisis de datos como son la presión del aire, la cantidad de contaminantes que se pueden introducir, la velocidad de aire, la densidad del aire según su ubicación geográfica (Madrid). Son las respuestas que el rastreo de partículas a través de la corriente de aire y el CO₂ que al momento de correr el programa luego de varios intentos de prueba y error se visualiza un recorrido ascendente y posteriormente una concentración en diagonal hacia la cercanía de la ventana de 2 m². En el apéndice 5 y 6 se observa las diferentes vistas de los resultados obtenidos y su particular trayectoria.

Figura 7.7 Resultado final del mallado 01. Fuente: COMOSOL Multiphysics. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

7.4.2 Flujo laminar con mallado tipo 2.

Propiedad del flujo laminar a través de la ecuación Eq (6.5), (6.6) y (6.7).

Propiedad del rastreo de partículas a través de la ecuación:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_t \quad (6.14)$$

$$(6.16)$$

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T - T_p)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = R$$

La fuerza de arrastre corresponde a las siguientes ecuaciones (6.9), (6.10) (6.11) (6.12):

$$u' = u + \Delta u \quad \Delta u = \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (6.16)$$

ζ Es un vector de números gaussianos no correlacionados con variación unitaria

$$N = \int_{t_0}^t \frac{1}{\tau_i} dt' \quad \tau_i = \min(\tau_e, \tau_c) \quad \tau_e = 2\tau_L \tau_L = \frac{C_L K}{\varepsilon} \quad (6.17), (6.18), (6.19)$$

$$\tau_c = -\tau_L \log \left(1 - \frac{l_e}{\tau_L |u-v|} \right) \quad (6.20)$$

ζ Se recompone para valores integradores de n

La presión absoluta considerada es de 1 [atm], con una temperatura de 293.15[K] la velocidad de aplicación del viento corresponde a la ecuación. Eq. (6.3)

Interacción del fluido de la partícula corresponde a la ecuación (6.13)

En una malla tetraédrica de elementos finitos de densidad fina se obtiene los resultados del rastreo de partículas como se observa en la Figura 7.8 y en el apéndice 6, que se visualiza el recorrido del aire con las condiciones planteadas al momento de correr el programa y un alargado tiempo obtener las respuestas que son visibles.

Figura 7.8 Resultado final del mallado 02. Fuente: COMOSOL *Multiphysics*. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

.5 Dispersión y absorción de contaminantes de un AI.

En respuesta a las condiciones realizadas en la simulación y en función de los flujos de aire y el rastreo de partículas se pueden plantear diferentes alternativas para la optimización de la calidad del aire en el volumen de referencia y que nos sirven de evidencia, para ello se puede plantear una dispersión por ventilación, por absorción de materiales de construcción o por la presencia de vegetación.

7.5.1 Dispersión por ventilación

Con esta aproximación de visualización del rastreo de partículas, una recomendación de ubicación de las dispersiones de los contaminantes se puede plantear a través de la planificación arquitectónica con la ubicación de los vanos de manera cruzada en el ambiente interior y con ello el sistema de ventoleras podrían ser colocados en las zonas inferiores para optimizar la dispersión. Para ello se puede trabajar en conjunto con los programas BIM (Eastman, 2016) y los CFD para obtener en cada caso particular las visualizaciones de los contaminantes. Los programas BIM y su entorno con visión en disminuir la contaminación del aire interior pueden genera diversos softwares que den soporte cada vez más eficientes y esta propuesta se pueda inculcar en los profesionales de la planificación de proyectos. En el caso que se puedan colocar sistemas mecánicos de ventilación se pueden colocar las rejillas de ventilación, tanto de ingreso como de salida del aire en función de lo presentado en esta investigación, y que se pueda analizar a través de la simulación para que se pueda reducir los costos finales bajo esta observancia.

