



**CFD Modelling for the prediction of NO_x dispersion in the vicinities of a street with
active public urban intervention in Medellin, Colombia**

Juan Felipe Rodríguez Berrío

Tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor en Ingeniería Ambiental

Director

Carlos Riveros Jeréz, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Doctorado Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Rodríguez, 2023)
Referencia	Rodríguez, J. (2023) CFD Modelling for the prediction of NOx dispersion in the vicinities of a street with active public urban intervention in Medellin, Colombia [Tesis doctoral]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Doctorado en Ingeniería Ambiental, Cohorte VIII.

Grupo de Investigación MODESIS.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Hipótesis	10
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo general	10
2.2 Objetivos específicos	11
3. ESTADO DEL ARTE	11
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1 Componentes del modelo CFD	30
4.2 Etapas en un análisis de CFD	30
4.3 Variables de interés en modelado CDF para evaluación de calidad del aire	31
4.4 Modelo ANSYS FLUENT	32
4.5 Modelos de turbulencia	33
4.6 Ecuaciones de Reynold-Averaged Navier-Stokes (RANS)	37
5. PROPUESTA DE ANÁLISIS DE CONTAMINACIÓN POR EMISIONES VEHICULARES EN ZONAS URBANAS (CASO DE ESTUDIO)	40
5.1 Configuración de la simulación	44
5.1.1 Dominio computacional	44
5.1.2 Resolución de las mallas	47
5.1.3 Mallado	49
5.2 Variables meteorológicas involucradas en la modelación	50
5.2.1 Química de las especies NO, NO ₂ , NO _x	51
5.2.2 Importancia de la química y los datos de campo para los modelos de dispersión	51
5.2.3 Modelos de dispersión - Tratamiento de la conversión de NO a NO ₂	52
5.3 Datos iniciales de simulación	53
5.3.1 Resolución de mallas	53
5.3.2 Variación de la altura del edificio	61
6. RESULTADOS	62

7. CONCLUSIONES	68
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1, Concentración de contaminantes por reacciones químicas	19
Figura 2, Morfología del sitio de estudio	23
Figura 3, Modelo Gaussiano	28
Figura 4, Modelo Eurliano	28
Figura 5, Modelo Configuración de la Malla para la Modelación	29
Figura 6, Fluctuaciones Proceso Estacionario	33
Figura7, Fluctuaciones Proceso No Estacionario.....	34
Figura 8, Mapa zona de estudio	42
Figura 9, Selección sitio de estudio	43
Figura 10, Malla Fina para la Modelación	45
Figura 11, Dominio Computacional y Condiciones de Frontera	46
Figura 12, Mallado del dominio computacional utilizando el método cartesiano	47
Figura 13, Cara Frontal del Sitio de Estudio para la Simulación	48
Figura 14, Partículas por billón NO vs Tiempo.....	56
Figura 15, Validación del Modelo CFD	56
Figura16, Contorno NOx	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Contaminantes constantes	19
Tabla 2, Niveles máximos permisible de contaminantes criterio en el aire	26
Tabla 3, Niveles máximos de contaminantes en el aire para el año 2030	27
Tabla 4, Definición de información de entrada al modelo y configuración	50
Tabla 5, Condiciones de parámetros	54

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación atmosférica están íntimamente relacionados con los escenarios meteorológicos presentes en los diferentes lugares. De allí que la meteorología pueda regir múltiples procesos que controlan o que influyen considerablemente en el comportamiento de las emisiones y la concentración de las especies contaminantes en la atmósfera. Estos procesos incluyen el transporte vertical, la advección, la dispersión turbulenta, la convección y la deposición húmeda y seca. Por lo que sería de vital importancia analizar las condiciones de vientos, mezcla, y demás parámetros termodinámicos del dominio de estudio, para las diversas situaciones meteorológicas.

Con base en lo anterior, y gracias al desarrollo económico y tecnológico de las ciudades, autores como Castelli *et al.*, (2020), indican que cada vez surgen más problemas de contaminación ambiental, en las matrices agua, ruido y aire; en este último el impacto sobre la salud humana es directo. Esta última aseveración se da debido a la exposición de contaminantes y partículas, y de allí, el mayor interés en el estudio de la contaminación y sus impactos. Castelli *et al.*, (2020) indican, además, que la contaminación se debe a todas las actividades asociadas con la quema de combustibles fósiles, la agricultura y los gases de actividad industrial, la calefacción residencial y los desastres naturales.

Las condiciones actuales permiten evaluar y entender los múltiples y diversos problemas que afrontan las ciudades. En este aspecto, países y ciudades del mundo como India, Pakistán, Turquía, China, entre otros, son referentes en publicaciones tales como “25 Most Polluted Cities in the World (2023 Rankings)” (Vanzo, T., 2023). En esta temática Colombia no puede verse ajena, ni mucho menos exenta.

En relación con los múltiples estudios e investigaciones sobre la contaminación ambiental, muchos de ellos incluyen la participación de investigadores que dan crédito e interés principal a herramientas como la

modelación matemática y el uso de información satelital. Estas herramientas se convierten, así, en actores fundamentales y vitales para la planeación, estudio y conocimiento de las situaciones de contaminación del aire (Krzyzanowski *et al.*, 2014). Las condiciones relacionadas con la calidad del recurso aire es un tema al que la Agencia Ambiental Europea cataloga como una problemática que puede trascender de lo local a lo regional, e incluso ser transfronteriza, y, por ello, se hacen necesarios acuerdos de orden mundial (Junk, 2015).

Según Lozano-Gracia & Soppelsa (2019), las ciudades pueden ser muy contaminantes, independiente de su tamaño poblacional. Destacan que las grandes ciudades y sus altos índices de población plantean mayor presión sobre los entornos locales y sus recursos, y referencian, de paso, que cuando no se cuenta con buenas administraciones se puede llegar a condiciones de contaminación y afectación en la habitabilidad y la productividad de las ciudades. En esta condición el Banco Mundial, en uno de sus trabajos llevado a cabo en 2015 (Austin Francis Louis *et al.*, 2015), reconoció y clasificó las ciudades a partir de su competitividad, definiendo a las ciudades competitivas como aquellas que fomentan la generación de empleos de manera desproporcionada e incrementan los ingresos y la productividad. Esta misma entidad elaboró en 2016 otro estudio sobre las ciudades. En él destaca cómo ha sido la urbanización en las dos últimas décadas, llamando la atención en la importancia de urbanizar y planificar articuladamente, evitando que las ciudades se vuelvan escenarios potenciales para otros problemas como la contaminación atmosférica, la congestión vial, e incluso los conflictos civiles (Martínez Gaete, 2016).

Se ha indicado que la problemática de la contaminación del aire no es exclusiva de las regiones urbanizadas, pues muchas ciudades, y especialmente municipios aledaños a estas urbes, al igual que numerosas zonas rurales, logran detectar un incremento en el deterioro de la calidad del aire asociado con fenómenos como el transporte, o la dispersión y transformación que sufren los agentes contaminantes en la atmósfera. En consecuencia, las disminuciones de la

calidad urbana están relacionadas principalmente con el aumento de las emisiones del tráfico, asociado con el transporte, principal componente de la contaminación del aire (Núñez-Alonso *et al.*, 2019). Igualmente, bajo esta premisa, autores como Ruiz-Tapia *et al.*, (2020), orientaron un gran trabajo de investigación en el que involucraron 11 áreas metropolitanas de Sur América, con mediciones de contaminación ambiental entre 2010 y 2017, incluyendo tres megaciudades de poblaciones cercanas a los 12 millones de personas; cuatro con más de siete millones, dentro de las que se incluyó a Bogotá; y cuatro de tamaño medio (mayores a dos millones de habitantes), incluyendo al Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En el estudio, evaluaron concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de sulfuro (SO₂), material particulado de 2.5 y 10 micras de diámetro respectivamente (PM_{2.5} y PM₁₀), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃). Contaminantes muy relacionados con la dinámica del parque automotor y los aportes industriales propios de ciudades de mediano y gran tamaño.

Por lo tanto, dentro de los desafíos ambientales que surgen por la alta densidad de población y su relación con la calidad del aire, se plantean serios retos debido a las dificultades para regular las emisiones producidas y el hecho de que estas trasciendan, como se indicó, los límites geográficos de las ciudades. Parte de los desafíos incluyen lo indicado por Soppelsa *et al.*, (2019), que argumentan que en muchas ciudades en crecimiento, principalmente en países en desarrollo, no se presta la atención requerida al tema del manejo de la contaminación del aire, y, por ello, se dificulta la asignación de costos (y beneficios), relacionados con la calidad del mismo. Refieren también que se ignoran los impactos que este proceso puede generar en condiciones como la salud y la calidad de vida de los ciudadanos, así como sobre la productividad de las empresas y los trabajadores, y en última instancia de la competitividad de la ciudad.

Brønnum-Hansen *et al.*, (2018) indicaron que muchas de las zonas urbanas de países con altos ingresos relacionan como el mayor aportante a los problemas de contaminación del aire es el tráfico vehicular, siendo más crítico el de transporte

pesado, y especialmente a los vehículos que operan con diésel como combustible, pues es en los exostos donde se generan grandes cantidades de partículas finas y óxidos de nitrógeno (NOx), entre otros.

De otro lado, Gómez Peláez *et al.*, (2020) y Lauriks *et al.*, (2021), señalan a la contaminación del aire como una grave amenaza para la salud pública, donde la exposición prolongada al aire contaminado es responsable de aproximadamente 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo y, de acuerdo con sus estudios de proyección, se estima que se convierta en la principal causa de muerte para 2050. De manera similar, (Enhanced Reader, n.d.) argumentan que las dificultades de calidad del aire, y su responsabilidad en las muertes prematuras sobre la población, son una de las más agudas problemáticas que viven las ciudades donde habita una mayor cantidad de población y, por ello, será necesaria la toma de acciones para reducir la congestión vehicular o la contaminación del aire, por lo que Navarro-Arredondo (2019) crea el concepto de “zonas de baja emisión”. Este concepto va muy de la mano con lo anteriormente expuesto, donde se tienen vehículos pesados con altos niveles de emisión de contaminantes transitando por zonas densamente pobladas, y aunque el concepto de zonas de baja emisión no se limita solo restringir el tránsito a vehículos pesados sino a generar a cualquier tipo de vehículo, el enfoque es prometedor porque no solamente se da solución al problema de la contaminación atmosférica sino que se tiene como consecuencia una reducción en los niveles de ruido, otro problema que aqueja zonas urbanas densamente pobladas.

En cuanto a las condiciones de infraestructura, trabajos como el de Gómez Peláez *et al.*, (2020) indican que, a mayor altura en la atmósfera, el aire puede contener otros compuestos adicionales como ozono, helio e hidrógeno, y enfatizan en la necesidad de conocer y entender los fenómenos y sus impactos. Hacen referencia a la presencia de contaminantes y lo que ocurre en puntos críticos como los pequeños espacios que se abren al pasar a través de las vías y sus cruces, donde están ubicadas las edificaciones. Allí se observa que los flujos se bloquean

seriamente, influyendo en la dispersión de los contaminantes a través de las calles y avenidas. Por lo tanto, se hace imperativo entender que existe una dispersión de los contaminantes atmosféricos en estos espacios y, a partir de allí, enfocar esfuerzos hacia la prevención de problemas futuros, la mejora en la planificación y el diseño de los espacios urbanos. Es decir, no solo se requieren enfoques de control de emisiones vehiculares, sino que las condiciones de desarrollo urbano juegan un papel muy importante, en este sentido, el enfoque debe ser direccionado también a una adecuada planeación urbana, donde se evite generar obstrucción de las corrientes de viento con edificaciones y de esta forma garantizar que el enfoque de zonas de baja emisión no funcione, porque si bien se limita el acceso vehicular a estas zonas, si las condiciones urbanas no son las adecuadas finalmente las emisiones de material particulado generadas en otras zonas y siguiendo las corrientes de viento se acumularan en zonas de bajas velocidades de viento dentro de las zonas de baja emisión.

Actualmente se han implementado equipos de medición en centros urbanos y en algunos casos se tienen equipos móviles de medición que permiten identificar los niveles de contaminación del aire. Si bien este enfoque, parte de la premisa que las mediciones son el resultado de una mezcla de factores, es muy complejo determinar las causas o factores más relevantes que llevan a que una lectura en un lugar determinado presente valores peligrosos para la salud de los habitantes de esta zona. Por tal motivo, las mediciones realizadas ya sean con equipos fijos o móviles no permiten plantear soluciones que permitan reducir el nivel de contaminación del aire, pero sí permiten clasificar las concentraciones del diferente material particulado y el análisis de tendencias en el tiempo de estas concentraciones. En este sentido, en años recientes se ha buscado complementar estas mediciones con modelos numéricos que permitan identificar causas y posibles soluciones. Para Naula Reina *et al.*, (2016) cerca de una década atrás los modelos más empleados en el estudio de la calidad del aire se han basado en las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía donde variables como la velocidad del viento, la temperatura, la presión y las reacciones químicas de los contaminantes

han sido consideradas debido a su influencia sobre la masa de aire. Es por esto que, desde el punto de vista de la modelación matemática, y específicamente en calidad del aire, algunos autores recomiendan que quien modele tenga en cuenta que al evaluar el comportamiento de los flujos que se presentan al alrededor de las ciudades (principalmente las urbanizadas), incluyan tanto fenómenos de transporte convección-difusión, como aspectos asociados a la distribución, forma y altura de los edificios que conforman el área de estudio (Fu *et al.*, 2012)

De lo anterior, y dado que la emisión vehicular es la principal fuente de generación de especies como el NO₂ en las áreas urbanas, encontrar lugares donde la contaminación de este gas se estanca depende en gran medida de la intensidad del tráfico, las configuraciones de las carreteras y la altura de los edificios. Además, es importante resaltar que, si bien existen otros contaminantes, el NO₂ permite analizar de forma más adecuada el efecto del tráfico vehicular en zonas urbanas. La velocidad del viento está fuertemente correlacionada con procesos de mayor dilución. Es por ello que trabajos como el de Lauriks *et al.*, (2021) permitieron, en el presente estudio, entender la importancia de considerar modificaciones sobre la geometría urbana en el flujo del viento de áreas de ciudad, lo que luego ayuda a conocer, analizar y entender los efectos de la contaminación en una calle sensible en Medellín, sometida a intervenciones públicas, con recientes inclusiones de construcción (nuevos espacios públicos y edificios), sin analizar el efecto de la concentración del NO₂ en la planificación de tales intervenciones.

Esta investigación se planteó con el propósito de analizar la situación actual de un trayecto en la calle Carabobo en Medellín (Colombia), y sus alrededores, con el fin de aportar información a ser tenida en cuenta a la hora de realizar nuevas intervenciones públicas urbanas, en especial en las áreas de influencia de la calle Carabobo. Igualmente, se contempló en el estudio la dispersión del dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido de nitrógeno (NO) presentes en el aire atmosférico para la zona de Medellín, empleando dinámica de fluidos computacionales (del inglés *Computational Fluid Dynamics - CFD*), con lo cual se logran predecir las

concentraciones de contaminantes y perfiles de velocidad en puntos específicos dentro del área de estudio. Las simulaciones se realizaron utilizando el software ANSYS Fluent®, y las condiciones de contorno, velocidad del viento y las concentraciones volumétricas de los contaminantes en el aire atmosférico se obtuvieron de dos estaciones de monitoreo pertenecientes al SIATA (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá), con red de seguimiento una al norte y otra al sur del área de estudio, con el objetivo de validar los resultados obtenidos con la simulación CFD.

Finalmente, el trabajo cuenta con ocho capítulos específicos, así: el Capítulo 1 relacionado con la Introducción. El Capítulo 2 describe los objetivos, general y específicos. En el Capítulo 3 se hace una presentación que se ha denominado Estado del Arte; en este capítulo se presentan algunas consideraciones teóricas de interés en el tema de estudio, dentro de las que se destacan: definiciones especiales asociadas con la temática objeto de estudio, la atmósfera y su estructura, la modelación matemática, así como de uso de modelos atmosférico. Luego aparece el Capítulo 4, en el que se muestran algunos aportes previos sobre el tema de la modelación y calidad del aire, enfocado muy especialmente en modelación y evaluación de la calidad del aire con algunos aportes de modelación, dentro de los que se describen algunos trabajos que aplican el modelo “Ansys Fluent”. Posteriormente, el Capítulo 5 está destinado a la exposición de los componentes metodológicos empleados en el trabajo. En el Capítulo 6 se presentan los resultados y su análisis. Finalmente, en el Capítulo 7, se encuentran las conclusiones o resultados más relevantes del estudio. Estos capítulos 6 y 7 en el primero, se dejan expresas algunas tareas futuras; y en el segundo todo el soporte bibliográfico que compone el presente proyecto de investigación.

1.1 HIPÓTESIS

La utilización de la modelación matemática en CFD, que permite observar el comportamiento, en función del transporte y concentración de los contaminantes, NO_x, NO y NO₂ que están en la zona de estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- ✓ Plantear una metodología matemática que permita estudiar zonas urbanas de alta complejidad en términos de contaminación del aire en zonas que se proyecten como de baja emisión dentro de los planes urbanísticos futuros mediante el análisis de transporte por difusión convección del contaminante más asociado a la contaminación del aire por tráfico vehicular.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Analizar los procesos de advección, dispersión y distribución de los contaminantes NO, NO₂ y NO_x en el aire para la zona de estudio, empleando modelos CFD.
- ✓ Establecer el comportamiento de los flujos de vientos en la zona de estudio como factor determinante en la advección y dispersión de contaminantes NO, NO₂ y NO_x.
- ✓ Determinar a través del comportamiento de los contaminantes y los flujos de vientos, las variaciones en las condiciones de contorno aplicando CFD.
- ✓ Evaluar el comportamiento de las reacciones químicas de NO, NO_x y NO₂ a partir de la mecánica de fluidos en una zona aledaña a la sede de investigaciones de la Universidad de Antioquia en Medellín.

- ✓ Determinar la relación que pueda existir entre NO₂ y NO_x para la alta tasa de concentraciones en la zona de estudio.
- ✓ Estudio de procesos atmosféricos y químicos, identificar las características de las fuentes de emisión, el transporte atmosférico y reacciones químicas.
- ✓ Observar los impactos de los procesos de reacción química y atmosférica en intervalos de tiempo.

3. ESTADO DEL ARTE

El primer aspecto que impacta el nivel de contaminación del aire en zonas urbanas está muy relacionado con factores de crecimiento urbanístico que, dependiendo de factores de movilidad, puede llevar a un incremento del número de vehículos y adicionalmente a un crecimiento que, en algunos casos, se da en vertical con concentración de edificaciones de altura considerable, convirtiendo configuraciones urbanas en zonas de baja velocidad donde se aumenta el nivel de contaminación del aire. Por tal motivo, es evidente que existe una clara relación entre el crecimiento de las poblaciones y los múltiples impactos que son estudiados permanentemente por diferentes investigadores y disciplinas. Estos impactos son un resultado al desarrollo acelerado de las poblaciones y la baja o nula planeación, mediada por un afán por prosperar sin medir la afectación a los recursos (agua, aire, suelo, entre otros). De acá que investigadores como Bibri & Krogstie (2017) indiquen que en las áreas urbanas surge una preocupación asociada con las fuentes de contaminación del aire, donde altas densidades poblacionales inducen a fuentes de contaminación diversas y a un impacto en su calidad. Normalmente el aire se ve impactado por un mayor tráfico vehicular, así como por condiciones atmosféricas locales. Para estos autores existe una condición más crítica en poblaciones con vías estrechas y edificaciones altas, pues estos factores obligan a una mayor resistencia a la ventilación, e invitan a realizar estudios en los que, entre otros, se evalúen las geometrías de los edificios, versus las condiciones de altura y ancho de vías, como alternativas de planeación y mejor calidad del aire, y como medida de mitigación en poblaciones futuras.

En relación con el crecimiento poblacional, vale la pena mencionar el trabajo realizado por (Masson-Delmotte *et al.*, 2021), quienes indican que el crecimiento de las poblaciones ha inducido al aumento en la urbanización y, con ello, la construcción de edificios de gran altura. Estas nuevas obras hacen que las concentraciones de los diferentes contaminantes, al ser emitidos en las proximidades de las ciudades, presenten mayor influencia e impactos en relación con la geometría (forma) de las construcciones. Los investigadores indican que, dentro de los factores más relevantes, están: la orientación, el espaciamiento y las condiciones meteorológicas del sitio; lo que induce a cambios fuertes en la dispersión de los contaminantes emitidos, y que termina en problemáticas importantes de transporte y dispersión de dichos compuestos en los alrededores de las zonas construidas a gran altura.

Un artículo de revisión elaborado por Fernandes *et al.*, (2020) encontró que a partir de simulaciones numéricas y de aplicar simulaciones en túneles de viento, es posible evaluar las relaciones del aspecto del cañones urbanos, la presencia de árboles, los esquemas de calefacción en la superficie de los edificios, la altura y la forma de la infraestructura, definiendo que este tipo de aspectos, más el impacto generado por el tráfico vehicular, son condiciones que influyen en la producción de turbulencia en la parte baja y de convección a gran escala entre el cañón en su parte inferior y en el área alta. Concluyen los investigadores en la necesidad de evaluar las anteriores condiciones en relación con la dispersión y los flujos del aire en cañones urbanos, donde, adicionalmente, los vehículos hacen la descarga de contaminantes en la zona más baja de las vías o del cañón, y en el que una pobre dispersión de los contaminantes obliga a que sean las poblaciones humanas las que vean comprometida su salud al estar obligadas a respirar un aire cada vez más contaminado.

Con base en lo anterior, aspectos como la variación en la altura de los edificios a lo largo de la vía, la forma de las edificaciones y, dentro de estas, los

diferentes tipos de techo, puertas, ventanas y balcones; cambios de velocidad y dirección de los vientos; radiación solar; tráfico vehicular, etc., deberían ser incluidos en los estudios, pues ellos tienen todo que ver con la ventilación del aire y con la dispersión de los contaminantes (Fernandes *et al.*, 2020).

Otra investigación realizada por Duan *et al.*, (2021) hace énfasis en el concepto de cañón urbano, introducido en 1975 por Nicholson, (define como la presencia de dos edificios dispuestos continuamente a ambos lados de una calle), en el que las emisiones de los vehículos en el cañón requieren de un conocimiento claro del mecanismo de dispersión de los contaminantes dentro de la capa límite urbana. Para los investigadores, el proceso de transporte de contaminantes en los cañones de las calles es en esencia un proceso de transferencia de masa por convección que debería optimizarse para ayudar a una mejor dispersión; donde dicha transferencia de masa es considerada como un proceso de difusión causado por gradientes de concentración análogos a la transferencia de calor. En este trabajo los investigadores realizaron una simulación CFD enfocada en investigar los efectos de la velocidad del viento, la configuración del viaducto y las formas del techo de los cañones de las calles sobre la dispersión de los contaminantes, para lo cual aplicaron bidimensionalmente un modelo físico y un modelo matemático con simulaciones LES (Large Eddy Simulation) y el modelo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations). Con esto encontraron que la teoría de la sinergia de campo, el número de Sherwood y el número de sinergia de campo pueden emplearse para evaluar cuantitativamente los tres factores sobre la difusión de contaminantes en los cañones de las calles o urbanos. Demostraron que el número de Sherwood disminuye con el aumento de la altura de la construcción del viaducto y la disminución de la velocidad del viento, lo que es compatible con el crecimiento observado de la fracción contaminante en el cañón de la calle. De otro lado, al considerar la fuente de contaminación en el viaducto, observaron una influencia menos sustancial de la altura de la construcción en la difusión de los contaminantes. Por último, entre los cuatro tipos de techo evaluados, los inclinados hacia arriba aportan la mayor contaminación, con un grado de concentración de contaminación

de 1.6 a 2.3 veces mayor que el de los techos planos, seguidos por los techos a dos aguas, cuyo grado de concentración de contaminación oscila entre 1.2 a 2 veces más elevada que el de un tejado plano.

Otro estudio publicado por Chen *et al.*, (2018), se enfocó en la evaluación de diferentes parámetros físicos y computacionales en la dispersión de contaminantes al aplicar modelación tipo CFD. Los investigadores tuvieron en cuenta en sus modelaciones condiciones como el edificio, los modelos de turbulencia, la resolución de las cuadrículas, diferentes tamaños de paso de tiempo, la duración del periodo de monitoreo, la tasa de liberación del gas trazador (CO₂), entre otros. Dentro de los modelos empleados estuvieron el modelo Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulation (DES) y Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) RNGk- ϵ los. El trabajo permitió evaluar diferentes escenarios en relación con la velocidad de viento, las concentraciones de contaminantes y diversas relaciones de alto de edificios en relación con el ancho de las vías, definidas como AR; así como diferentes tamaños de paso, mallas gruesas, medias y finas, entre muchos otros. Lo que se espera sirva para apoyar en el mejoramiento de la calidad de las simulaciones CFD en la dispersión de compuestos según las formas de los edificios.

También es importante destacar el trabajo de CFD realizado por Reiminger *et al.*, (2020), para quienes la contaminación atmosférica es un problema crítico en zonas urbanas densificadas, donde la ventilación en las calles es insuficiente. Los autores indican que la problemática es más fuerte en las calles que son rodeadas por edificaciones de gran altura, en las que aparecen los cañones callejeros. En estos, las propiedades geométricas de los edificios (ancho, alto, etc.), son necesarias para asegurar la buena ventilación y comportamiento de las concentraciones de los contaminantes presentes, lo que está en sintonía con lo expuesto por Bibri & Krogstie (2017). Dentro del trabajo de Reiminger *et al.*, (2020) los investigadores evaluaron dos relaciones geométricas en las vías asociadas con la dispersión de contaminantes, así: la relación entre la altura del edificio a sotavento

(H1) y barlovento (H2), (H1/H2), y la relación entre el ancho (W) de la calle y la altura (H2) del edificio a barlovento (W/H2). Adicionalmente, evaluaron diferentes regímenes para ver el comportamiento sotavento y barlovento de las concentraciones de contaminante en relación con las geometrías, alturas y ancho de las vías, principalmente para cañones estrechos.

Con base en lo anterior, encontraron que: para una distancia dada W/H2, las medidas de las concentraciones se mantuvieron iguales independiente de la altura de los edificios de sotavento, lo que indica solo el impacto de las concentraciones medias en la calle. Adicionalmente, las concentraciones aumentaron cuando la distancia entre edificios disminuyó sin reportar iguales cambios y, de hecho, el factor de variación llegó a ser de 2. Al aplicar, las concentraciones medias en la calle dependieron tanto de las relaciones H1/H2 como W/H2. Por tanto, una distancia mayor entre edificios implicó una disminución de concentraciones, y un aumento en estas cuando se aumentan las alturas de los edificios a sotavento; aunque las variaciones no fueron siempre constantes, alcanzando en este régimen un factor de variación de 5. Por último, las evoluciones de las concentraciones en la calle dependieron de las relaciones H1/H2 y W/H2, pero con un comportamiento que los investigadores definen como monótono, es decir, para distancias entre edificios las concentraciones aumentan al comienzo y se vuelven constantes posteriormente. Para sotavento, con edificios muy altos, las concentraciones medias pueden disminuir, aunque encuentran que en las concentraciones medias en las calles son más altas de todos los niveles evaluados. Como conclusión, indican que, para las diferentes modelaciones, las concentraciones medias en las calles aumentan o disminuyen en función de la distancia entre edificios (independiente del régimen estudiado), aunque la evolución de las concentraciones es dependiente del régimen para valores dados de W/H2.

Un trabajo similar en términos de los efectos sobre la dispersión de contaminantes ha sido publicado por Duan *et al.*, (2021). Los investigadores estudiaron los efectos del edificio (debido a su altura) sobre el flujo y la dispersión

de contaminantes en diferentes condiciones de estratificación de la temperatura, empleando las ecuaciones de Reynolds y de Navier Stokes, en el conocido modelo (RANS) $k-\epsilon$ o, modelo de turbulencia. Los resultados mostraron que tanto la altura del edificio central como la estratificación de la temperatura afectan significativamente el flujo de aire alrededor de los conjuntos de edificios. De un lado, cuando la altura del edificio central es $1 H$ (H es la altura de los edificios circundantes), la estructura de flujo bajo las diferentes condiciones de estratificación de temperatura son flujos de interferencia en la morfología, pero son marcadamente diferentes en la cantidad de vórtice. De otro lado, cuando la altura del edificio central es $2 H$, el edificio central tiene un marcado efecto de bloqueo, aumentando la complejidad de los campos de flujo en los bloques circundantes. Adicionalmente, el aumento de la altura del edificio central a $2 H$ disminuye notablemente la energía cinética turbulenta en los cañones de las calles en sus bases, debido al efecto de las zonas de recirculación del edificio central. En condiciones no neutrales, el aumento de la altura central del edificio a $2 H$ intensifica la turbulencia mecánica, lo que da como resultado variaciones de estratificación de temperatura no significativas en los conjuntos de edificios.

Se encuentra también un estudio llevado a cabo por Geng *et al.*, (2020) en el que se evaluó el comportamiento del material particulado alrededor de partículas finas ($PM_{2.5}$) y gruesas (PM_{10}), cuyos valores corresponden con diámetros de partícula menores a 2.5 micras o inferiores a 10 micras, respectivamente. Los investigadores emplearon un sistema de ventilación auxiliar y las ecuaciones de Euler-Euler y Euler-Lagrange, simulando los movimientos masivos de las partículas de polvo después de ciertas validaciones, a partir de los resultados obtenidos en campo; y exploraron la distribución del polvo bajo los principales factores de influencia (tamaño de las partículas y velocidad inicial del aire de suministro), contaron, además, con un sistema de ventilación auxiliar en el estudio. Los investigadores reportan que aproximadamente el 50% o más del total de partículas suspendidas son material particulado de menos de $10 \mu m$ (PM_{10}), y que las

partículas relativamente más grandes ($> 40\text{--}60\ \mu\text{m}$) se depositan principalmente en el lado del aire de retorno.

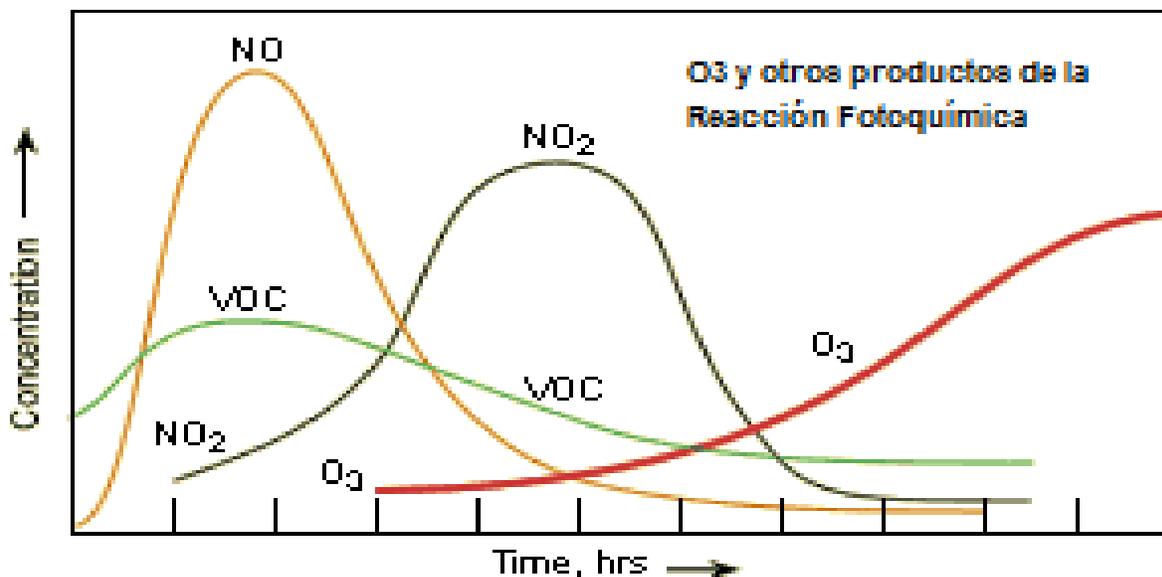
De otro lado, Ding *et al.*, (2019) emplearon la simulación numérica tipo CFD para establecer los impactos generados bajo condiciones asociadas con la forma y configuración de un viaducto y dos diferentes tipos de techos en un cañón urbano callejero. El experimento evaluó fenómenos asociados con el flujo del aire y el comportamiento de los contaminantes a través de estos espacios. Dentro de la simulación usaron techos con dos configuraciones: un techo denominado doble plano y otro triangular. Los investigadores encontraron que en el caso del techo doble plano el vórtice actúa y se genera sin viaducto y en el sentido de las manecillas del reloj, y los contaminantes se acumulan a sotavento. Adicionalmente, que los contaminantes son menores al colocar el viaducto en el cañón, donde su ubicación (en altura), observan, está positivamente relacionada con la concentración de los contaminantes, alcanzando una inversión del vórtice principal a valores de H entre $0.875H$ a $0.98H$. También encontraron que la concentración media de los contaminantes tiene incrementos leves cuando hay inversión del campo del flujo principal, en comparación a cuando no se tiene viaducto, y se presentan vórtices en sentidos horarios o antihorarios, dependiendo del uso de techos o viaductos. Como conclusión, los autores indican que, a diferencia del cañón de la vía, en la condición de techo plano se mejora la dispersión de los contaminantes y la concentración se reduce de forma significativa.

Un último trabajo que no emplea simulaciones tipo CFD incluye la situación de un país que se considera como de contaminación crítica (China). El trabajo ha sido publicado por (Song *et al.*, 2014). y en él se resalta el grave estado de contaminación debido a una acelerada urbanización y a las consecuencias del cambio climático. Su situación sirvió de referente a un número alto de investigadores, e incluye un período de monitoreos de tres años (2014 a 2016), del que se logran obtener respuestas de contaminación para diferentes especies químicas en este país asiático. El trabajo evaluó un total de 31 provincias

(incluyendo cuatro megaciudades: Beijing-Tianjin-Hebei; Yangtze River Delta; Pearl River Delta y Cheng-Yu), y dentro de las variables estudiadas incluyeron: material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$); óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), y ozono (O_3), y se concluyó sobre la importancia de correlacionar los resultados encontrados con trabajos de salud pública que permitan estimar los impactos en las personas y la posterior evaluación de estándares e índices de calidad del aire. Se resalta que, como consecuencia de la aplicación de normas, las emisiones de NO_x , provenientes en este caso de centrales eléctricas y la industria pesada, han reportado bajas en cuanto a NO_2 solo en los últimos años (verificado a partir de inventarios y observaciones satelitales).

Figura 1

Concentración de contaminantes por reacciones químicas.



Fuente (Song, et. al., 2014).

Otro aspecto importante que impacta el nivel de contaminación del aire en zonas urbanas está muy relacionado con condiciones atmosféricas y morfológicas propias de cada asentamiento urbano, pero es importante resaltar que se requiere un adecuado conocimiento de la atmósfera que es conocida como una capa gaseosa que envuelve la tierra y en la que se presentan cambios entre la

temperatura del aire y la altura que la compone. Según Necco (2016), existen una serie de gases que componen la atmósfera, aunque los dos principales son nitrógeno (78.08 %) y oxígeno (20.95 %). También se reporta la presencia de partículas y aerosoles con aparición de compuestos adicionales a nivel de trazas (argón, neón, helio, xenón, ozono), que suman el 1 % restante (Ver Tabla 1).

Tabla 1

Contaminantes constantes.

Componentes constantes (las proporciones permanecen iguales en tiempo y lugar)	
Nitrógeno (N ₂)	78.08%
Oxígeno (O ₂)	20.95%
Argón (Ar) - Gas Inerte	0.93%
Neón, Helio, Kriptón-Gases Inertes	0.0001%
Componentes variables (cantidades varían en tiempo y lugar)	
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0.0003%
Vapor de Agua (H ₂ O)	0 – 4%
Metano (CH ₄)	Trazas
Dióxido de Sulfuro (SO ₂)	Trazas
Ozono (O ₃)	Trazas
Óxidos de Nitrógeno (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻)	Trazas

Tomado de (Necco, 2016).

4. MARCO TEÓRICO

Según Molina Jiménez (2014), la atmósfera cuenta con una altura aproximada de 25 km., en la que los gases mantienen proporciones relativamente constantes con la altura. Entre las funciones más destacadas de esta capa están las de servir para el sostenimiento y mantenimiento de los seres vivos, su vínculo con el ciclo hidrológico y la distribución de la energía que proviene del sol (La atmósfera y sus capas, s.f.).