7.5.2 Absorción a través de materiales de construcción

Para el caso del formaldehído existen diversas alternativas de absorción de este gas, entre ellos es bajo la consideración de la conductividad térmica ultra alta de la lámina de aluminio Al, y el óxido de magnesio MnO_2 con faceta de cristal, sintetizada in situ depositada en lámina de Al (lámina de Mn/Al). Con procesos de disolución 0,5 g de KMnO_4 y 0,2 g de $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en 80 mL de agua desionizada(Xia et al., 2020). El uso de autoclave con temperaturas hidrotérmicas de 100 ml y soluciones mixtas se puede obtener una lámina de aluminio modificada con MnO_2 después de lavarla con agua desionizada. Esta propuesta y composición del material. Con ello se

diseña un limpiador de formaldehído para interiores con función de calefacción adicional. El dispositivo integrado consta de cuatro partes, a saber, el tablero pintado, la membrana de carbono, el tablero de Al y la lámina de Mn/Al. La membrana electrotérmica de carbono es el principal componente que puede convertir la energía eléctrica en energía térmica debido a su característica de calor eléctrico de Joule. Por un lado, el calor generado se transfiere rápidamente a la superficie del MnO_2 activo a través de la placa de Al, lo que mejora la propiedad cinética del MnO_2 para la oxidación del formaldehído. Por otro lado, el calor generado impulsa el movimiento del gas y forma una circulación térmica. La circulación de aire promovida demuestra la transferencia masiva de formaldehído en el aire interior. Como resultado, el dispositivo propuesto no sólo reduce significativamente el consumo de energía, sino que también permite sustituir parte del equipo tradicional de purificación del aire impulsado por ventilador.

En un análisis de un mortero que puede ser utilizado como micro cemento por los resultados obtenidos, en donde se presenta un modelo experimental de mezclas con restricciones y aplicación del diseño de vértices extremos (Figura 7.9).

Figura 7.9 Vértices extremos y relaciones x_1/x_2 . Fuente: Lema&Castillo 2018 Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Con las condiciones del diseño de vértices extremos se plantea los modelos matemáticos usados para interpretación de las respuestas en diseño de mezclas son los siguientes:

Modelo canónico de primer orden o modelo lineal:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i$$

Modelo canónico de segundo orden o modelo cuadrático:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j$$

Modelo canónico de tercer orden o modelo cubico especial:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^q \sum_{j < k}^q \sum_{k=3}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

Modelo cubico completo:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^q \sum_{j=2}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i < j}^q \sum_{j < k}^q \sum_{k=3}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

Este modelo matemático es reproducible bajos las consideraciones analizadas de los componentes de agua, arena y cemento (Lema & Castillo, 2018), con ello se puede adicionar el dióxido de titanio como catalíticos que ayuda a absorber contaminantes al interior. Esto indica que se puede fabricar placas con este contenido y ser colocadas en lugares estratégicos bajo los resultados iniciales del rastreo de partículas de esta investigación.

7.5.3 Absorción de los contaminantes a través de la vegetación

Los flujos de aire y rastreo de las partículas sirven para el planteamiento de la ubicación de vegetación de manera estratégica que sea optimiza y en ello se pueda plantear diferentes tipos de vegetación como la planteada por el Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano, a través del planteamiento de jardines verticales en un ambiente interior para descontaminación del aire analizando COVs, partículas en suspensión PM₁₀ y PM_{2.5} y otros gases (CO, CO₂, O₃ y NO₂). El rastreo de partículas contaminantes es efectivo al momento de colocar un muro verde pues al ser visualizados los contaminantes, permite optimizar la cantidad de vegetación y la una absorción más eficiente a través de vegetación como la *Dracaena Deremensis*, que utiliza poca luz, no debe estar expuesta a la luz directa

del sol, por lo que la hace ideal para ambientes interiores, es de crecimiento lento y tiene la capacidad de absorber benceno y formaldehído. La Tradescampia que contiene tricomas y retienen PM y COVs. (Figura 7.10)

Figura 7.10 Muro verde. Fuente: Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano 2018. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

Bajo el aval del personal del ITD y por el seguimiento del muro verde en el Centro de Innovación Tecnológica para el Desarrollo Humano ITD, se pudo observar que algunas plantas tuvieron que ser retiradas del panel por su exposición al sol. (Figura 7.11)

Figura 7.11 Muro verde. Fuente: Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano 2018. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.