Con respecto a la estructura de la atmosfera, de acuerdo con la Conserjería de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, de la Generalitat Valenciana, la atmósfera puede dividirse en varios estratos o capas, en las que se localizan diversas zonas de transición asociadas con cambios de temperatura a lo largo de su altura.

a) Troposfera: Conocida como la capa más cercana a la superficie de la tierra, ocupa los primeros 10 a 12 km, y es la zona en la que se producen los efectos meteorológicos y, por ende, es la de mayor número e interés en los estudios.

b) Estratosfera: Esta capa se extiende entre 10 y 50 km, aproximadamente. En esta zona de la atmósfera se localizan dos capas: una zona isoterma (igual temperatura a lo largo de su altura), y otra capa superior, en la que se produce un aumento de temperatura conforme aumenta la altura. El aumento en temperatura en esta parte de la estratosfera se asocia con una serie de reacciones de liberación de energía (isotérmicas), en las que el oxígeno molecular (O_2) y el ozono (O_3), reaccionan y absorben la radiación ultravioleta (longitud de onda dañina para los seres vivos), por lo tanto, su actividad es indispensable para la vida en la tierra.

c) Mesosfera: Es una capa comprendida entre los 50 y 80 km, caracterizada por una disminución de la temperatura con la altura. En esta capa se presentan formas ionizadas de oxígeno atómico y bajas concentraciones de ozono.

d) Termosfera: Es la capa que se extiende desde la mesopausa (límite exterior de la mesosfera), hasta el espacio exterior. Toda la zona está compuesta por Nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) molecular, mientras que las zonas altas (sobre los 200 km) tienen una predominancia del oxígeno atómico (O). La termosfera se caracteriza por un aumento de temperatura con la altura, debido a la absorción de radiación de longitud de onda muy corta por parte compuestos como el N_2 y el O_2 .

e) Ionosfera: Según la Nasa, esta capa es muy activa en la atmósfera, y crece o se encoge dependiendo de la energía que absorbe del sol. En esta capa los gases son agitados por la radiación solar para formar iones (Ionosfera, 2019).

En resumen, debido a las condiciones y cambios a los que se ve sometida la troposfera, tanto a escalas macro como micro, esta debe ser estudiada a partir de modelación. Por lo que el uso de herramientas como los métodos numéricos y la modelación matemática se emplean en la caracterización del movimiento de los contaminantes, convirtiéndose en una herramienta útil y necesaria (Bustos Salas, 2004).

Hay que tener claridad que las modificaciones realizadas en los procesos de urbanización en zonas urbanas impactan su morfología, por tal motivo el estudio de la morfología urbana es relevante para entender los procesos de movimiento de contaminantes en zonas urbanas, este estudio está enfocado en los elementos básicos que configuran el tejido urbano, y los mecanismos de transformación de las estructuras. Según Bellet (2003), los aspectos fundamentales del estudio geográfico de la morfología son el plano, los edificios y los usos del suelo. Para Capel, de acuerdo con Bellet (2003), el plano está definido por las calles y su asociación mutua en un sistema viario; las manzanas delimitadas por las calles; parcelas individuales que sirven de soporte a los edificios; y las plantas de los edificios. Autores como Bosselmann (2008) y Azevedo Salomao (2003) indican que la morfología urbana forma parte de la geografía urbana, y estudian la forma y la evolución histórica del tejido urbano (sus edificios, determinantes naturales de los procesos de transformación).

Para Arellano & Corona (2019) la forma urbana se puede definir como el patrón espacial de las actividades humanas y su manifestación concreta en el medio construido de las ciudades. Adicionalmente, indican que dentro de los atributos de dicha forma existen dos acepciones: a) la del espacio físico; por ejemplo, los lotes, las manzanas, las calles, las construcciones, la mancha urbana, entre otros. b)

según la forma derivada de las prácticas socioespaciales, dentro de las que definen, entre otros, la forma de la distribución y la localización de las actividades económicas, residenciales y de movilidad.

La relevancia de la morfología urbana, según Bellet (2003) y soportado en Capel, es que las diferentes configuraciones que puedan tener los elementos recién mencionados (plano, edificios y usos de suelo), tendrán distintos efectos en las variables ambientales de un determinado fragmento de ciudad. En efecto, son diversos los autores que plantean que todo proceso de urbanización genera una intervención radical del territorio, afectando las características del aire, el agua, el suelo y el subsuelo.

Un ejemplo de lo anterior es el aire de los lugares urbanizados, el cual contiene contaminantes que condicionan la temperatura, el movimiento del aire, la baja humedad ambiental y la presencia de los gases de efecto invernadero (De Abreu-Harbich *et al.*, 2015). Para disminuir los efectos negativos de la urbanización, introduce el concepto de urbanismo bioclimático, enmarcado dentro de la denominada planificación sostenible, cuyo objetivo es el de mejorar la calidad de vida de las personas usando los recursos disponibles de la mejor manera posible, evitando efectos negativos sobre el medio ambiente.

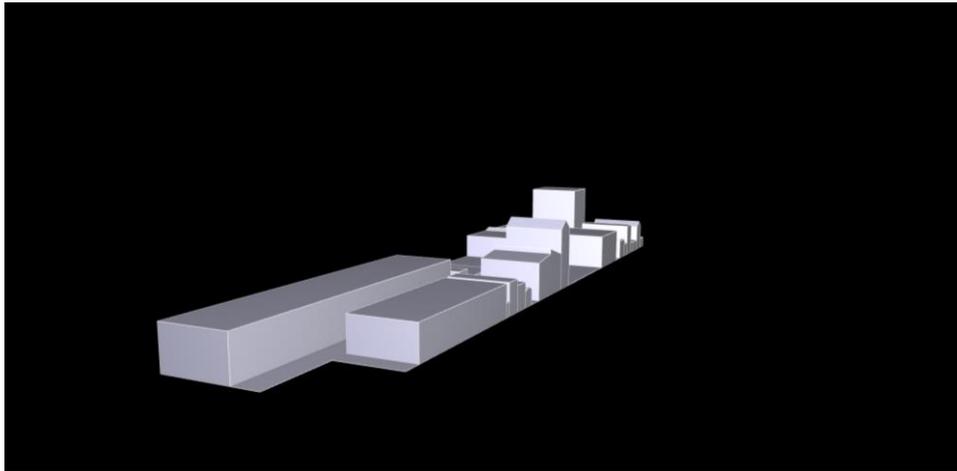
En un trabajo realizado por Jia *et al.*, (2021), los autores consideran aspectos como la huella de las edificaciones, la disposición, la rugosidad, la distancia entre edificios, la altura media, entre otros. De su investigación concluyen que la forma urbana de alta densidad influye más en la física del comportamiento de los contaminantes en la cara del dosel urbano, lo que hace que se bloquee la dispersión de los contaminantes y termine produciendo una mala calidad del aire.

Dentro de los elementos que se definen como componentes de la morfología urbana (Figura 2), están: el contorno, la traza, el amansamiento, el parcelamiento, la textura y la apariencia. Una breve definición de cada uno de estos términos ha

sido referenciada por Sgroi (2009) a partir de un trabajo inicial de Patricio Randle en 1977.

Figura 2

Morfología del sitio de estudio.



Tomado de simulación en AutoCAD.

Con el propósito de unificar parámetros de control de la contaminación del aire en zonas urbanas, es especial por el aumento de la contaminación del aire y su incidencia negativa en la salud de la población, debido a las características tóxicas, persistentes, bio-acumulables y semi volátiles de los Compuestos Orgánicos Persistentes -COPs-, diversas organizaciones internacionales, y a muchos gobiernos, han tomado medidas tendientes a dirigir sus esfuerzos en controlar, reducir y seguir estos contaminantes mediante acciones vinculantes que se traduzcan en políticas públicas. Con base en lo anterior, el hito más importante a nivel mundial para este nuevo siglo se dio a partir de la “Convención de Estocolmo” sobre COPs, celebrada en 2001. El principal objetivo de la convención fue el reducir o eliminar la producción, utilización, y emisión al medio ambiente de compuestos tipo COPs, y proteger la salud humana y el medio ambiente de sus efectos adversos.

En consecuencia, la Convención de Estocolmo crea el Programa de Monitoreo Global (GMP), cuyo propósito fue el de recolectar datos relacionados con la distribución espacial y temporal de los compuestos contaminantes arrojados al aire. Dentro de esta política en Colombia, para el año 2006, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emite la Resolución 601, con la cual establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión en todo el territorio nacional, estableciendo los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia y las medidas generales para su mitigación.

En el 2008 Colombia ratificó el “Convenio de Estocolmo” mediante la ley 1196 de 2008, en la cual se contemplan, entre otras, las medidas dirigidas a reducción y eliminación de contaminantes en el aire, así como planes de aplicación, restricción de productos químicos contaminantes, la información, sensibilización y formación en temas de COPs. En 2010 se elaboró el “Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo” bajo cuatro líneas estratégicas: Prevención o minimización de existencias y liberaciones de COP, Gestión del riego, Eliminación de existencias de COPs (Ley 1196 de junio 5 de 2008. Diario Oficial No. 47.011 de 5 de junio de 2008, Congreso de la República).

Posteriormente, se modificó la Resolución 601 de 2006, a partir de la Resolución 610 de 2010, estableciendo nuevas definiciones, niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos; procedimientos de medición de la calidad del aire, mediciones de calidad del aire por las autoridades ambientales, declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire [Resolución 610 de marzo 24 de 2010, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial].

Más recientemente es emitida la Resolución 2254 de 2017, con la cual el Ministerio de Ambiente establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana [Resolución 2254 de noviembre 1 de 2017. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible]. Así, Colombia ha venido construyendo una legislación para mejorar la calidad del aire y reducir y controlar los niveles de emisiones de contaminantes.

En el caso específico de Medellín y su Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), es expedida la Resolución Metropolitana D 00-002489 de 2018, en la cual se enmarca y acatan las normativas y políticas precedentes en la reducción de los niveles de contaminación del aire provenientes de fuentes móviles. Dentro de esta directiva, se propone la renovación y modernización del parque automotor y el seguimiento y control de emisiones vehiculares, que incluye la clasificación e identificación de los vehículos en función de los niveles de emisión, y la identificación de alternativas para reducción y control de emisiones de vehículos en circulación [Resolución 2486 de septiembre 26 de 2018].

A partir de la Resolución 2254 de 2017, en Colombia se establecen los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio (ver Tabla 2), cuyo cumplimiento rige a partir de enero de 2018.

Los NO_x se producen de forma natural debido a la descomposición de la materia orgánica en los incendios forestales y en las descargas eléctricas de las tormentas. Típicamente, un poco más de la mitad de las emisiones de NO_x en un centro urbano provienen del sector transporte, seguido de las plantas generadoras de energía y el sector industrial.

Tabla 2

Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire.

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM_{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO₂	60	Anual
	200	1 hora
O₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Tabla diseñada a partir de la información contenida en la Resolución 2254 de 2017.

Igualmente, la misma resolución 2254 de 2017, en su Artículo 3, ha fijado los niveles máximos permisibles para el año 2030. Tal como lo indica la Tabla 3, Colombia aspira a realizar unas bajas significativas en concentración de contaminantes y, específicamente, en relación con el dióxido de nitrógeno (NO₂), gas objeto de estudio que pasaría en la norma actual de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2030.

Ante la complejidad de los diferentes fenómenos asociados a la contaminación del aire en zonas urbanas, no solo desde el punto de medición de estos parámetros, sino de su interacción, los modelos numéricos emergen como una solución económica y viable para el estudio de la forma en que se relacionan los diferentes parámetros.

Tabla 3

Niveles máximos de contaminantes en el aire para el año 2030.

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM₁₀	30	Anual
PM_{2.5}	15	Anual
SO₂	20	24 horas
NO₂	40	Anual

Tabla diseñada a partir de la información contenida en la Resolución 2254 de 2017.

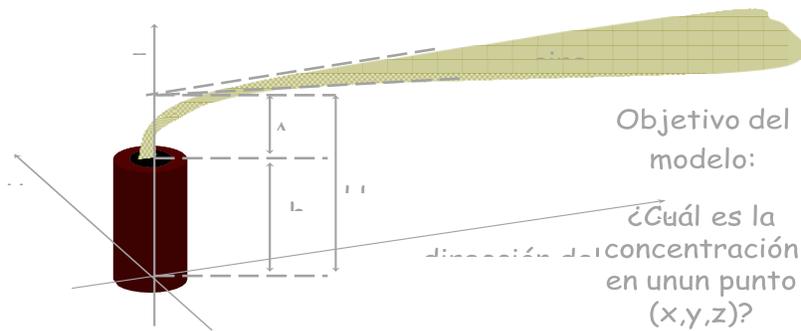
De acuerdo con Oliveri Conti *et al.*, (2017) dicen que dentro de los modelos de dispersión más usados están: modelos de caja, pluma Gaussiano, Lagrangiano, Eurliano, y otros de dinámica de fluidos computacionales. Además de otros modelos que incluyen los de predicción, fotoquímicos y receptores. Con base en lo anterior, se hará una rápida descripción de dichos modelos:

✓ **Modelo de Caja.** Este modelo es conocido como uno de los modelos de dispersión más simples. En él se asume que el volumen de aire atmosférico tiene forma de caja, y que los contaminantes en el interior de la caja están distribuidos homogéneamente. Se reporta una baja precisión en cuanto a la capacidad de predicción, soportado en que la distribución del volumen de aire distribuido homogéneamente al interior de la caja es muy simple e irreal.

✓ **Modelo Gaussiano:** Este es uno de los modelos más antiguo y de gran uso. Asume que la dispersión de los contaminantes atmosféricos tiene una distribución tipo gauss o de campana, en la que la distribución reporta un comportamiento normal. Es frecuentemente empleado en la evaluación de dispersión de fuentes puntuales de contaminación, conocidos como modelos tipo pluma o bocanada. En la Figura 3 se ilustra un esquema de este modelo.

Figura 3

Modelo Gaussiano.

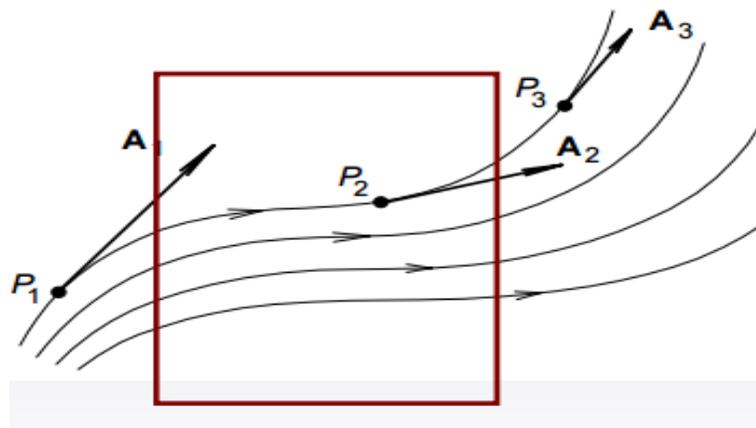


✓ **Modelo Lagrangiano:** Este es una forma de dispersión que sigue la trayectoria matemática de las partículas de la pluma contaminante. Se dice también que permite mostrar la modelación de las partículas, y que es posible identificar cómo se mueven estas especies en la atmósfera a partir de un recorrido aleatorio. El modelo permite calcular la dispersión a partir de estadísticas de trayectorias de una gran cantidad de plumas de contaminación.

✓ **Modelo Euleriano:** es un modelo de dispersión similar al Lagrangiano, en el que su diferencia radica en el uso de una cuadrícula cartesiana fija de tres dimensiones, mientras que en el Lagrangiano su marco de referencia es móvil.

Figura 4

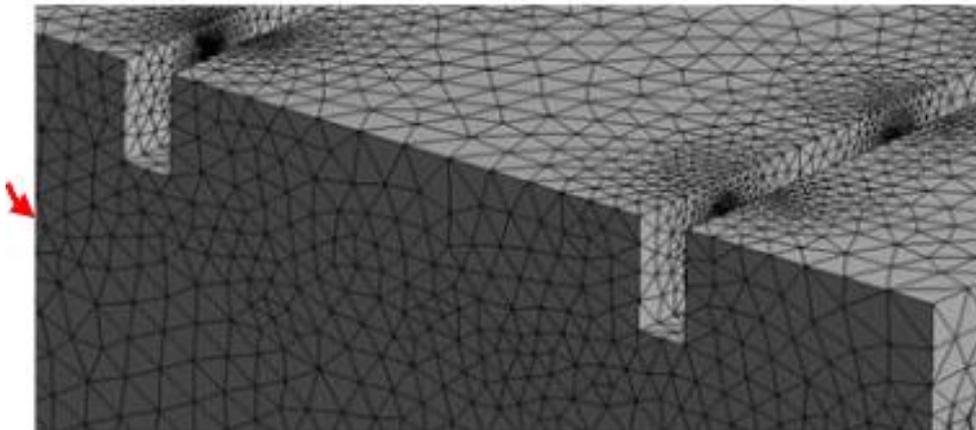
Modelo Euleriano.



✓ **Modelo CFD:** modelo basado en dinámica de fluidos computacional. Está orientado hacia la evaluación de variables como el viento y la turbulencia de un área específica. Su desarrollo permite evaluar de manera paralela el transporte y la dispersión de los contaminantes. Uno de los modelos de este tipo más útil es el conocido AirQ, en el que se basan los estudios relacionados con comunidades y sus aspectos de dispersión de contaminantes. Los modelos CFD permiten la obtención de ideas asociadas con las áreas en que se orientan los patrones de flujo, actividad que se caracteriza por ser difícil, costosa o imposible de estudiar a partir de técnicas experimentales tradicionales. En resumen, estos modelos proporcionan una predicción cualitativa o cuantitativa de los flujos de fluidos, sean líquidos o gaseosos.

Figura 5

Modelo Configuración de la Malla para la Modelación.



Modelación CFD.

De acuerdo con (Thabet & Thabit, 2018) y con la intención de ampliar algunos aspectos como los indicados anteriormente, definen la modelación CFD como un método que utiliza técnicas en las que se incluyen la física, la matemática aplicada y la informática, para modelar, predecir y visualizar cómo fluyen los fluidos, sean estos gases o líquidos. Para los investigadores, a partir de estos modelos se pueden

elaborar predicciones cualitativas y cuantitativas, apoyados en herramientas de modelado matemático, con cálculo numérico y software para diseñar, comprender, construir y, de allí, predecir los escenarios requeridos a través de modelos matemáticos (ecuaciones diferenciales parciales), métodos numéricos (técnicas de discretización y solución), y herramientas de software (solucionadores, procesamiento y pos-procesamiento).

4.1 Componentes del modelo CFD

Los elementos principales de la dinámica de fluidos computacionales, incluye: a) la discretización del flujo continuo, de forma que las variables se aproximen por un número finito a valores en puntos llamados nodos; b) las ecuaciones de movimiento también se discretizan en función de las variables de los nodos, por lo que se establece que las ecuaciones integrales (continuas) serán iguales a las ecuaciones algebraicas (discretas); y c) el sistema de ecuaciones algebraicas se resuelven, y de allí se obtienen los valores de las variables en todos los nodos (Dinámica de Fluidos Computacional: ¿qué es?, 2016).

4.2 Etapas en un análisis de CFD

A partir del trabajo realizado por Wesseling (2001), dentro de las etapas reconocidas para el análisis completo del CFD, se hace necesario llevar a cabo las siguientes fases o etapas: a) cálculos previos, b) solución de ecuaciones, y c) análisis de resultados.

En cuanto a los cálculos previos, esta etapa depende del análisis a realizar e involucra la formulación del problema y el planteamiento de ecuaciones; el establecimiento de las condiciones del contorno y la generación de una malla de volúmenes finitos. Igualmente, la solución de ecuaciones es considerada como la etapa más importante del CFD, pues en ésta se darán las soluciones a las ecuaciones que soportan el problema. Por último, en el análisis de los resultados se

deberá verificar que las respuestas obtenidas en la etapa anterior correspondan con los valores de las variables en campo en cada punto de la malla propuesta. En esta última fase se podrá llevar a cabo la representación gráfica de las variables, lo que ayuda a la mejor comprensión de los fenómenos.

4.3 Variables de interés en modelado CDF para evaluación de calidad del aire

Los modelos de concentración de contaminantes son protocolos matemáticos que proporcionan una estimación de la cantidad de un contaminante en función de una serie de parámetros de entrada de diferente tipo meteorológico, químico, topográfico y de cantidad y velocidad de emisión. En concreto, se evaluarán:

- Cantidad de contaminante emitida por unidad de tiempo, posición y altura de emisión.
- Velocidad y dirección de los vientos dominantes, estabilidad atmosférica y altura de mezclado.
- Comportamiento químico del contaminante, como la vida media o las reacciones potenciales.

El modelo tiene un balance de materia en un elemento del volumen o celda, el cual está relacionado según se muestra en la ecuación (*).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{velocidad de entrada} + \text{velocidad de formacion} - \text{velocidad de salida} - \text{velocidad de destruccion.} \quad (*)$$

Donde $\frac{\partial C}{\partial t}$, la derivada de la concentración de contaminante con respecto al tiempo, se corresponde con la velocidad de acumulación del contaminante. En este sentido, una derivada positiva indica que el contaminante se está acumulando en la

celda, bien sea porque entra más contaminante del que sale, o porque el mismo se crea a una mayor velocidad que a la que se destruye. Estos términos de “creación” y de “destrucción” son fundamentalmente debidos a reacciones químicas, y para contaminantes que no reaccionen o que reaccionen muy despacio se puede ignorar su inclusión.

De otro lado, la turbulencia generada por las interacciones superficie-atmósfera y su disipación, determina en gran parte la dispersión de contaminantes y, por lo tanto, su impacto en la salud de la población. La parametrización de la turbulencia en los modelos de transporte y dispersión de contaminantes ha sido observada y validada principalmente en latitudes medias, pero muy poco en el trópico. En este trabajo se caracteriza la zona de estudio en una ciudad impactada por contaminación de la calidad del aire, como es el caso de un sector de Medellín.

La influencia de la morfología urbana en la contaminación del aire en la zona de estudio de esta investigación está determinada por la naturaleza y el carácter irregular de las zonas que determinan los barrios de Medellín. Desde un punto de vista histórico, el centro de la ciudad presenta una geometría muy irregular que condiciona la distribución de gases contaminantes. La situación es diferente en zonas nuevas de la ciudad, como es la zona noroccidental, desarrollada a mediados del siglo XX, y que cuenta con normas urbanísticas que rigen su crecimiento, con barrios más regulares.

4.4 Modelo ANSYS FLUENT

Según lo describe Zamora Pina, (2016), un modelo “Ansys Fluent” se define como una herramienta que permite evaluar los efectos de la turbulencia en el análisis de la dinámica de fluidos. Este tipo de modelos permite seleccionar entre dos métodos numéricos de solución de ecuaciones, a partir de volúmenes finitos sobre las ecuaciones que gobiernan el movimiento (solver segregado y solver acoplado).

El solver segregado es un algoritmo que resuelve las ecuaciones de gobierno, de forma secuencial; y en el solver acoplado el algoritmo resuelve dichas ecuaciones de gobierno de manera simultánea. En ambos casos prima que las ecuaciones de gobierno son no-lineales (y acopladas), y, por tanto, se necesita de un proceso iterativo para que el código converja a la solución final. De acuerdo con Zamora Pina (2016), ambos métodos emplean la técnica de los volúmenes de control, así:

a) Dividir el dominio computacional en volúmenes de control discretos según la malla empleada.

b) Integrar las ecuaciones de gobierno sobre los volúmenes de control individuales para construir un sistema de ecuaciones algebraicas, para las variables incógnita discretizadas (velocidad, presión, temperatura, etc.).

c) Linealizar las ecuaciones discretizadas y resolver el sistema de ecuaciones linealizado resultante, para obtener los valores de las variables incógnitas del problema.

d) Los dos métodos numéricos emplean un proceso de discretización similar (volúmenes finitos), pero la aproximación empleada para linealizar y resolver las ecuaciones discretizadas es diferente.

4.5 Modelos de turbulencia

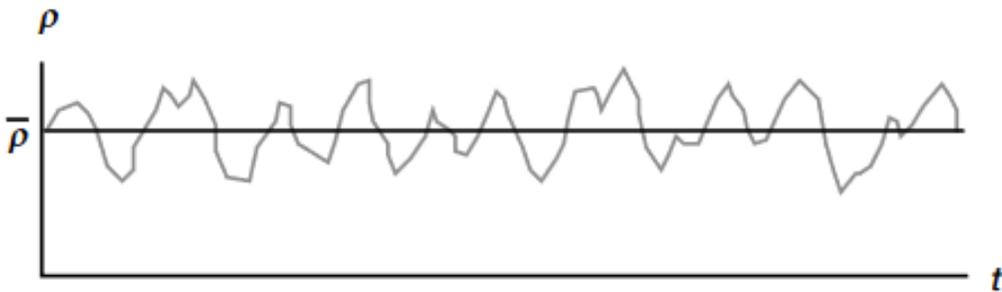
Los fenómenos turbulentos son los más complejos de modelar en la dinámica de fluidos, esto en parte por las grandes variaciones que se tienen en los diferentes procesos de transporte de material por el aire y por las demandas computacionales que se requieren para realizar este seguimiento. A continuación, se mencionan algunos de los parámetros más relevantes y la forma en que se deben abordar desde el punto de vista de simplificación de su variación desde el punto de vista matemático. Utilizando el promedio de tiempo se puede obtener una media que es igual al promedio del conjunto. El promedio de tiempo se explica usando el ejemplo

de un proceso estadísticamente estacionario que se ilustra (Figura 6). Si se observa el comportamiento temporal de una variable, la densidad ρ , se puede observar que el valor fluctúa en torno a una media. El promedio de tiempo se obtiene por integración durante un largo intervalo de tiempo, según muestra la Figura 6.

$$\bar{\rho}(\vec{r}) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \rho(\vec{r}, t) dt. \quad (1)$$

Figura 6

Fluctuaciones Temporales Proceso Estacionario.



Si el promedio mismo cambia lentamente en el tiempo, los promedios de tiempo locales se pueden calcular en sistemas no estacionarios si las fluctuaciones temporales son rápidas en comparación con el comportamiento temporal del valor medio (Figura 7). El flujo dentro de un motor de pistón es un ejemplo en el que se utiliza este enfoque inestable; el flujo medio es impulsado por el pistón, y se espera que se reproduzca en cada ciclo del motor. En este caso, el resultado para el promedio de tiempo es ($t_1 < t' < t_2$).

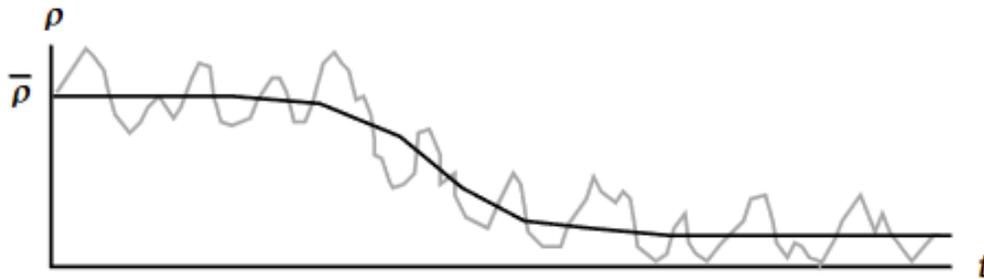
$$\bar{\rho}(\vec{r}, t') = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \rho(\vec{r}, t) dt, \text{ con } t_1 \leq t' \leq t_2. \quad (2)$$

El promedio de tiempo, entonces, se usa de la siguiente manera: el valor de cualquier propiedad del flujo q se divide en su promedio de tiempo y la fluctuación.

$$q(\vec{r}, t) = \bar{q}(\vec{r}, t) + q'(\vec{r}, t). \quad (3)$$

Figura 7

Fluctuaciones temporales proceso no estacionario.



Si q es el promedio, el resultado importante es que la media de las fluctuaciones es cero.

$$\overline{q'} = 0. \quad (4)$$

Las grandes variaciones de densidad son típicas de los procesos de combustión. Por lo tanto, es útil introducir otro promedio, a saber, el promedio de Favre (también llamado promedio ponderado de densidad), que es para una propiedad arbitraria q dada por

$$\tilde{q} = \frac{\overline{\rho q}}{\bar{\rho}} \quad \text{o} \quad \bar{\rho} \tilde{q} = \overline{\rho q}. \quad (5)$$

Como en la ecuación (4), cualquier propiedad q puede dividirse nuevamente en su valor medio y las fluctuaciones.

$$q(\vec{r}, t) = \tilde{q}(\vec{r}, t) + q''(\vec{r}, t). \quad (6)$$

El resultado para la media de la fluctuación de Favre es

$$\overline{\rho q''} = 0. \quad (7)$$

Ingresando la ecuación (4) en la ecuación (6), y tomando la relación que permite calcular el promedio de Favre con el promedio de la variable q , tenemos que:

$$\tilde{q} = \frac{\overline{\rho q}}{\bar{\rho}} = \frac{(\overline{\rho + \rho'}) (q + \bar{q})}{\bar{\rho}} = \frac{\overline{\rho q}}{\bar{\rho}} + \frac{\overline{\rho q'}}{\bar{\rho}} + \frac{\overline{\rho' \bar{q}}}{\bar{\rho}} + \frac{\overline{\rho' q'}}{\bar{\rho}}, \quad (8)$$

y

$$\tilde{q} = \bar{q} + \frac{\overline{\rho' q'}}{\bar{\rho}}. \quad (9)$$

Sin embargo, la correlación $\overline{\rho' q'}$ de la fluctuación de la densidad con la fluctuación de la variable q conocida sería importante si la correlación es computada para conservar la ecuación o derivar la ecuación. La media del cuadrado de la variable q es calculada fácilmente para la ecuación (4),

$$\overline{q^2} = \overline{(\bar{q} + q')(q' + \bar{q})} = \overline{\bar{q} \bar{q}} + \overline{\bar{q} q'} + \overline{q' \bar{q}} + \overline{q' q'} = \bar{q} \bar{q} + 2\overline{\bar{q} q'} + \overline{q' q'}, \quad (10)$$

y

$$\overline{q^2} = \bar{q}^2 + \overline{q'^2}. \quad (11)$$

La media ponderada de la densidad de la correlación entre dos variables u y v se puede calcular de acuerdo con:

$$\begin{aligned} \overline{\rho \mu v} &= \overline{(\bar{\rho} + \rho')(\bar{\mu} + \mu')(\bar{v} + v')} \\ &= \overline{\bar{\rho} \bar{\mu} \bar{v} + \bar{\rho} \bar{\mu} v' + \bar{\rho} \mu' \bar{v} + \bar{\rho} \mu' v' + \rho' \bar{\mu} \bar{v} + \rho' \bar{\mu} v' + \rho' \mu' \bar{v} + \rho' \mu' v'} \\ &= \bar{\rho} \bar{\mu} \bar{v} + \overline{\bar{\rho} \mu' v'} + \overline{\bar{\rho} \mu' v'} + \overline{\bar{\rho} \mu' v'} + \overline{\bar{\rho} \mu' v'}. \end{aligned} \quad (12)$$

Al dividir entre el promedio de Favre y fluctuaciones de Favre, se tiene

$$\overline{\rho \mu v} = \overline{\rho(\bar{\mu} + \mu')(\bar{v} + v')} = \overline{\rho \bar{\mu} \bar{v} + \rho \bar{\mu} v' + \rho \mu' \bar{v} + \rho \mu' v'} \quad (13)$$

y

$$\overline{\rho \mu v} = \bar{\rho} \bar{\mu} \bar{v} + \overline{\rho \mu' v'}. \quad (14)$$

Comparando la ecuación (12) y la ecuación (14), se muestra que una formulación es más sólida, con menos correlaciones, si se promedia la ecuación Favre. Por lo tanto, esta es una de las razones por la cual se utiliza dicho promedio.

4.6 Ecuaciones de Reynold-Averaged Navier-Stokes (RANS)

Las ecuaciones de Navier-Stokes permiten la simulación de flujos de reacciones. Si solo interesan los valores medios del flujo turbulento, pero no en las fluctuaciones, uno puede derivar las ecuaciones de conservación promediadas de Reynolds a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS).

Por la conservación de masa, después de promediar con la ayuda ecuación (14), se obtiene la ecuación elemental

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\vec{v}}) = 0. \quad (15)$$

Igualmente, se obtiene la conservación de masa, usando la aproximación

$$\vec{j}_i = D_i \rho \text{ grad } w_i \text{ y la ecuación (14) y la ecuación (7).}$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{w}_i)}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\vec{v}} \tilde{w}_i) + \text{div}(\overline{-\rho D_i \text{ grad } w_i} + \overline{\rho \tilde{v}'' w_i''}) = \overline{M_i w_i}. \quad (16)$$

Para el momento de conservación, obtenemos

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\vec{v}} \otimes \tilde{\vec{v}}) + \text{div}(\overline{\vec{p}} + \overline{\rho \tilde{v}'' * \tilde{v}''}) = \bar{\rho} \vec{g}. \quad (17)$$

Para la conservación de la Entalpia (flujo de energía térmica en los procesos químicos efectuados a presión constante cuando el único trabajo es de presión-volumen), se obtiene con la aproximación $\vec{j}_q = -\lambda \text{ grad } T$,

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{h})}{\partial t} - \frac{\partial\bar{p}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}\tilde{v}\tilde{h}) + \text{div}(-\lambda\overline{\text{grad}T} + \overline{\rho v''h''}) = \bar{q}_r. \quad (18)$$

Los términos $\bar{\bar{p}}$: $\text{grad } \vec{v}$ und $\text{div}(p\vec{v})$ no son considerados porque solo son importantes en los gradientes de presión extrema, se producen ondas de choques o detonaciones en el sistema. Como la ecuación original, se necesita una ecuación de estado (ley del gas ideal). El promedio $p = \rho RT \sum \frac{w_i}{M_i}$ donde

$$\bar{p} = R \sum_{i=1}^S (\bar{\rho}\tilde{T}\tilde{w}_i + \overline{\rho T''w_i''}) \frac{1}{M_i}. \quad (19)$$

Si las masas molares no difieren demasiado, se puede utilizar la aproximación de las fluctuaciones, teniendo en cuenta que la masa molar media es insignificante. El promedio de la aproximación

$$\bar{p} = \frac{\bar{\rho}R\tilde{T}}{\bar{M}}, \quad (20)$$

donde \bar{M} define el promedio de la masa molar de las mezclas.

El desarrollo de los términos de la ecuación de conservación es muy difícil, pero es ventajoso derivar los elementos de la ecuación de conservación. Los elementos no crean ni destruyen reacciones químicas, desaparecen los elementos de la ecuación de la conservación. Se introduce el elemento de la fracción molar

$$Z_i = \sum_{j=1}^S \mu_{ij} w_j, \text{ para } i = 1, 2, \dots, M, \quad (21)$$

donde S denota el número de categorías, y M es el número de diferentes elementos de mezclas considerados. El μ_{ij} denota el radio de masa del elemento i en la categoría j . Si consideramos que la difusión de coeficiente D_i en la ecuación (16) es igual a las categorías de la ecuación de conservación multiplicados por μ_{ij} , tenemos que

$$\frac{\partial(\rho Z_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} Z_i) - \text{div}(\rho D \text{grad} Z_i) = 0. \quad (22)$$

Por qué el elemento de la conservación $\sum \mu_{ij} M_i w_i = 0$, esta ecuación no contiene una reacción térmica, y determina

$$\frac{\partial(\overline{\rho Z_i})}{\partial t} + \text{div}(\overline{\rho \vec{v} \tilde{Z}_i}) + \text{div}(\overline{\rho \vec{v}'' Z_i''} - \overline{\rho D \text{grad} Z_i}) = 0. \quad (23)$$

Las ecuaciones de Navier-Stoke son cerradas cuando se utilizan leyes empíricas para las densidades de flujo. Las ecuaciones de conservación promediadas no están cerradas a términos de la forma $\overline{\rho \vec{v}'' q''}$. Estos nuevos términos generados en el proceso de promedios se conocen explícitamente como funciones de las variables dependientes. Por lo tanto, tenemos más incógnitas que ecuaciones.