7.6 Conclusiones

En esta investigación, la dinámica de fluidos computacional simuló bajo la consigna de rastreo de partículas como es el caso del gas trazador CO_2 con las corrientes de microcanal, y se realizó acoplando los modelos de continuidad y Navier-Stokes, de transporte en dos fases, de transferencia de masa y de velocidad de reacción. El software de física COMSOL *Multphysics* se utilizó para simular el rendimiento de los microcanales considerando la distribución de la malla de elementos finitos tetraédrica. La simulación de las trayectorias del CO_2 como gas trazador utilizando a través de la dinámica de fluidos computacionales, a través del transporte en dos fases, transferencia de masa y de velocidad de reacción. En el desarrollo de la simulación permite reconocer diferentes tipos de mallado tetraédricos de elementos finitos, que al momento de solucionar muestran diferencias en tiempo de resolución y de trabajo por acción de varios factores, entre ellos el número de Reynolds, parámetros claves de homogeneidad de los valores de concentración de los contaminantes entre el flujo laminar y la fuerza de arrastre.

Los resultados de la simulación mostraron que con la velocidad del flujo del aire ingresa con presión que golpea las paredes laterales de la puerta y por sotavento golpea los perfiles cercanos. Con ello la velocidad se precipitación en dirección hacia la ventana disminuye la presión, pero arrastra consigo las partículas de contaminantes que se elevan hasta el cielo raso para luego descender en dirección diagonal. En función de ello y por balance de peso entre el CO_2 , HCHO y las partículas $\text{PM}_{2.5}$ se deduce que cada compuesto por su densidad que son más pesados se encontrará por debajo del rastreo de las partículas identificadas del gas trazador.

El mejorar y optimizar las condiciones de un ambiente interior se puede lograr a través de la utilización de materiales absorbentes, absorción a través de vegetación o la planificación arquitectónica al momento de la decisión de colocar la ventilación ya sea mecánica o a través de estrategias pasivas.

7.7 Referencias

Delfino, R. J., Sioutas, C., & Malik, S. (2005). Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 934–946. <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>

Eastman, C. (2016). BIM Handbook BIM Handbook Rafael Sacks.

Lema, W., & Castillo, E. (2018). Relaciones agua/cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9(1), 125–140. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.12>

Makarem, M. A., Farsi, M., & Rahimpour, M. R. (2020). CFD simulation of CO₂ removal from hydrogen rich stream in a microchannel. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.221>

Xia, Y., Wang, J., Gu, C., Ling, Y., & Gao, Z. (2020). MnO₂ / Al foil decorated air cleaner with self-driven property for the abatement of indoor formaldehyde. 382(August 2019).

CAPÍTULO 08. CONCLUSIONES GENERALES

8.1 Conclusiones

Para el desarrollo del presente capítulo se resumen las conclusiones parciales provenientes del estudio de los objetivos y estructuran las limitaciones de esta investigación. La conclusión general se enfoca en el rastreo de partículas de los contaminantes como una entrada a una serie de fenómenos climáticos que se pueden generar y que abre las posibilidades infinitas de análisis. Con estos datos obtenidos se pueden plantear una serie de opciones por las turbulencias que se generan. Al poder visualizar este rastreo de partículas es un acercamiento para las evidencias arquitectónicas y sobre ello actuar, ya sea en la mejora de ventilación a través de acciones pasivas o la colocación de equipos con mejoras en su sistema por la ubicación de la renovación del aire o colocación de rejillas. Otras alternativas pueden ser manejadas como pueden ser la vegetación o materiales absorbentes de los distintos contaminantes analizados.

Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 01

0.1 Visión desde una perspectiva arquitectónica la materialidad de un ambiente interior y su relación con la salud humana.