Para resolver el problema de cierre se proponen modelos que describan las tensiones de Reynold $\overline{\rho \vec{v}'' q''}$ en términos de la variable dependiente. Los modelos de turbulencia interpretan $\overline{\rho \vec{v}'' q''}$ ($q = w_i, \vec{v}, h, Z_i$) en las ecuaciones (15) a (18) y la ecuación (23). Utilizando el gradiente del transporte que establece que el termino es proporcional al gradiente del valor medio de la propiedad,

$$\overline{\rho \vec{v}'' q''} = -\overline{\rho} V_T \text{grad} \tilde{q}_i, \quad (24)$$

donde V_T es el coeficiente de intercambio turbulento. Suponer el gradiente de transporte es la fuente de muchas discusiones, de hecho, los experimentos muestran que el transporte turbulento puede incluso influir en el gradiente de valor medio.

Por lo general se define que el transporte turbulento es mucho más rápido que el proceso de transporte laminar. Además, los términos de transporte laminar en las

ecuaciones de (15) a (18) pueden despreciarse muy a menudo, y luego las ecuaciones de conservación se simplifican como

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \text{div} (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}}) = 0. \quad (25)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{w}_i)}{\partial t} + \text{div} (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}} \tilde{w}_i) - \text{div} (\bar{\rho} V_T \text{grad} \tilde{w}_i) = \overline{M_i w_i}. \quad (26)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}})}{\partial t} + \text{div} (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}} \otimes \tilde{\vec{v}}) - \text{div} (\bar{\rho} V_T \text{grad} \tilde{\vec{v}}) = \overline{\rho \vec{g}}. \quad (27)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \text{div} (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}} \tilde{h}) - \text{div} (\bar{\rho} V_T \text{grad} \tilde{h}) = \overline{q_r}. \quad (28)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Z}_i)}{\partial t} + \text{div} (\bar{\rho} \tilde{\vec{v}} \tilde{Z}_i) - \text{div} (\bar{\rho} V_T \text{grad} \tilde{Z}_i) = 0. \quad (29)$$

Si se conoce el coeficiente de intercambio turbulento, las ecuaciones se pueden resolver numéricamente.

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS DE CONTAMINACIÓN POR EMISIONES VEHICULARES EN ZONAS URBANAS (CASO DE ESTUDIO)

El Valle de Aburrá, tal como se muestra en la Figura 8, está conformado por 10 municipios, con una población estimada de 2.376.337 habitantes a 2018, (Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Medellín, Antioquia 2019). Adicionalmente, se ha atribuido que, dadas las condiciones de población, vecindad entre municipios, etc., reciba el nombre de Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Esta zona es un valle con una compleja zona montañosa en sus costados oriental y occidental, y es dividida de norte a sur por un río que lo cruza (Río Medellín).

Geográficamente, el Valle de Aburrá está conformado por una zona montañosa cuya complejidad topográfica influye sobre las dinámicas de transporte y fluctuación de vientos y, por consiguiente, en la dispersión, transformación y movimiento de contaminantes (AMVA, 2002). Esta entidad ambiental indica que Medellín se encuentra situada en la cordillera central de los Andes colombianos a 1450 msnm, lo que indica que es un valle profundo y estrecho (1000 m y 10 km en promedio), conocido como Valle de Aburra (VA). Dentro de las características del Valle, están: a) está dominado por altiplanos que ascienden hasta 2800 msnm; b) su área urbana es de 102 km², y en ella, a 2018, se aloja una población estimada de 2.529.403 habitantes; c) la ciudad presenta un clima templado-seco, con valores promedio anuales de 22.5 °C de temperatura, una precipitación cercana a los 1685 mm, y su humedad relativa es de 67 % (IDEAM, 2018a) y por último d) la dirección.

Otra característica importante de esta zona de estudio es que, dados los factores topográficos y la meteorología propia del punto, es un lugar con condiciones especiales para la circulación de contaminantes, por lo que incluso algunos estudios la definen como una zona de circulación débil (García Meza, 2009).

Es importante reconocer que el Área Metropolitana cuenta con una red de monitoreo de calidad de aire robusta, y que se integra al Sistema de Alerta Temprana (SIATA) del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Esta red tiene un total de 43 puntos de monitoreo que incluyen equipos entre automáticos y manuales (SIATA, 2018), de los cuales 14 están localizados en diversos puntos de la ciudad de Medellín.

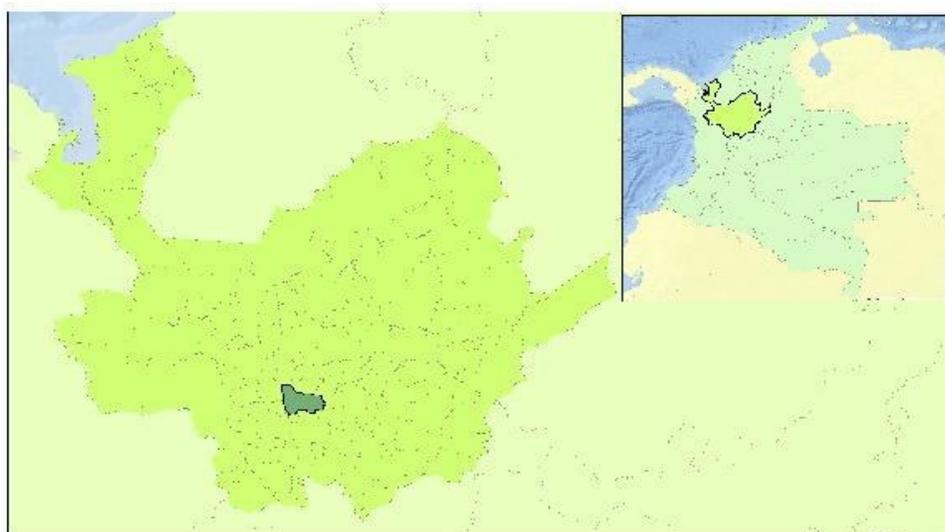
El sitio establecido como zona de estudio está localizado en la antigua calle de “el prado”, que, en tiempos coloniales, fue abierta entre las calles Colombia y Maturín, y más tarde bautizadas como Carrera Carabobo. Esta carrera es una de las de mayor longitud, pues atraviesa la ciudad de norte a sur, convirtiéndose en una de las arterias de mayor importancia en la Ciudad de Medellín. Adicionalmente, se reconoce por ser una de las vías más transitadas de la ciudad, con alto flujo de

buses y otros medios de transporte que conectan a los habitantes del norte con el centro, o el reconocido corazón comercial y financiero del centro de Medellín. Es importante entender que, para este estudio, la correlación existente entre la dirección del viento (mayoritariamente en sentido norte sur en la ciudad) con el impacto en la ventilación natural y la acumulación de contaminantes, asociado con las altas edificaciones del centro, pueden incidir en la circulación, distribución, mezcla y transporte de los contaminantes, motivo que ayuda a definir la zona como la de mayor interés. También es importante resaltar que es una zona que ya se ha convertido en calle peatonal en su ingreso a la zona céntrica de Medellín y los planes futuros son ampliar su caracterización como calle peatonal a la zona que corresponde a la propuesta en este estudio.

En la Figura 9 se muestran diferentes tomas realizadas sobre la denominada área de estudio. La componente Figura 9(a), presenta una vista global del sitio y su correspondiente zona de interés, comprendida entre las carreras 52 (Carabobo) y 53 (avenida Cundinamarca), y las Calles 60 y 64. Igualmente, en la Figura 9(b), se puede observar una zona que permite verificar que corresponde a una vía principal, sujeta a gran tráfico vehicular (la carrera 52 divide la zona de estudio).

Figura 8

Mapa zona de estudio.



Como se ha indicado, en la zona de estudio se cuenta con algunas restricciones de espacio, así como los consecuentes cambios en la circulación de viento y las diferencias en altura de construcciones (uno y dos pisos, hasta otras que superan la altura equivalente de 8 pisos). Se tiene, además, una alta variedad en usos del suelo, donde coexisten sectores como: académico, clínico, habitacional-residencial y comercial; así como la presencia de una zona rica en vegetación, ubicada especialmente al interior del Hospital San Vicente de Paúl, al interior de la Universidad de Antioquia, y, un poco más retirado, se encuentran el Cerro el Volador y el conocido Jardín Botánico.

Con base en las condiciones expuestas, se definió la zona de estudio como un sitio de gran valor, con aspectos como la ubicación desde diferentes ópticas, así: a) médico: clínicas y centros médicos y de salud; b) académico: se reconocen acá varias unidades académicas adscritas a la Universidad de Antioquia, tales como: la sede de Medicina, Salud Pública, Enfermería, Odontología) y a dos cuadras la sede principal de la universidad, se tiene una circulación poblacional superior a las 20000 personas/día); y c) científico: dentro de la zona de estudio se encuentra alojada la Sede de Investigaciones Universitaria – SIU, de la Universidad de Antioquia, que la hace muy interesante de explorar.

También se debe resaltar que esta área se encuentra influenciada por un alto flujo vehicular, compuesto principalmente por vehículos de carga y autobuses, lo que supone un marcado interés en la evaluación de la dispersión y difusión de los contaminantes (especialmente compuestos de nitrógeno), el efecto de los vientos con predominancia norte – sur, como se ha indicado, y para el que aspectos colaterales como evaluaciones sobre la salud pública de las poblaciones expuestas (habitantes o residentes, estudiantes, pacientes, investigadores, entre otros), deberían ser abordados en otros estudios, y, a partir de lo obtenido, realizar mejores

proyecciones de calidad del aire, una disposición más asertiva para la definición del uso de suelo y el replanteamiento de futuras planeaciones urbanas.

Figura 9

Avenida Carabobo Facultad de Medicina-SIU-Selección sitio de estudio.



(a) vista en planta.

(b) proyección zona de interés.

5.1. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN - CFD

5.1.1 Dominio computacional

Para este trabajo se tuvo en cuenta la geometría más sencilla que puede ser generada directamente mediante la herramienta CAD (de sus siglas en inglés *Computer Aided Design* o Diseño Asistido por Ordenador). Este es un software tipo CFD que no requiere la realización de una limpieza del modelo. Es decir que, teniendo en cuenta las condiciones iniciales de la modelación, a medida que se ingresan los datos se pueden descartar condiciones no necesarias. Por lo tanto, cuando por su complejidad la geometría es generada e importada desde un programa CAD, puede ocurrir entonces que, por considerar diferentes tolerancias de precisión en este y en el software CFD, existan problemas de coincidencias en

vértices, aristas o caras del modelo, resultando la geometría inconsistente posterior al mallado. Por tal motivo se debe proceder con análisis exhaustivo. En tales circunstancias se debe proceder a un análisis de los elementos geométricos a fin de limpiar a posibles inconsistencias.

Posteriormente se lleva a cabo la generación de la malla del dominio computacional. Por lo tanto, se analizó el interior de un volumen, y fue necesario llevar a cabo su discretización con el fin de resolver las ecuaciones generales de mecánica de fluidos en cada uno de los volúmenes finitos en los que se divide el dominio. Para el mallado se utilizó una forma de seis lados (hexaédrica), teniendo en cuenta que se pueden tomar formas diferentes, como la tetraédrica, prismática, entre otras. Dicho proceso permitió la clasificación de la malla bajo la condición de estructurada.

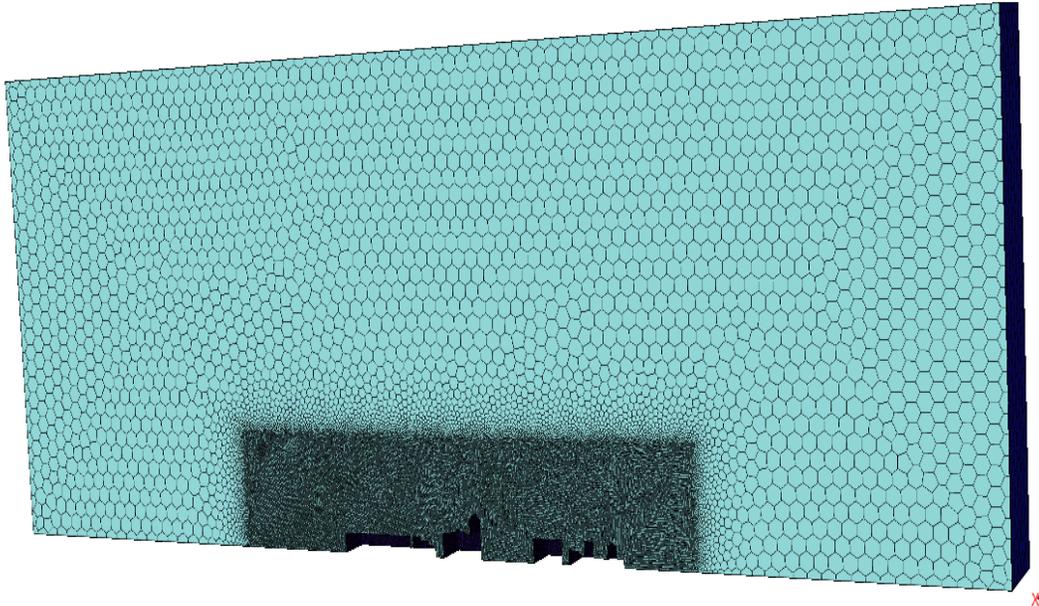
De otro lado, el tamaño del dominio de cálculo y la resolución deseada determinan el número de elementos de la malla, que está limitado por la capacidad de cálculo del ordenador o la estación de trabajo. La densidad de elementos o celdas puede cambiar entre regiones, por lo que se deberá acumular un mayor número de los elementos en las zonas donde se espera haya fuertes variaciones en las variables (fundamentalmente presión o velocidad). Así, se podrá capturar y simular correctamente la capa límite, tal que donde tengamos un mallado más refinado vamos a encontrar mejores resultados en la zona de estudio (Figura 8). Posteriormente, una vez generada la malla con la que se discretiza el dominio computacional, se procede a la resolución de las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido.

Las condiciones iniciales corresponden con el código de simulación, que requiere estas variables de entrada para iniciar con los cálculos. En el caso de un flujo estacionario no es necesario ingresar las condiciones iniciales, en casos especiales son recomendables estas condiciones para agilizar notablemente la convergencia. Respecto a las condiciones de contorno, es importante especificarlas

correctamente para obtener una buena resolución de las ecuaciones, debiendo adecuar las condiciones reales a las diferentes posibilidades existentes en el programa de CFD.

Figura 10

Malla Fina para la Modelación.

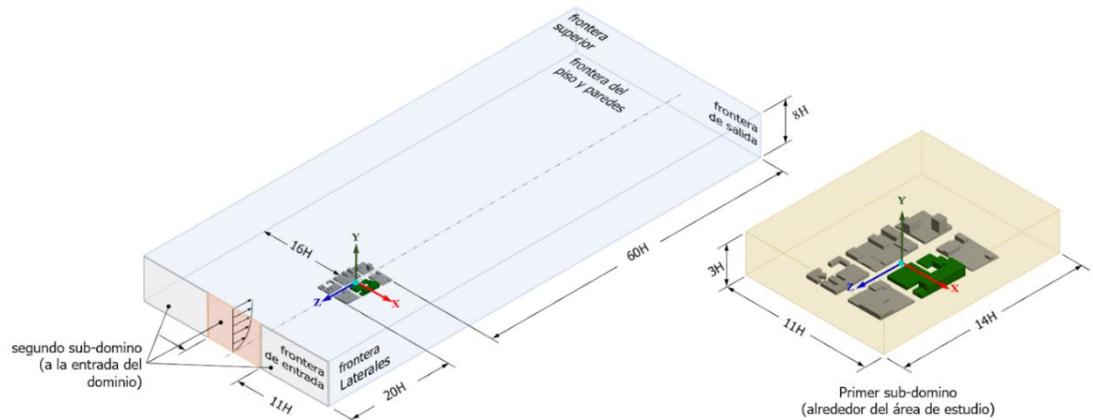


CFD dinámica de fluidos computacionales.

Para todas las simulaciones en CFD presentadas en esta investigación se creó un dominio computacional lo suficientemente amplio para que las fronteras no influyeran en la solución (ver Figura 11). La distancia aguas arriba, entre la frontera de entrada del dominio computacional y los edificios, se tomó igual a **20 H**, para limitar el desarrollo de los gradientes a la entrada. La distancia aguas abajo, entre los edificios y la frontera de salida del dominio computacional, se tomó igual a **60 H**. Las distancias laterales del dominio computacional se extendieron **16 H**, desde los edificios externos hacia las fronteras laterales del dominio computacional. La altura del dominio computacional se tomó igual a **8 H**, que corresponderá a la altura de capa límite del terreno. Las dimensiones finales del dominio computacional fueron $1144 \times 240 \times 2678$ [m] (X, Y, Z).

Figura 11

Dominio Computacional y Condiciones de Frontera.



CFD dominio computacional y condiciones de frontera.

En la completa definición de la simulación del flujo se implementaron las condiciones de frontera de Dirichlet en las superficies del dominio. Por lo tanto, en la frontera superior y las fronteras laterales del dominio se utilizó la condición de simetría, que hace una velocidad normal y un gradiente igual a cero en todas las variables sobre el plano de simetría. En la frontera de salida se usó una condición de *outflow*, que considera que el flujo es completamente desarrollado y las variables de interés no cambian en la dirección del flujo.

En piso y paredes de los edificios se implementó una condición de no deslizamiento, con funciones de pared para el tratamiento de la rugosidad. Por último, para la frontera de entrada del dominio computacional, se ajustaron en el solucionador funciones definidas por el usuario (*UDF* o *User Defined Functions*), que permitieron el ingreso de los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta en función de la altura del dominio.

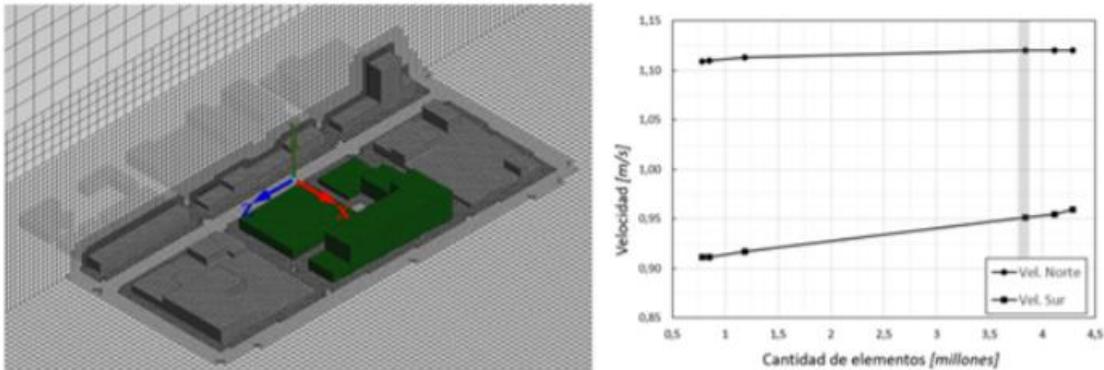
5.1.2 Resolución de las mallas

Con el propósito de definir variables de interés como perfiles de velocidades, concentraciones de contaminantes atmosféricos alrededor de los edificios, entre

otras, se trató de disponer de una buena calidad en la malla del dominio computacional, para lo cual el dominio fue discretizado utilizando el método cartesiano Cut-Cell. Este método de construcción de la malla permitió un mejor control de las relaciones de tamaño, de mallas muy finas cerca de las paredes de los edificios a mallas más gruesas en las áreas más alejadas de la zona de interés (ver Figura 12). Se puede observar que el tamaño de los elementos sobre las superficies del piso y las paredes de los edificios se definió para cumplir con el valor de $y^+ > 30$, en todas las densidades de malla.

Figura 12

Mallado del dominio computacional utilizando el método cartesiano.



Modelación CFD.

Para conocer si los resultados son confiables se realiza un procedimiento conocido como *independencia del mallado*, es decir, se calculan varias mallas con el fin de encontrar el número de celdas para el cual los resultados ya no cambian y, por tanto, encontrar su convergencia (Figura 13).

Para llevar a cabo este procedimiento se tienen en cuenta diferentes consideraciones, permitiendo así que el procedimiento del refinamiento del mallado sea el adecuado. Para esto se estima el error de discretización (Celik et al., 2008), teniendo en cuenta la ecuación (30).

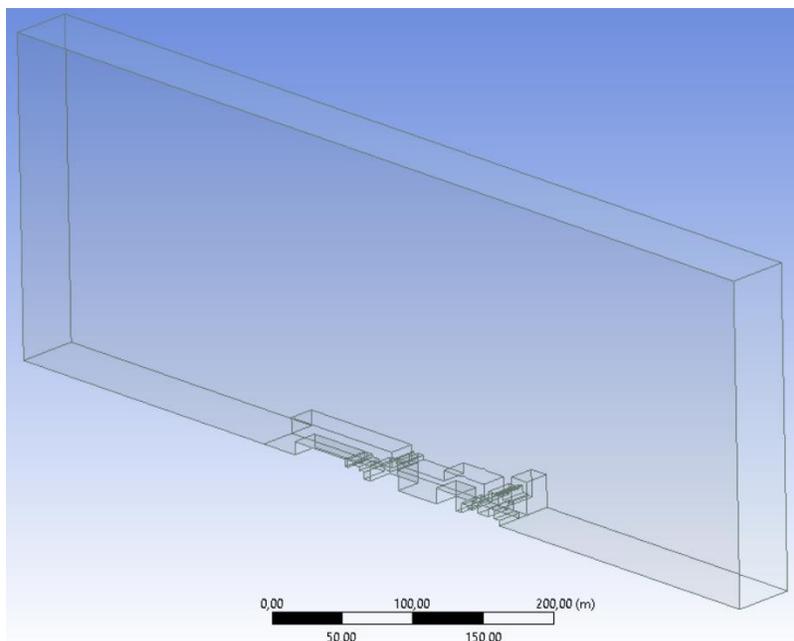
$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (30)$$

La anterior expresión se utiliza para tres dimensiones, y en ella h hace referencia al tamaño del elemento, N es el número de celdas de la malla y ΔV_i es el volumen total del dominio. Una vez se conoce h se debe tener en cuenta el *factor de refinamiento* r , el cual se detalla en la ecuación (31).

$$r = \frac{h_{burda}}{h_{fina}} > 1.3. \quad (31)$$

Figura 13

Cara frontal del sitio de estudio para la simulación.



Modelación CFD.

También se realizó un análisis de independencia de la malla para el dominio computacional. En este sentido, seis densidades de malla fueron generadas para garantizar la independencia de la malla de los resultados obtenidos alrededor de los edificios. También fueron tomadas las velocidades al norte y al sur en el subdominio, sobre el plano $Y - Z$. Con base en lo anterior, se encontró que las

velocidades no presentaron cambios significativos cuando se tiene alrededor de 3,8 millones de elementos en el dominio. Esta distribución proporciona un buen balance entre el costo computacional y la incertidumbre numérica.

5.1.3 Mallado

Gracias a las posibilidades que ofrece el FLUENT MESHING se realiza el mallado para la investigación. Por lo tanto, el primer paso fue el de realizar la importación de la geometría al FLUENT MESHING, para luego hacer un mallado local en la zona de interés utilizando el cuerpo de influencia creado anteriormente, e ingresar el tamaño de los elementos que conviene. Posteriormente, se genera el mallado superficial y se chequea uno de los criterios de calidad a tener en cuenta, que es la oblicuidad o el *skewness*, el cual se busca que no sea superior a 0.85.

En caso de ser necesario, se deberá utilizar la herramienta “*Improve Surface Mesh*” y luego describir la geometría del estudio. Posteriormente, se procede a determinar el tipo de fronteras deseadas según sea el estudio y los parámetros que se tienen (condiciones que se deben decidir previo al momento en el que se vaya a iniciar la simulación y según los parámetros que se conozcan y aquellos que el interesado desee conocer). Finalmente, se procede con el mallado del volumen y se chequea la calidad ortogonal, que entre más cercana a 1 indica que es una malla de alta calidad, pero en general se busca que sea superior a 0.2 (Wesseling, 2001). Tomando en cuenta lo planteado anteriormente, y partiendo de la primera malla (que cuenta con un total de 489878 celdas), se determina el mínimo número de celdas de la segunda.

$$h = \left[\frac{1}{489878} (8.499885 * 10^6) \right]^{\frac{1}{3}} = 2.588858843 \text{ m.} \quad (32)$$

Debido a este resultado, se determina el mínimo número de celdas que la siguiente malla. A continuación, en la Tabla 1 se muestran las mallas y su respectivo

número de celdas, que se determinaron siguiendo la regla anterior (Wesseling, 2001).

Tabla 4

Definición de información de entrada al modelo y configuración.

Resolución de la Malla	Dominio	Primer Subdominio	Segundo Subdominio	Piso	Paredes de Edificio	Calidad de Elementos
Malla 1 (burda)	32	8	6	8	1	1061032
Malla 2 (Media)	30	6	6	6	1	2818923
Malla 3 (Fina)	20	4	4	4	1	4069269

** Medidas en metros (m).*

5.2 Variables meteorológicas involucradas en la modelación

En la presente investigación se tienen en cuenta compuestos gaseosos que hacen parte de la contaminación del aire y de la combustión vehicular en relación con el nitrógeno (N). A continuación, como se ha indicado también para una zona como la de Carabobo en Medellín, que es impactada por alto tráfico vehicular y en la que se sabe que existe una atmósfera que contiene diferentes contaminantes, se tendrán como referentes monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (N₂O) y los definidos como óxidos de nitrógeno (NO_x).

5.2.1 Química de las especies NO, NO₂, NO_x

Los procesos químicos atmosféricos de NO, NO₂ y NO_x son algunos de los procesos químicos más importantes que se simulan en los modelos de dispersión. La química atmosférica de la conversión de NO a NO₂ es compleja e involucra múltiples reacciones químicas y fotolíticas, tal como lo describen Atkinson (2000) y

Seinfeld & Pandis (2012). Para los autores, la vía más común para la conversión de NO a NO₂ ocurre a través de la oxidación por ozono (O₃). Esta conversión se da con relativa rapidez y se supone a menudo que es instantánea, aunque la velocidad de reacción llega a ser del orden de decenas de segundos a pocos minutos, dependiendo de la cantidad de reactivos disponibles como es el caso de O₃ y compuestos orgánicos volátiles (COV), la energía solar y las condiciones meteorológicas ambientales. La formación de especies NO_γ (nitrógeno reactivo total) durante estas reacciones químicas atmosféricas incluye la oxidación de NO₂ a radical nitrato (NO₃·) y ácido nítrico (HNO₃), así como la foto descomposición de NO₂ nuevamente a NO (Atkinson, 2000; Liu *et al.*, 2018).

5.2.2 Importancia de la química y los datos de campo para los modelos de dispersión

Los modelos de dispersión son utilizados en muchas ocasiones para simular procesos químicos y atmosféricos del mundo real, como las características físicas de las fuentes de emisión, el transporte atmosférico, las reacciones fotoquímicas, la deposición y las interacciones meteorológicas, tal como ocurre con las concentraciones de NO₂ (Kimbrough *et al.*, 2017). En aplicaciones viales, estos modelos son usados para determinar los impactos de la fuente en escalas espaciales relativamente pequeñas desde la fuente hasta el receptor. Acá aplica lo propuesto por autores como (Harkonen *et al.*, 1996), quienes referencian el fenómeno de una autopista u otra arteria principal hasta vecindarios localizados a distancias de unos cientos de metros.

La estimación de la partición inicial de NO y NO₂, el NO_x total y el O₃ disponible es importante al modelar los impactos del escenario cercano al sitio de estudio, ya que los procesos de reacción química y atmosférica varían a lo largo del tiempo, incluso en un día (Wang *et al.*, 2011). El análisis de los datos de campo puede arrojar luz sobre las limitaciones de los modelos para el desarrollo de estrategias para modelar la conversión de NO a NO₂ con mayor precisión.

5.2.3 Modelos de Dispersión – Tratamiento de la conversión de NO a NO₂

Dado que el NO se convierte rápidamente en NO₂ en la atmósfera, los modelos de dispersión no pueden modelar directamente el NO, por lo que usan la suma de NO y NO₂ (NO_x) como un contaminante inerte para modelar y usan parametrizaciones de la química de NO_x para determinar la especiación entre NO y NO₂. Por lo tanto, la relación NO₂/NO_x, que es una expresión de la especiación entre NO y NO₂, puede usarse como un sustituto de la conversión de NO a NO₂ y la química que ocurre en la atmósfera. La implementación más simple de NO es la conversión a NO₂ como una conversión completa. Las opciones intermedias se basan en el comportamiento genérico de NO₂ y NO_x. Un ejemplo de ello lo expresa el AERMOD (American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model) (U.S. EPA, 2014), que utiliza una técnica de relación ambiental que calcula las relaciones NO₂/NO_x en función de una regresión de sexto orden de los datos ambientales de NO₂ y NO_x (Podrez, 2015). Utilizando este método, las relaciones NO₂/NO_x tienen un máximo de 0,9 a niveles más bajos de NO_x y un mínimo de 0,2 a niveles más altos de NO_x. Este método tiene en cuenta la proximidad a la fuente, así: las proporciones de NO₂/NO_x son más bajas cuando están cerca de la fuente en distancia y tiempo (es decir, emisiones frescas), mientras que las proporciones de NO₂/NO_x son más perceptibles para individuos con edades avanzadas. Sin embargo, no todos los modelos de dispersión replican el proceso de conversión de NO a NO₂ de la misma manera, y algunos modelos como AERMOD tienen opciones adicionales para modelar la conversión de NO a NO₂ con mayor complejidad. AERMOD emplea técnicas avanzadas como el Método de Limitación de Ozono (OLM), el Método de la relación molar del volumen de la pluma (PVMRM), estudiado por (Hanrahan, 1999), en los que se debe tener en cuenta la especiación inicial de NO y NO₂, la concentración de NO y el O₃ disponible.

La dilución física está controlada por una serie de factores que afectan la turbulencia local y que incluyen en los modelos de dispersión, la velocidad del viento, la altura de mezcla y la turbulencia. Las fluctuaciones del viento (por ejemplo, velocidad de fricción, u^*). Las transformaciones químicas que se incluyen en la mayoría de los modelos de dispersión se centran en la reacción entre O_3 y NO (Hanrahan, 1999; Harkonen *et al.*, 1996) En ellos, las simulaciones están controladas por la disponibilidad de NO y O_3 , la temperatura, la luz solar disponible y el tiempo de reacción para que ocurran las transformaciones químicas. Dados estos importantes parámetros físicos y químicos que se consideran en los regímenes de modelado, el presente análisis se centró en considerar las relaciones entre los parámetros medidos, velocidad del viento y concentración de O_3 y los parámetros estimados con las relaciones NO_2/NO_x en cada sitio y los cambios en sus relaciones a lo largo de los sitios de medición y a favor del viento.

5.3 Datos iniciales de simulación

Para llevar a cabo la presente modelación se empleó la base datos entregada por el SIATA (Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá), que comprende información relacionada con velocidad, concentración de NO, NO_x . y temperatura.

5.3.1 Resolución de mallas

Tal como se indicó en el apartado 5.2, para la resolución de la malla se definió que las dimensiones finales del dominio computacional fueron $1144 \times 240 \times 2678$ [m] (X, Y, Z), y el conjunto de los edificios en los que la dispersión de contaminantes es de gran interés requirió la construcción de un primer subdominio que lo rodea dentro de dicha área de estudio. Este subdominio permitió obtener una mayor precisión en la solución final, para la cual las dimensiones del subdominio computacional fueron $11 H \times 3 H \times 14 H$ (X, Y, Z).

Adicionalmente, se creó un segundo subdominio (ver Figura 12) sobre la superficie de la entrada del dominio computacional, en el que se ingresaron las especies químicas de los contaminantes del aire (NO_2 y NO , objeto del estudio), debido a que son parte de los precursores más importantes generados por el parque automotor, con alto impacto en la zona de estudio y con serias repercusiones sobre la salud de la población expuesta. Este segundo subdominio fue dividido en tres partes: una inicial, localizada en la zona central, en la que se ingresaron las especies de los contaminantes atmosféricos del aire usando fuentes volumétricas; seguida de otras dos que estuvieron localizadas en los laterales, por lo que estas no se tuvieron en cuenta como fuentes. Lo anterior hace más controlable el área de estudio. De otro lado, la zona central contó con un ancho de 11 H, una profundidad de 6H en la dirección z , y a la misma altura del dominio computacional de 8 H.

Tabla 5

Condiciones de parámetros.

CONDICIONES DE PARAMETROS		
VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Velocidad	0.04750	[m/s]
Densidad	1.225	[Kg/m ³]
A	210^{-12}	[-]
k	$1.8(10^{-14})$	
Temperatura	293	[K]
E	1400	
Turbulencia del Modelo	K-Épsilon	[-]
Solución	Pressure-Based	[-]
Metodo3	2 orden	[-]

Como se indicó en la metodología, en la simulación del flujo se implementaron condiciones de frontera de Dirichlet en las superficies del dominio. Por lo tanto, para la frontera superior y las fronteras laterales de dicho dominio se utilizó la condición de simetría, que hace que se tenga una velocidad normal y un

gradiente igual a cero en todas las variables sobre el plano de simetría (que es una de las condiciones propias del software CFD).

Tabla 6

Parámetros.

hora	T [K]	k [cm ³ molecu ⁻¹ s ⁻¹]	k [m ³ mol ⁻¹ s ⁻¹]	k [ppb ⁻¹ s ⁻¹]
6 a 8	288.5	1.5615E-14	9.40320E+03	3.1344E+00
12 a 14	300	1.8807E-14	1.13257E+04	3.7752E+00
18 a 20	297	1.7941E-14	1.08042E+04	3.6014E+00

$$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt. \quad (33)$$



Tabla 7

Parámetros de tiempo por ppb.

t (s)	ppb(NO) (Remanente)
0	30
0,25	3,8285E+01
0,5	2,4429E+01
0,75	1,0392E+01
1	3,3154E+00
1,25	8,4619E-01

A = Termino probabilidad de colisiones de dos moléculas.

k = Constante de BOLTZMANN.

κ = Constante de velocidad.

E = Energía de activación.

Figura 14

Particular por Billón de NO vs Tiempo.

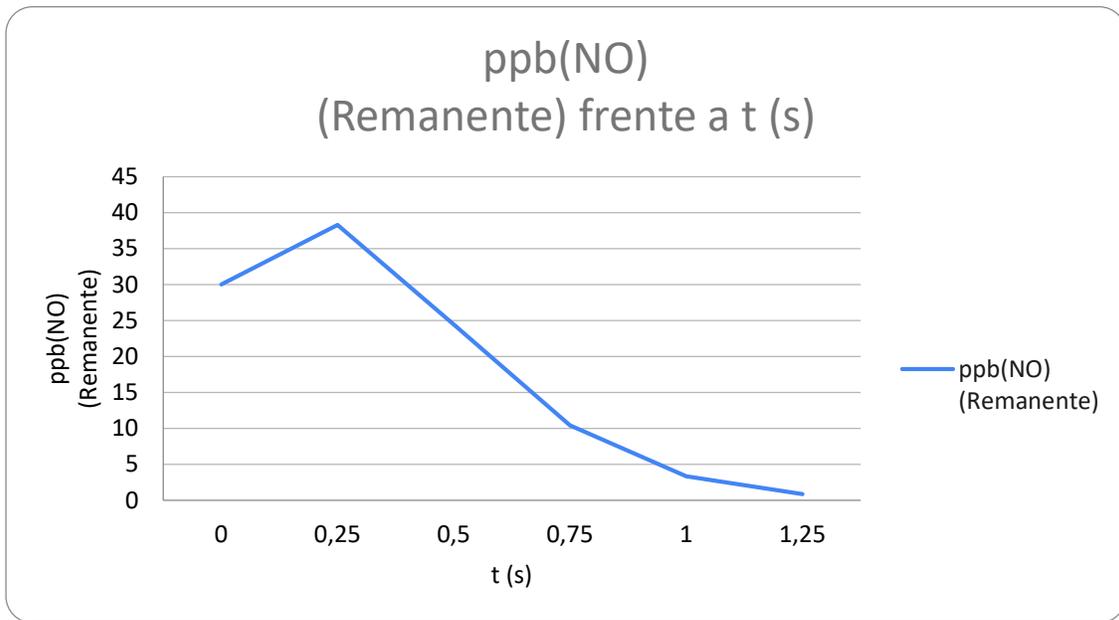
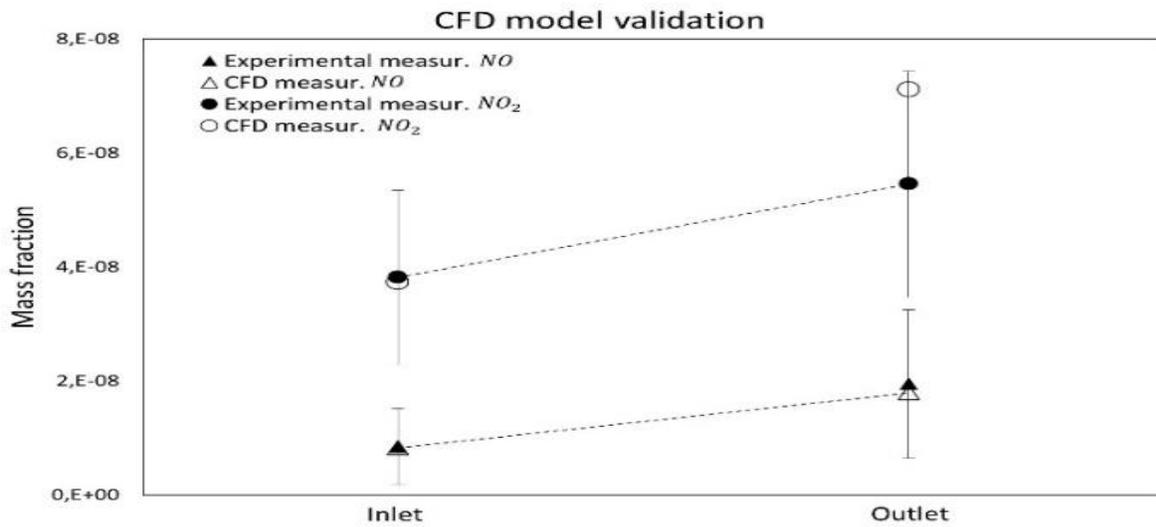


Figura 15

Validación del Modelo CFD.