La problemática en torno a la salud desde la emisión de contaminantes asociados a materiales de construcción en espacios interiores pone sobre la mesa la impostergable necesidad de participación amplia y diversa a la hora de proyectar o intervenir en espacios habitables. En este sentido, si bien el arquitecto ha figurado como el centro de tal actividad, a día de hoy y de cara a las notables demandas sociales y de salud pública, el rol del cuerpo humano como recurso de la construcción social de la contaminación ambiental ha tomado su lugar⁷⁷. Por su parte los materiales de construcción, como artefactos para la definición arquitectónica, ya no son entidades inactivas; su naturaleza cambiante conforme la propia sociedad, articulan tóxicos o venenos pertenece a la elaboración empírica acumulada a lo largo de la historia, que a su vez también se transmite por difusión cultural⁷⁷, y atenten contra la salud ante prácticas inadecuadas.

El análisis bibliográfico que apoya lo previo evidencia el incremento notable de las afecciones respiratorias vinculadas científicamente a la emisión de contaminantes

cuyas fuentes de emisión son los materiales de construcción en diferentes estados de conservación y uso. Obra nueva y preexistencias arquitectónicas se enmarcan en la misma problemática. La una desde las estrategias contemporáneas y su posibilidad de actuación deberán orientar de manera eficiente la toma de medidas en las segundas, condicionadas a su propia naturaleza histórica y la práctica extendida de la restauración convencional.

El punto de partida para el combate de las enfermedades potenciales derivadas de la baja CAI por emisiones desde los materiales recae en la planificación, como un sistema integral. Normativas y profesionales de ambas áreas deben promover que la sociedad sea acogida de manera temporal o permanente en espacios saludables, y por tanto, se apueste desde la arquitectura en la conservación de la salud, y la disminución de riesgos específicos al sistema respiratorio. Para el proceso de modelado de un ambiente interior se acumula una serie de información que parte principalmente de un análisis enfocado a la salud humana y específicamente a las afecciones respiratorias que ocasionan los compuestos químicos que contienen los materiales de construcción, mismos que conforman un ambiente interior. Es claro que las leyes españolas dictan responsabilidades a los agentes inmobiliarios y constructores para que la habitabilidad de una edificación acoja las normativas planteadas desde pasado los mediados del siglo anterior, y al día de hoy se van reforzando. Pero las normativas de calidad del aire interior se direccionan hacia los métodos de ensayos y muestreo de los contaminantes de un ambiente interior. La norma aplicada de manera horizontal es una norma trabajada desde el año 2018 y publicada a finales del año 2019 a nivel europeo, más esta norma es de un gran aporte porque se puede realizar ensayos sobre los materiales de construcción que contienen VOCs y que busca reducir los impactos que estos generan sobre la salud.

La puesta en marcha de esta investigación, que se enfoca a apoyar la identificación de contaminantes, recopila las normas de calidad del aire exterior e interior a la vez, y generar una preocupación que debe ser del sector público y administración pertinente. Pero no sólo en los países que tienen normativas y leyes para la calidad del aire, sino que debe tomarse como una referencia para que se aplique a nivel global, apoyados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Al marcar refuerzos que involucre al gobierno directamente y su compromiso con planes de desarrollo de purificación de un ambiente interior. Es claro que una planificación arquitectónica se enfoca en mejorar la calidad de los materiales de

construcción que se usan para edificaciones de uso público. El ejemplo claro de ellos son las certificaciones EDAC que se enfocan a generar evidencias arquitectónicas para edificios hospitalarios que ahorran costos al estado. Son conceptos básicos de una planificación arquitectónica, como es la orientación del edificio, la ubicación de los vanos, el color de sus paredes entre otros. Con esta orientación y con los propuestos por profesionales daneses, se busca la parte científica de la arquitectura en donde el profesional de este campo sea un soporte sustancial al momento de planificar un proyecto arquitectónico de obra nueva o restauración. Con ello al orquestar al grupo de científicos en la creación de un proyecto, debe cimentarse en herramientas computacionales BIM, que son el canal propuesto en esta investigación. La resolución espacial de las simulaciones nos aproxima a realidades, predicciones detalladas y son aportes para la comunidad científica que se vincula a través de los modelos matemáticos que manejan los CFD.