Igualmente, para la frontera de salida se usó una condición de outflow 0.041 m/s ; condición que permitió considerar que el flujo es completamente desarrollado y las variables de interés no cambiaron en su dirección. Para el piso y las paredes de los edificios se usó la condición de no deslizamiento (es decir, estos se definen como puntos fijos), con funciones de pared para el tratamiento de la rugosidad. Por último, para la frontera de entrada del dominio computacional se empleó un solucionador de funciones definidas por el usuario UDF (de sus siglas en inglés *User Defined Functions*) para ingresar los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta en función de la altura del dominio.

Con base en lo anterior, fue de suma importancia contar con una herramienta de simulación de fluidos newtonianos, con la cual se logró predecir bajo escenarios controlados las variables meteorológicas identificadas en zonas de mayor contaminación y, así, entender el comportamiento de la atmósfera del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, especialmente en la zona de estudio, y aportar con ello a la gestión de los procesos y del control de la calidad del aire en beneficio de la población acá asentada.

El Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburra (SIATA) proporciona estimaciones por hora de una gran cantidad de variables climáticas atmosféricas terrestres. Desde hace 11 años, en el 2010, de manera continua las 24 horas de los 7 días de la semana, monitorea en tiempo real las condiciones ambientales de la región metropolitana, periodo en el que se ha afianzado como una plataforma científica para la prevención de emergencias naturales y la toma de decisiones públicas, así como en un instrumento para consultar el pronóstico del clima por parte de los antioqueños. Las variables meteorológicas utilizadas en simulación fueron organizadas a partir de datos horarios ajustados de la base de información entregada por el SIATA para el año 2018.

La concentración de contaminación se produce en la pared orientada en el costado opuesto en las direcciones perpendiculares del viento. Sin embargo, la

diferencia en los niveles de concentración entre ambos lados de los cañones de la calle no se mantiene en caso de vientos paralelos ($\Theta = 0^\circ$). Con respecto a la dispersión de contaminantes a lo largo del cañón y lateral, un estudio de túnel de viento de (Gromke & Ruck, 2012) y un estudio de CFD de (Ding *et al.*, 2019) mostraron que para los vientos perpendiculares (dispersión lateral), se encontró una disminución en los niveles de contaminantes cerca de los extremos del muro, mientras que para los vientos perpendiculares y paralelos (dispersión a lo largo del cañón) los niveles de contaminantes aumentaron hacia el final del cañón de la calle a favor del viento. El final del cañón de la calle en caso de vientos paralelos se encontró en un estudio de campo realizado por Niu *et al.* (2018). Es importante destacar que estos hallazgos no son válidos para todas las situaciones. En algunos casos los niveles de concentración en caso de vientos paralelos (debido a la advección media a lo largo de su eje) o vientos transversales (debido a configuraciones urbanas complejas o la presencia de árboles) pueden superar los niveles de contaminación en comparación con los vientos trasversales, y un estudio de campo temprano de (Johnson & Hunter, 1995) también mostró que pequeñas variaciones de la dirección del viento pueden cambiar significativamente las propiedades del flujo dentro del cañón y la dirección del viento dentro del cañón. Puede cambiar rápidamente de 120 a 180° . (Zajic *et al.*, 2011), encontraron movimientos de flujo típicos a lo largo del cañón, incluso para las direcciones del viento trasversales a los cañones de las calles.

En cuanto al urbanismo, se puede concluir que los cañones callejeros se orientan preferiblemente en paralelo a la dirección del viento predominante, siempre que su longitud se mantenga limitada, sin embargo, la orientación de un cañón de la calle no es ajustable en un tejido urbano existente. Aun así, el conocimiento sobre la orientación del cañón de la calle ayuda a comprender los potenciales de los cañones de las calles con una orientación paralela a la dirección del viento predominante, ya que tienen la capacidad de suministrar aire fresco a las profundidades del tejido urbano cuando los obstáculos son limitados.

Se han realizado numerosos estudios sobre la relación entre la altura del edificio y el ancho de la calle (relación H/W), también conocido como la relación de aspecto (AR), y el impacto en el campo de flujo y dispersión de la contaminación. Las primeras investigaciones de (Hussain & Lee, 1980) brindan información fundamental sobre el desarrollo de tres regímenes de flujo típicos y sus valores de AR umbral para los cañones de las calles, sujeto a la condición de límite de los flujos de aproximación perpendiculares: (1) aparece un flujo de rugosidad aislado (IRF) cuando los edificios tienen una distancia entre ellos ($AR < 0.35$); (2) un flujo de interferencia de estela (WIF) (donde las velocidades del viento se reducen nuevamente) surge cuando $0.35 < AR < 0.65$; y (3) aparece un flujo de aumento de la velocidad (SF) cuando $AR > 0.65$.

En el trabajo se evidenció la presencia de remolinos (zonas de recirculación) cerca de las esquinas de la fachada de costado opuesto del cañón de la calle, cambiando los regímenes de flujo. En este caso, solo ocurrió para cañones lo suficientemente anchos para las zonas de recirculación de las esquinas. Por lo tanto, en el estudio se observó que factores adicionales a la geometría relativa del cañón son relevantes para determinar el flujo. Es importante puntualizar que el desarrollo de la cantidad de contaminantes específica está estrechamente relacionado con la turbulencia del flujo entrante.

La mayoría de los estudios simplemente representan una abstracción de la realidad. Se deben tener en cuenta numerosos factores de impacto, como la turbulencia del viento (Caton *et al.*, 2003) la contaminación y la intensidad de la fuente de contaminación. Además, se pueden mostrar concentraciones de contaminación más bajas en cañones de calles estrechas en comparación con cañones de calles anchas, probablemente relacionadas con la menor cantidad de tráfico en los cañones de calles estrechas. Zajic *et al.* (2011), indica que también puede ser difícil encontrar un caso en el que existan estos flujos de vórtices simples, ya que el campo de flujo probablemente será una combinación compleja de vórtices 2D y 3D y flujo canalizado. También se mostró que no se pudo encontrar evidencia

de la existencia de un vórtice escalonado en caso de vientos perpendiculares. Una vez que se forma un vórtice secundario, los niveles de contaminación son menores y el nivel de contaminación más alto se traslada a la fachada de donde viene el viento respecto a un punto o lugar determinado, en lugar de la fachada de donde el viento se dirige, y es muy importante tener en cuenta que la contaminación es directamente proporcional a la velocidad del viento.

Hay investigaciones que estudian el impacto de los dispositivos de variaciones de viento, y concluyeron que los dispositivos de viento tienen el potencial de destruir patrones de flujo de múltiples vórtices, producir estructuras de un solo vórtice y, por lo tanto, mejorar la capacidad de ventilación de la calle, lo que podría conducir a una reducción significativa de contaminantes. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la formación real de vórtices en los profundos cañones de las calles sigue siendo en gran medida impredecible. La longitud del cañón de la calle, como describe Lassig (2012), introdujo la importancia de la longitud del cañón de la calle, pues influye en la aparición de diferentes regímenes de flujo.

En caso de vientos paralelos, los cañones largos de las calles pueden operar como vías aéreas, aportando aire fresco al tejido urbano. Un estudio de (Chen *et al.*, 2020) muestra que la velocidad máxima del viento en un cañón de la calle bajo condiciones de viento paralelo sufre un aumento brusco y luego se nivela. Esto indica que, en cañones de calles largas, es más probable que la velocidad del viento disminuya, lo que resultará en la acumulación de contaminantes al final del cañón de la calle. En cuanto al diseño urbano, se observó que en la calle larga los cañones están preferiblemente orientados en paralelo a la dirección del viento dominante. (Wang *et al.*, 2017) . Sin embargo, canalizados los vientos pueden ser fuertes y resultan en un ambiente desagradable para el peatón.

Los efectos mencionados anteriormente solo tienen lugar en el caso de modelos simples. Una vez que aumenta la complejidad del modelo, campos de viento más complejos ocurren y las irregularidades en la dispersión de

contaminantes son notables. Las longitudes de los cañones de las calles pueden limitarse mediante la introducción de intersecciones y aumento de la permeabilidad (absorción) del edificio. Un estudio de CFD más complejo realizado por (Jiao et al., 2019) mostró reducciones de hasta el 25% del promedio normal de concentración en la calle media cuando la absorción global de la calle se incrementó en $\approx 30\%$. Otro modelo complejo de CFD de (An et al., 2020) ilustra que la introducción de construcción de la separación en medio de un cañón de la calle podría localmente disminuir los niveles de contaminación del aire en un 80%. A pesar de los resultados prometedores, no se realizaron estudios de campo sobre este tema. Aún más, ninguno de estos estudios consideró el impacto de las intersecciones en el flujo de tráfico y las congestiones. Por lo tanto, las conclusiones deben considerarse cuidadosamente.

5.3.2 Variación de la altura del edificio

En general, se supone que los cambios en la altura del edificio tienen el potencial para mejorar o reducir la ventilación en los cañones de las calles. En la mayoría de estudios, el cambio en la altura del edificio se expresa por la relación entre la altura del edificio contra el viento (H_u) y la altura del edificio a favor del viento (H_d), también llamada relación de altura del edificio (Zajic et al., 2011). Los cañones de la calle generalmente se denominan cañones de la calle escalonada cuando $BHR > 1$ (el edificio contra el viento es más alto que el edificio a favor del viento), y los cañones escalonados cuando $BHR < 1$ (el edificio contra el viento es más bajo que el edificio a favor del viento). Basado en múltiples estudios (Garcia Sagrado et al., 2002) se puede suponer que en la mayoría de los casos los niveles de contaminación tienden a ser más altos en los cañones escalonados en comparación con los cañones escalonados de las calles.

Los niveles más bajos de contaminantes en los cañones de las calles escalonadas se pueden explicar por el llamado efecto "downwash". Este fenómeno es causado por el bloqueo de flujo frente al edificio más alto a favor del viento, lo

que mejora la fuerza de la corriente descendente cerca de la fachada de donde sopla el viento del edificio a favor del viento, lo que da como resultado un flujo desviado en la parte inferior del cañón de la calle (Chen *et al.*, 2020). Estos flujos desviados mejoran la dilución de contaminantes en la fachada y, debido a la baja altura del edificio, los contaminantes se transportan rápidamente al nivel del techo y luego se diluyen por el viento (García Sagrado *et al.*, 2002). Para la mayoría de los casos idealizados con vientos perpendiculares, se supone que se crea un efecto de corriente descendente.

En conclusión, estos resultados destacan la efectividad de las iniciativas de tener zonas de contaminación cero, para reducir la concentración de contaminantes en las grandes ciudades. Además, aunque los efectos sobre los niveles de contaminantes en áreas donde se establece una zona de contaminación cero son bastante sólidos en la literatura, hay menos evidencia sobre los posibles efectos de espacios distintos asociados con tales políticas. Por tanto, este trabajo contribuye a la literatura al proporcionar evidencia sobre posibles efectos secundarios. Además, dado que los efectos de los parámetros meteorológicos sobre las concentraciones a menudo enmascaran los efectos más sutiles de una LEZ (Holman *et al.*, 2015), un trabajo como este, que separa la influencia de diferentes tipos de variables, posee la gran ventaja de que permite controlar estos efectos.

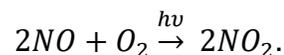
6. RESULTADOS

Debido a la creciente preocupación por la contaminación del aire y los costos que impone a la economía y la salud de las personas, las políticas para reducir la contaminación del aire son cada vez más comunes. Muchas áreas urbanas están tratando de disminuir los impactos en la calidad del aire reduciendo niveles de tráfico y la implementación de zonas de bajas emisiones, con diferentes niveles de restricciones a los vehículos contaminantes.

No es sorprendente que los niveles de NO₂ sean más bajos durante los días de fin de semana o festivos, especialmente durante los domingos, debido a que la cantidad de automóviles se reducen en un 80%. Finalmente, los niveles de emisión de NO₂ medidos son más altos en las estaciones urbanas (y especialmente en las estaciones de tráfico), y más bajos en las estaciones suburbanas en relación con las estaciones de monitoreo industrial, la categoría de referencia.

En el intervalo de temperatura diaria que se tiene en la zona de estudio, la alta presión, las bajas precipitaciones y los vientos fuertes no se asocian con situaciones de estabilidad. Se considera que la estabilidad consiste en vientos ligeros que minimizan la dispersión horizontal. En el estudio tenemos vientos fuertes que desplazan los contaminantes hacia final de la zona de estudio.

Sin embargo, los niveles bajos de precipitación, y el mayor tráfico asociado, podrían elevar las concentraciones de NO₂, y la precipitación en sí misma no es suficiente para limpiar la atmósfera. La reacción de oxidación del monóxido de nitrógeno en la atmósfera, mediada por radiación UV,



pueden entenderse como el proceso en dos etapas:

- 1) $O_2 \xrightarrow{hv} 2O^*$.
- 2) $NO + O^* \rightarrow NO_2$.

Para que esta reacción se realice en la atmósfera, un fotón UV ($h\nu$) proveniente del sol que logra atravesar la capa de ozono debe impactar una molécula de O₂, proceso que depende de la concentración de O₂ en el aire.

Una vez formada cada especie O*, la cual es muy reactiva, debe colisionar con la molécula de NO con la energía de activación suficiente para formar el NO₂.

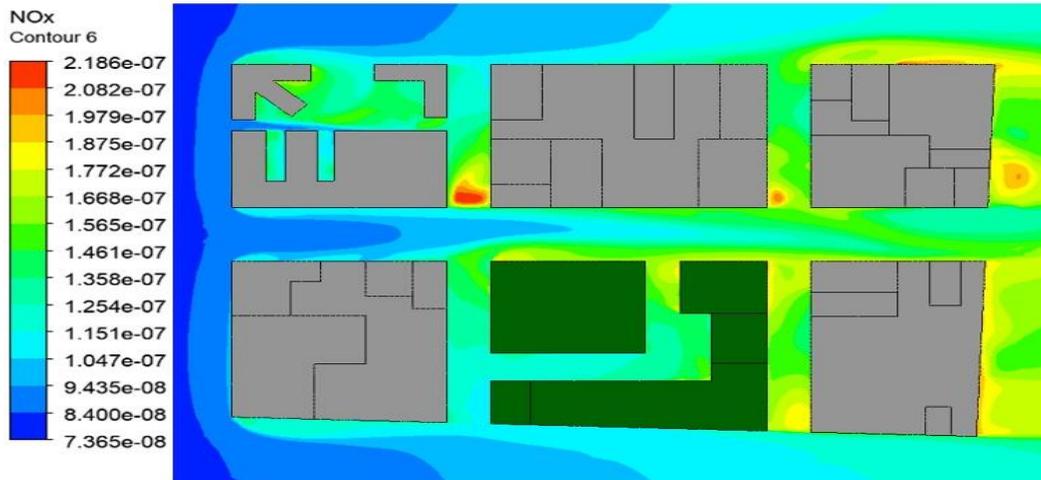
Ambos procesos dependen de eventos con poca probabilidad de ocurrencia dadas las condiciones: en el primer caso la reacción depende de que un fotón atraviese la capa de ozono, y coincida con una molécula de O_2 ; mientras que, en el segundo caso, las moléculas NO y O^* colisionen (coincidan en tiempo y lugar) en medio de la fase gaseosa. Lo anterior, sin considerar efectos como las corrientes, el material particulado, o la presencia de otras moléculas.

Por todo lo anterior, a menos de que las concentraciones de O_2 y NO sean muy altas, además de que la intensidad de radiación sea muy alta, la eficiencia de esta reacción será muy baja.

Si bien la concentración anual de NO_2 se mantiene básicamente inalterada en Medellín durante los últimos 8 años, las mediciones arrojan valores de concentración de NO_2 cercanos a los valores críticos reportados en la literatura y debido al complejo fenómeno asociado a la dispersión de NO_x , actualmente se espera tener áreas en la zona urbana de Medellín con concentraciones de NO_2 nocivas para la salud. Este artículo aborda este problema seleccionando un área de estudio para considerar intervenciones urbanas recientes realizadas por la Universidad de Antioquia que incluyen nuevas áreas peatonales en el contexto de dispersión de NO_x . Los resultados numéricos presentados en este documento permitieron la identificación de áreas de baja velocidad del viento con un aumento de la concentración de NO_x , se espera que esas áreas cambien a uso exclusivo para peatones en un futuro cercano. Finalmente, aunque CFD es una herramienta poderosa para estudiar la dispersión de NO_x en áreas urbanas y los resultados presentados en este documento se basan únicamente en resultados numéricos utilizando datos recopilados de SIATA, existen varias limitaciones en el modelado de factores locales que probablemente afectan los resultados numéricos. La calibración del modelo es importante para validar los resultados de la simulación. Por lo tanto, se recomienda realizar investigaciones in situ para validar los desarrollos de intervención urbana durante la fase de diseño (Figura 16).

Figura 16

Contorno de NOx.



Modelación CFD.

7. CONCLUSIONES

Los resultados presentados aquí sugieren que la relación ambiental NO_2/NO_x , inmediatamente a favor del viento de las fuentes de la calzada, no es una función enteramente de las emisiones de la calzada. En cambio, incluso a los 20 m desde el borde de la carretera la relación es una función de:

- 1) las emisiones en el sitio de estudio (es decir, la relación NO_2/NO_x emitida).
- 2) la conversión en el sitio y en transporte de NO a NO_2 .
- 3) la mezcla de emisiones con aire de fondo, con 2 y 3 en curso, y compitiendo procesos que impulsan las concentraciones de NO_2 en diferentes direcciones.

La conversión de NO a NO_2 y la mezcla de emisiones con el aire de fondo pueden afectar los cambios en la línea base de NO_2 y NO_x y la relación resultante. Por lo tanto, una sola suposición acerca de la química del NO_2 no puede dar cuenta de todos estos procesos. Estos resultados resaltan la utilidad de los datos de

gradiente de larga duración para evaluar el comportamiento de las proporciones de NO_2/NO_x para informar las estrategias de modelado de la calidad del aire en el entorno cercano al sitio de estudio. Estos resultados también respaldan la necesidad de futuras mejoras a los existentes, para incorporar la relación NO_2/NO_x de fondo ambiental, la relación NO_2/NO_x de las emisiones y la concentración de O_3 en un único esquema químico de NO_x dentro de un modelo de dispersión.

Por ejemplo, un aumento en el precio de la gasolina o crecimiento en el precio de los carros, probablemente tenga sus efectos más sustanciales en el centro de la ciudad de Medellín, donde un mejor transporte público y las densidades más altas hacen que caminar, andar en bicicleta y el transporte público sean relativamente más atractivos, lo que reduce el tráfico relativamente más que en otras áreas. Además, podríamos esperar que una recesión, como la que estamos viviendo ahora, con la pandemia, tenga efectos espaciales distintos, con la conducción (y por lo tanto la contaminación local) disminuyendo cada día más, en zonas de la ciudad donde es más fácil sustituir los carros por otros medios de transporte. Sin embargo, este no fue el caso, ya que la capacidad adquisitiva de los habitantes de la ciudad de Medellín aumentó, esto podría haber resultado en niveles más altos de contaminantes asociados con el tráfico.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2002). *Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá.*: Reporte Interno. Medellín.

An, K., Wong, S. M., Fung, J. C. H., & Ng, E. (2020). Revisit of prevailing practice guidelines and investigation of topographical treatment techniques in CFD-Based air ventilation assessments. *Building and Environment*, 169, 106580. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106580>.

Arellano, S. G., & Corona, A. H. L. (2019). La forma urbana actual de las zonas metropolitanas en México: indicadores y dimensiones morfológicas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 11–42. <https://doi.org/10.24201/EDU.V34I1.1799>.

Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment*, 34(12–14), 2063–2101. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00460-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4)

Azevedo Salomao E. M. (2003) La vivienda en la morfología urbana del centro histórico de Morelia. *Script Nova*, VII, (146). [https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-146\(071\).htm](https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-146(071).htm)

Bellet, C. (2003). Capel, Horacio: El estudio de la morfología de las ciudades. I. Sociedad, cultura y paisaje urbano. Barcelona, Ediciones del Serbal, 2002, 544 p. *Revista de Geografía; Núm.: 2*. <https://repositori.udl.cat/handle/10459.1/43729>

Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31, 183–212. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.02.016>

Bosselmann, Peter. (2008). *Urban transformation : understanding city design and form*. 310.

Brønnum-Hansen, H., Bender, A. M., Andersen, Z. J., Sørensen, J., Bønløkke, J. H., Boshuizen, H., Becker, T., Diderichsen, F., & Loft, S. (2018). Assessment of impact of traffic-related air pollution on morbidity and mortality in Copenhagen Municipality and the health gain of reduced exposure. *Environment International*, 121, 973–980. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.09.050>

Bustos Salas, C. (2004) *Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental. Análisis del proceso* [Tesis]. Universidad de Chile. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/aplicacion-de-modelos-de-dispersion-atmosferica-en-la-evaluacion-de-impacto-ambiental-analisis-del-proceso>

Caton, F., Britter, R. E., & Dalziel, S. (2003). Dispersion mechanisms in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 37 (5), 693–702. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00830-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00830-0)

Castelli, M., Clemente, F. M., Popovič, A., Silva, S., & Vanneschi, L. (2020). A Machine Learning Approach to Predict Air Quality in California. *Complexity*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8049504>

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., & Raad, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 130(7), 0780011–0780014. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>

Chen, G., Li, H., Wang, G., Guo, Z., Zhang, S., Dai, Q., Wang, X., Zhang, G., & Shi, Q. (2018). Effects of pin thread on the in-process material flow behavior during friction stir welding: A computational fluid

dynamics study. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 124, 12–21.

<https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2017.09.002>

Chen, G., Wang, D., Wang, Q., Li, Y., Wang, X., Hang, J., Gao, P., Ou, C., & Wang, K. (2020). Scaled outdoor experimental studies of urban thermal environment in street canyon models with various aspect ratios and thermal storage. *Science of The Total Environment*, 726, 138147.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138147>

De Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99-109.

Dinámica de Fluidos Computacional: ¿qué es? (2016, 24 de junio) ESSS.
<https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

Ding, S., Huang, Y., Cui, P., Wu, J., Li, M., & Liu, D. (2019). Impact of viaduct on flow reversion and pollutant dispersion in 2D urban street canyon with different roof shapes - Numerical simulation and wind tunnel experiment. *Science of The Total Environment*, 671, 976–991.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.391>

Duan, H., Zhou, S., Jiang, K., Bertram, C., Harmsen, M., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Wang, S., Fujimori, S., Tavoni, M., Ming, X., Keramidas, K., Iyer, G., & Edmonds, J. (2021). Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit. *Science*, 372(6540), 378–385.

https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABA8767/SUPPL_FILE/ABA8767_DUAN_SM.PDF

Fernandes, L., Friedrich, M., Cóstola, D., Matsumoto, E., Labaki, L., & Wellershoff, F. (2020). Evaluación de los coeficientes de descarga de grandes ventanas que se pueden abrir utilizando muestras a escala real en ensayos en túneles de viento. *Revista Ingeniería de Construcción*, 35(2), 203–214. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000200203>.

Fu, J. Y., Wu, J. R., Xu, A., Li, Q. S., & Xiao, Y. Q. (2012). Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower. *Engineering Structures*, 35, 120–139. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2011.10.022>

García Meza, M. R. (2009). Aplicación de una técnica de modelación inversa para la validación del inventario de emisiones de la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología*, 57–79. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>

García Sagrado, A. P., van Beeck, J., Rambaud, P., & Olivari, D. (2002). Numerical and experimental modelling of pollutant dispersion in a street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90 (4–5), 321–339. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00215-X)

Geng, F., Gui, C., Teng, H., Tang, J., Niu, H., Zhou, F., Liu, C., Hu, S., & Li, S. (2020). Dispersion characteristics of dust pollutant in a typical coal roadway under an auxiliary ventilation system. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122889. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122889>

Gómez Peláez, L. M., Santos, J. M., de Almeida Albuquerque, T. T., Reis, N. C., Andreão, W. L., & de Fátima Andrade, M. (2020). Air quality status and trends over large cities in South America. *Environmental Science & Policy*, 114, 422–435. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2020.09.009>

Gromke, C., & Ruck, B. (2012). Pollutant Concentrations in Street Canyons of Different Aspect Ratio with Avenues of Trees for Various Wind Directions. *Boundary-Layer Meteorology*, 144 (1), 41–64. <https://doi.org/10.1007/S10546-012-9703-Z/METRICS>

Hanrahan, P. L. (1999). The Plume Volume Molar Ratio Method for Determining NO₂/NO_x Ratios in Modeling-Part I: Methodology. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 49(11), 1324–1331. <https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463960>.

Hollman, J., Khan, M. F., Dominic, J. A., & Achari, G. (2020). Pilot-scale treatment of neutral pharmaceuticals in municipal wastewater using reverse osmosis and ozonation. *Journal of Environmental Engineering*, 146(11), 04020121.

Hussain, M., & Lee, B. E. (1980). A wind tunnel study of the mean pressure forces acting on large groups of low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 6 (3–4), 207–225. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(80\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(80)90002-1).

Ionosfera (2019, 28 de junio) *SpacePlace Nasa Ciencia*. <https://spaceplace.nasa.gov/ionosphere/sp/>

- Jia, B., Liu, S., & Ng, M. (2021). Air Quality and Key Variables in High-Density Housing. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 4281, 13(8), 4281. <https://doi.org/10.3390/SU13084281>.
- Jiao, Z., Yuan, S., Ji, C., Mannan, M. S., & Wang, Q. (2019). Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 60, 195–202. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2019.05.002>
- Johnson, G. T., & Hunter, L. J. (1995). A numerical study of dispersion of passive scalars in city canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 75 (3), 235–262. <https://doi.org/10.1007/BF00712696/METRICS>
- Junk, W. M. (2015). Two logics of NGO advocacy: understanding inside and outside lobbying on EU environmental policies. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/13501763.2015.1041416*, 23(2), 236–254. <https://doi.org/10.1080/13501763.2015.1041416>
- Kilroy, Austin Francis Louis, Mukim, Megha & Negri, Stefano (2015). Ciudades competitivas para empleos y crecimiento: qué, quién y, cómo. Competitive cities for jobs and growth Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/691841467992491102/Ciudades-competitivas-para-empleos-y-crecimiento-qué-quién-y-cómo>.
- Kimbrough, S., Chris Owen, R., Snyder, M., & Richmond-Bryant, J. (2017). NO to NO2 Conversion Rate Analysis and Implications for Dispersion Model Chemistry Methods using Las Vegas, Nevada Near-Road Field Measurements. *Atmospheric Environment* (Oxford, England: 1994), 165, 23. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2017.06.027>

Krzyzanowski, M., Apte, J. S., Bonjour, S. P., Brauer, M., Cohen, A. J., & Prüss-Ustun, A. M. (2014). Air Pollution in the Mega-cities. *Current Environmental Health Reports*, 1(3), 185–191.
<https://doi.org/10.1007/S40572-014-0019-7>

La atmósfera y sus capas (s.f.) *Generalitat Valenciana*.
<https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-atmosfera-y-sus-capas>

Lassig, J. (2012). Ventilación de un cañon urbano. II Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento. La Plata, Argentina.
<http://www.aero.inq.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas%20congreso/13.Lassig.CLIV2.pdf>

Lauriks, T., Longo, R., Baetens, D., Derudi, M., Parente, A., Bellemans, A., van Beeck, J., & Denys, S. (2021). Application of Improved CFD Modeling for Prediction and Mitigation of Traffic-Related Air Pollution Hotspots in a Realistic Urban Street. *Atmospheric Environment*, 246, 118127.
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2020.118127>

Liu, L., Yang, X., Wang, M., Long, Y., Shen, H., Nie, Y., Chen, L., Guo, H., Jia, F., Nelson, J., Song, G., Frank, A., Welles, S., & Haas, C. N. (2018). Climate change, air quality and urban health: Evidence from urban air quality surveillance system in 161 cities of China 2014. *10th International Conference on Environmental Pollution and Public Health, EPPH 2018*, 117–130.
<https://doi.org/10.4236/GEP.2018.63011>

Lozano-Gracia, N., & Soppelsa, M. E. (2019). Pollution and City Competitiveness. *Pollution and City Competitiveness: A Descriptive Analysis*. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-8740>

Martínez Gaete, C. (2016, 23 de julio) Informe Mundial de las Ciudades 2016: cómo ha sido la urbanización en los últimos 20 años. *Arch Daily*. <https://www.archdaily.co/co/791814/informe-mundial-de-las-ciudades-2016-como-ha-sido-la-urbanizacion-en-los-ultimos-20-anos>

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K., & Caud, N. (2021). Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Molina Jiménez, P. (2014). Simulación numérica de un problema de contaminación atmosférica. <https://doi.org/10.20868/UPM.THESIS.30472>

Sgroi, A. (2009). MORFOLOGÍA URBANA - PAISAJE URBANO. Universidad Nacional de la Plata. <https://blogs.ead.unlp.edu.ar/planeamientofau/files/2013/05/Ficha-N%C2%BA-19-Morfolog%C3%ADa-Urbana.pdf>

Naula Reina, I. C., Albuja Proaño, G. A., Carrillo Flores, R. A., & Izurieta Cabrera, C. F. (2016). Modelación y simulación numérica de la Ecuación de Richards para problemas de infiltración. *Enfoque UTE*, 7(1), 46–58. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V7N1.87>

- Navarro Arredondo, A. (2019). Control de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(3), 631–663. <https://doi.org/10.24201/edu.v34i3.1806>
- Necco Carlomagno, G. V. (2016) *Taller de Introducción a Las Ciencias de La Atmósfera Primer Semestre 2016*. <https://docplayer.es/27908699-Taller-de-introduccion-a-las-ciencias-de-la-atmosfera-primer-semester-2016-gustavo-v-necco-carlomagno-imfia-fing-if-fcien.html>
- Niu, H., Wang, B., Liu, B., Liu, Y., Liu, J., & Wang, Z. (2018). Numerical simulations of the effect of building configurations and wind direction on fine particulate matters dispersion in a street canyon. *Environmental Fluid Mechanics*, 18, 829-847.
- Número, R. (n.d.). *MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL*.
- Núñez-Alonso, D., Pérez-Arribas, L. V., Manzoor, S., & Cáceres, J. O. (2019). Statistical Tools for Air Pollution Assessment: Multivariate and Spatial Analysis Studies in the Madrid Region. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9753927>
- Oliveri Conti, G., Heibati, B., Kloog, I., Fiore, M., & Ferrante, M. (2017). A review of AirQ Models and their applications for forecasting the air pollution health outcomes. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(7), 6426–6445. <https://doi.org/10.1007/S11356-016-8180-1>
- Podrez, M. (2015). An update to the ambient ratio method for 1-hNO₂ air quality standards dispersion modeling. *Atmospheric Environment*, 103, 163–170. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2014.12.021>

Reiminger, N., Vazquez, J., Blond, N., Dufresne, M., & Wertel, J. (2020). CFD evaluation of mean pollutant concentration variations in step-down street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 196, 104032. <https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2019.104032>

Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Medellín, Antioquia (2019, 5 de julio) DANE. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190709-CNPV-presentacion-medellin.pdf>

Ruiz-Tapia, T. E., Jácome-Camacho, G. R., Sinche-Serra, M. V., Castillo-Domínguez, J. P., Avilés-Puigvert, F. X., & la Torre, M. H. de. (2020). DISEÑO DE CALIBRACIÓN PARA CUANTIFICAR EMISIONES DE CO₂ (RESPIRACIÓN DEL SUELO) DURANTE INTERVALOS DIURNOS. *Agrociencia*, 54(6), 747–761. <https://doi.org/10.47163/AGROCIENCIA.V54I6.2188>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2012). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (Google eBook). 2012, 1203. https://books.google.com/books/about/Atmospheric_Chemistry_and_Physics.html?hl=es&id=J3s30hwn_K0C

Song, C., Wu, L., Chen, X., Xie, Y., He, J., Wang, T., Lin, Y., Jin, T., Wang, A., Liu, Y., Dai, Q., Liu, B., Wang, Y.-N., & Mao, H. (2014). 8 (91.1, 85.7) $\mu\text{g m}^{-3}$ for PM₁₀, 54.8 (56.2, 57.2) $\mu\text{g m}^{-3}$ for O₃_8 h, 39.6 (33.3, 33.4) $\mu\text{g m}^{-3}$ for NO₂, 34.1 (26, 21.9) $\mu\text{g m}^{-3}$ for SO₂, 1.2 (1.1, 1.1) mg m^{-3} for CO. 107. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.075>

Soppelsa, M. E., Lozano-Gracia, N., & Xu, L. C. (2019). The Effects of Pollution and Business Environment on Firm Productivity in Africa. *The Effects of Pollution and Business Environment on Firm Productivity in Africa*. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-8834>

U.S. EPA (2014). Criteria Air Pollutants [Other Policies and Guidance]. *US EPA - References - Scientific Research Publishing*. (n.d.). Retrieved January 29, 2023, from.

[https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqw2orz553k1w0r45\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2915508](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqw2orz553k1w0r45))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2915508)

Thabet, S., & Thabit, T. H. (2018b). CFD Simulation of the Air Flow around a Car Model (Ahmed Body). *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 8(7). <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.7.2018.P7979>

Vanzo, T. (2023). 25 Most Polluted Cities in the World (2023 Rankings). *Smart Air*. <https://smartairfilters.com/en/blog/25-most-polluted-cities-world-2023-rankings/>.

Wang, Y. J., DenBleyker, A., McDonald-Buller, E., Allen, D., & Zhang, K. M. (2011). Modeling the chemical evolution of nitrogen oxides near roadways. *Atmospheric Environment*, 45(1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2010.09.050>

Wang, W., Ng, E., Yuan, C., & Raasch, S. (2017). Large-eddy simulations of ventilation for thermal comfort—a parametric study of generic urban configurations with perpendicular approaching winds. *Urban climate*, 20, 202-227.

Wesseling, P. (2001) *Principles of Computational Fluid Dynamics*. Springer. <https://dokumen.tips/documents/wesseling-principles-of-computational-fluid-dynamics2001.html?page=1>

Zajic, D., Fernando, H. J. S., Calhoun, R., Princevac, M., Brown, M. J., & Pardyjak, E. R. (2011). Flow and Turbulence in an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1), 203–223. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2525.1>

Zamora Pina, M. (2016). *Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio*. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/5381>