La resolución espacial de las simulaciones presentadas corresponde a un análisis de contaminantes identificados como peligrosos. La dispersión encontrada bajo las trayectorias de las partículas contaminantes determina ubicaciones en donde se puede proponer una serie de materiales de construcción que absorben ciertos tipos de contaminantes como el CO₂, o se puede optar por la ubicación de vegetación adecuada para un ambiente interior y que absorba algún tipo de contaminante.

Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 02

0.2 Compendio de normativas españolas e internacionales para la mejora de la práctica constructiva de un espacio interior.

En general hablar de normativa de calidad del aire interior y su calidad es problemático. No se puede desarticular de otros componentes como la desigualdad social, la operatividad del sistema de salud público o el diseño arquitectónico y la construcción, lo cual deviene además en una maraña de implicaciones técnicas, legales y éticas. Para las últimas, el escenario es el más desfavorable. Las políticas y normativa de la calidad de aire interior afirman el carácter privado y una responsabilidad individual. Las normas de calidad del aire interior española e internacional se direccionan hacia edificaciones de edificios públicos con lo que no se debería sesgar la importancia de aplicación hacia las viviendas en general y acometerse lo antes posible, más aún cuando la humanidad ha sido confinada por el

virus SARS-CoV-2. Generalmente revisar la normativa de la calidad del aire interior es complejo y con los recopilado se logra contextualizar de manera inicial. Sus definiciones, alcances y los descrito en relación a la aplicabilidad se acentúa. Lo analizado en relación a componentes socioeconómicas, la calidad del aire y su relación directa con la salud humana no pueden desarticularse de los ámbitos sociales y su desigualdad, la puesta en marcha de la operatividad del sistema de salud pública y su vínculo con la población para la aplicación de las normativas de calidad del aire interior son sugerentes. Adicionalmente los materiales de construcción y su normativa son alternativas que se deben considerar bajo la observancia y participación arquitectónica, más cuando el virus SARS-CoV-2 demuestra que los niveles de contagio pueden ser a través de superficies y la respuesta a ello es la fácil limpieza.

Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 03 y 04

0.3 Conocimiento de la materialidad entendida desde la visión química y las afecciones a la salud.

La proyección arquitectónica establece parámetros basados en conceptos y teoría aplicada para el desarrollo y concreción material. El refugio ha mejorado sustancialmente y por implicaciones de sostenibilidad y sustentabilidad se adaptan a los objetivos de desarrollo sostenible, y se orientan a la reducción de contaminación y salud (ODS 3 y 7). Con esta visión actual se debe reconocer que a nivel global los recursos se agotan y que al darnos cuenta de ello se deben plantear alternativas que vayan a la par. El conocimiento de la naturaleza de los materiales de construcción en cuanto a composición y con ello los efectos a la salud (ODS 3) pone en marcha una evidencia arquitectónica que podría ser una alternativa para la mejora de la salud de sus ocupantes y no solo de edificaciones de nivel público, sino que debe ser aplicadas de manera general. Los compuestos físicos y químicos de los contaminantes en desarrollo de esta investigación son parte de las evidencias arquitectónicas al momento de materializar un ambiente interior, su aporte del 40% de contaminantes se puede proyectar a una disminución por diferentes alternativas ya sean de ventilación efectiva, materiales absorbentes de los contaminantes o una vegetación que fuera para ambientes interiores.

CAPÍTULO 09. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9.1 Futuras líneas de investigación

- Proponer una simulación CFD con mayores recursos computacionales para que el mallado contenga la mayor cantidad de celdas y las aproximaciones contengan menor cantidad de errores.
- Analizar pormenorizadamente las emisiones de los contaminantes que se generan al interior de un ambiente para las mejoras de propuestas de ventilación.
- No se han estudiado las nanopartículas de plástico, y más contaminantes interiores que tienen en el interior de un espacio, sobre todo para identificar contaminantes a diferentes niveles de un espacio.
- Analizar el efecto los gases radón que se encuentran a nivel del suelo, que permitan luego analizar a diferentes alturas de una edificación.
- Proponer la inclusión de las normativas de calidad del aire interior con el estudio de los casos en cada país.
- La interfaz CDF RANS de Rastreo de partículas para el flujo de fluidos se utiliza para calcular el movimiento de las partículas en un fluido de fondo, lo cual se puede trabajar para el análisis.
- El movimiento de las partículas puede ser impulsado por el arrastre, la gravedad y las fuerzas eléctricas, magnéticas y acústicas. Se pueden añadir fuerzas definidas con variables diferentes y validación a través de un ensayo.
- También se podría analizar la masa y la temperatura de las partículas, así como las interacciones entre las partículas y el fluido.

PUBLICACIONES

Publicado como

Castillo Carchipulla, E., Aguirre Ullauri, M., & García Navarro, J. (2020). La calidad del aire interior: Una revisión histórica desde la normativa española. *Anales de la Edificación*, 6(2).

En revisión

Castillo Carchipulla, E., Aguirre Ullauri, M., & García Navarro, J. (2020). La calidad del aire interior: Materialidad constructiva: análisis de la relación arquitectura - salud en un ambiente interior. *Informes de Construcción*.

En elaboración

Castillo Carchipulla, E., Aguirre Ullauri, M., & García Navarro, J. (2020). La calidad del aire interior: Trayectorias de contaminantes en un ambiente interior el CO₂ como gas trazador arquitectura - salud en un ambiente interior. *Por definir*.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Variación geográfica en la calidad del aire urbano a nivel global Fuente: https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/pattern Consultado 20/04/05, hora:11:27 am. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	3
Figura 1.2 Variación geográfica en la calidad del aire urbano a nivel global Fuente: https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/pattern Consultado 20/11/28, hora:11:00 am Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	4
Figura 1.3 Flujo y la dispersión dentro de un cañón callejero. Fuente: Hertel & Goodsite 2009. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	5
Figura 1.4 Escalas de la capa límite urbana. Fuente: Modificado de Oke 1997.....	6
Figura 1.5 Variación geográfica en la calidad del aire urbano de ciudades seleccionadas alrededor del mundo. Fuente: https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/pattern Consultado 20/04/05, hora:11:46 am Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	7
Figura 1.6 Variación geográfica en la calidad del aire urbano de ciudades seleccionadas alrededor del mundo. Fuente: https://earth.nullschool.net/#current/particulates/surface/level/overlay=pm1/pattern Consultado 20/04/05, hora:11:46 am. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020....	8
Figura 3.5 Trayectoria del entorno construido a los efectos sobre la salud. Fuente: Wu, Jacobs, Mitchell, Miller & Karol 2007. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	21
Figura 4.1 Síntesis de cuerpos normativos españoles y los vínculos europeos y mundiales. Fuente: Presidencia de Gobierno 16729, Ministerio de Vivienda 18400, Boletín Oficial del Estado (BOE) Legislación Consolidada. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	52
Figura 5.1 Gráfica de contaminantes al interior, afectados por la contaminación del aire exterior y fuentes interiores. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	75

Figura 5.2 Esquema de influencia de agentes de DNA al Formaldehído: Fuente Lennard Jones 2017.....	81
Figura 5.3 Resultado de la cuantificación química para la muestra del material particulado PM2.5 de Pamplona. Fuente: Quijano et al., 2010.....	91
Figura 5.4 Valores excedidos por las acciones volcánicas 2020: Fuente: https://aqicn.org/map/ecuador/es/ . Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	93
Figura 6.6 Simulación de la magnitud de velocidad y las líneas de corriente. Fuente y Elaboración: Makarem, Farsi y Rahimpour 2020.....	113
Figura 6.7 Reportes generales de simulación. Fuente y Elaboración: Balocco, Petrone y Cammarata 2015.....	115
Figura 6.8 Ejemplos de estructuras de flujo de aire en las cavidades nasales a una velocidad constante de entrada de 7,5 lts por minuto. a) líneas de corriente y contornos de velocidad en 3D, y b-g) velocidad de flujos en seis cortes seleccionados. Fuente y Elaboración: Kleinstreuer y Zhang 2010.....	116
Figura 6.4 Ejemplos de estructuras de flujo de aire en las cavidades nasales a una velocidad constante de entrada de 7,5 lts por minuto. a) líneas de corriente y contornos de velocidad en 3D, y b-g) velocidad de flujos en seis cortes seleccionados. Fuente y Elaboración: Kleinstreuer y Zhang 2010.....	117
Figura 6.5 Velocidad en varias secciones transversales en la máxima inspiración; a) con flujo constante, b) flujo oscilante y c) flujo oscilante en una malla móvil. Fuente y Elaboración: Mead-Hunter, King, Larcombe y Mullins 2012.	118
Figura 7.1 Características geométricas del espacio modelo de simulación. Fuente: UNE EN 16516. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	124
Figura 7.2 Características bidimensionales del espacio modelo de simulación. Fuente: UNE EN 16516. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	124
Figura 7.3 Datos de la interfaz. Fuente: COMOSOL Multiphysics. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	127
Figura 7.4 Mallado de elementos finitos en condición normal. Fuente: COMOSOL <i>Multiphysics</i> . Elaboración Castillo Carchipulla 2020.	127

Figura 7.5 Interfaz de introducción de datos de las condiciones físicas del material. Fuente: COMOSOL <i>Multiphysics</i> . Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	128
Figura 7.6 Mallado de elementos finitos en condiciones finas. Fuente: COMOSOL <i>Multiphysics</i> . Elaboración Castillo Carchipulla 2020.....	129
Figura 7.7 Resultado final del mallado 01. Fuente: COMOSOL <i>Multiphysics</i> . Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	132
Figura 7.8 Resultado final del mallado 02. Fuente: COMOSOL <i>Multiphysics</i> . Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	133
Figura 7.9 Vértices extremos y relaciones x_1/x_2 . Fuente: Lema&Castillo 2018 Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	137
Figura 7.10 Figura 7.10 Muro verde. Fuente: Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano 2018. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	139
Figura 7.11 Muro verde. Fuente: Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano 2018. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	140

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1 Contaminantes exteriores e interiores y monitorización. Tham 2016; Landrigan, Fuller, Acosta, Adeyi, Arnold, Basu, Baldé, Bertno-llini, Bose-O'Relly (...) 2018. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	224
Tabla 3.2 Valores de normativas para las tasas de ventilación en Europa (Fuente: BPIE)	26
Tabla 4.1 Reporte sintético de normativa española sobre calidad del aire interior. Fuente: Portal AENOR de la Asociación Española de Normalización 2020. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	55
Tabla 5.1 Propiedades físicas y químicas del formaldehído. Fuente: . Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	79
Tabla 5.2 Propiedades de los contaminantes simulados en COTAM. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	11280
Tabla 5.3 Resumen de las concentraciones de contaminantes calculadas. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	11384
Tabla 5.4 Análisis de CO ₂ /Kg, de algunos materiales de construcción que evidencia el gran aporte de contaminación global. Fuente: González 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	87
Tabla 5.5: Características de concentración del contaminante PM _{2.5} . Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	90
Tabla 5.6 Las mayores concentraciones de metales presentes en el aire de Pamplona corresponden a K, Zn, Fe, Pb, Cr, Mn, Ni. Fuente: Quijano et al., 2010. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	90
Tabla 5.7 Los elementos de mayor concentración en el aire de Pamplona son: Si, Ca, Ba, K, de acuerdo con la T 5.6. Fuente: Quijano et al., 2010. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.	91
Tabla 6.1 Propiedades de los contaminantes simulados en COTAM. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020.....	109

Tabla 3.2 Resumen de las concentraciones de contaminantes calculadas. Fuente: Ng LC, Persily, Emmrich y Musser 2012. Elaboración: Castillo Carchipulla 2020..... 110

APÉNDICE 1

Límites de peligro para la salud del formaldehído

Frasas de Riesgo (13)	
Solución de Formaldehído, Concentración entre 1 % y 5 %	
R40:	Posibles efectos cancerígenos
R43:	Posibilidad de sensibilización al contacto con la piel
Solución de Formaldehído, Concentración entre 5 % y 25%	
R20/21/22:	Nocivo por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel
R36/37/38:	Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias
R40:	Posibles efectos cancerígenos
R43:	Posibilidad de sensibilización al contacto con la piel
R20/21/22:	R20/21/22: Nocivo por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel
Solución de Formaldehído, Concentración >25 %	
R23/24/25:	Tóxico por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel
R34:	Provoca quemaduras
R40:	Posibles efectos cancerígenos
R43:	Posibilidad de sensibilización al contacto con la piel
Solución de Formaldehído, Concentración >25 %	
R23/24/25:	Tóxico por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel
R34:	Provoca quemaduras
R40:	Posibles efectos cancerígenos
R43:	Posibilidad de sensibilización al contacto con la piel

APÉNDICE 2

Clasificación de los contaminantes aéreos

Origen	Primarios	Contaminantes emitidos directamente a la atmósfera: SO ₂ , algunas especies de NO _x , CO y PM _x
	Secundarios	Contaminantes que se forman en el aire como resultado de reacciones químicas entre otros contaminantes: ozono, NO _x y algunas partículas
Fuente	Intradomiciliarias	Cocinar, material de las casas, humo del cigarrillo, productos de consumo, productos de aseo
	Extradomiciliarias	Industrias, automóviles, naturaleza
Tipo	Gases	SO ₂ , NO _x , ozono, CO, CO ₂ , VOC
	Partículas	Partículas gruesas (PM ₁₀), finas (PM _{2,5}) y ultrafinas (PM _{0,1})

APÉNDICE 3

Valores límite de los contaminantes en función de la media horaria, media diaria (umbrales de alerta)

Contaminante	Valor límite (VL)/objeto (VO)/Umbral de Alerta	Concentraciones	No Superaciones máximas	Año de aplicación
SO ₂	Media horaria (VL)	350 µg/m ³	>24 horas /año	2005
	Media diaria (VL)	124 µg/m ³	>3 horas /año	
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 Km o zona o aglomeración entera)	500 µg/m ³		
NO ₂	Media horaria (VL)	200 µg/m ³	>18 horas /año	2010
	Media diaria (VL)	40 µg/m ³		
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 Km o zona o aglomeración entera)	400 µg/m ³		
PM ₁₀	Media horaria (VL)	50 µg/m ³	>35 días /año	2005
	Media diaria (VL)	40 µg/m ³		
PM _{2.5}	Media diaria (VL)	25 µg/m ³		2015
Pb	Media diaria (VL)	0,5 µg/m ³		2005
CO	Máximo diario de las medias móviles octohorarias (VL)	10 µg/m ³		2005
C ₆ H ₆	Media diaria (VL)	5 µg/m ³		2010
O ₃	Máximo diario de las medidas móviles octohorarias (VO)	120 µg/m ³	>25 días /año (en un promedio de 3 años)	2010
	Umbral de información (promedio horario)	180 µg/m ³		
	Umbral de alerta (promedio horario)	240 µg/m ³		
As	Media anual (VO)	6 ng/m ³		2013
Cd	Media anual (VO)	5 ng/m ³		2013
Ni	Media anual (VO)	20 ng/m ³		2013
B(a)p	Media anual (VO)	1 ng/m ³		2013

APÉNDICE 4

Diámetros de las partículas y número de Reynolds

C. E. Lapple, Stanford Research
 Institute Journal, Vol. 5, p. 95
 (Third Quarter, 1961)

APÉNDICE 5

Vistas del mallado de elementos finitos “normal”

APÉNDICE 6

Vistas del mallado de elementos finitos “fina”

Planta

Elevación

APÉNDICE 7

Vistas del mallado de elementos finitos “fina”

Elevación

Elevación

APÉNDICE 8

Simulación de elementos finitos en 2D, flujo de aire

Flujo del aire en velocidad bajo la norma

Flujo del aire en velocidad incrementada por sobre la norma