

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE
TECHOS Y FACHADAS VERDES PARA MEJORAR
LA CALIDAD DEL AIRE EN EL DISTRITO DE SAN
JUAN DE LURIGANCHO A TRAVÉS DE MODELOS
MICROMETEOROLÓGICOS EN ENVI-MET**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Juan Jesús Navarro Miranda 

ASESOR

Daniel Horna Muñoz 

Lima - Perú

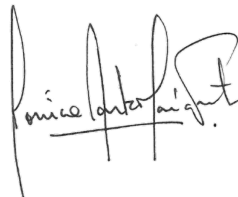
2024

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TECHOS Y FACHADAS VERDES PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN EL DISTRITO DE SAN JUAN DE LURIGANCHO A TRAVÉS DE MODELOS MICROMETEOROLÓGICOS EN ENVI-MET” ha sido elaborada por el Sr. Juan Jesús Navarro Miranda, con la asesoría de Daniel Vicente Horna Muñoz, identificado con DNI N°45282051 y que se presenta para obtener el título profesional de Ingeniero ambiental, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster
Directora de Investigación

En Barranco, el 29 de mayo 2024

Dedicatoria:

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mis padres por su apoyo continuo e incondicional. A mis queridos hermanos, fuente de inspiración en mi búsqueda de superación. Y dedico un cariñoso saludo al cielo a mi amada abuela Piedad, cuya confianza ha sido mi fortaleza. A todos, gracias por ser la base que hizo posible este logro en mi tesis.

Agradecimientos:

A mi asesor, Daniel Horna, quien me acompañó de manera constante durante la realización de esta investigación. Su guía experta y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I	23
REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA	23
1.1. Eliminación de partículas contaminantes del aire por parte de la vegetación australiana potencialmente utilizadas para barreras verdes	23
1.2. Estimaciones de mitigación de la contaminación del aire con plantas verdes y cubiertas verdes utilizando el modelo UFORE	24
1.3. Contaminación del aire en un microclima, el impacto de diferentes barreras verdes en la dispersión.	25
1.4. Mejorar el aire local en las ciudades ¿arbolar o no arbolar?	26
1.5. Diseño de techos y fachadas verdes para mejorar la calidad del aire urbano mediante la mitigación del material particulado	28
1.6. Evaluación del papel de la infraestructura verde en la dispersión y eliminación de contaminantes cercanos a la carretera: modelado y medición	29
1.7. Reducción de la efectividad de la plantación de árboles en el enfriamiento del microclima debido a la contaminación por ozono	30

1.8. El papel de la vegetación en la atmósfera urbana de 3 ciudades europeas	
Evaluación del impacto de la vegetación en las concentraciones y deposición	
de contaminantes atmosféricos	31
CAPÍTULO II	33
MARCO TEÓRICO	33
2.1. Capa límite atmosférica	34
2.2. Anticiclón del pacifico sur	34
2.3. Vientos y flujos turbulentos	35
2.4. Ecuaciones de conservación de la capa límite atmosférica	36
2.4.1 Ecuación de estado	36
2.4.2 Conservación de momento	36
2.4.3 Conservación de la masa	37
2.4.4 Conservación de la humedad	38
2.4.5 Conservación de la energía	38
2.4.5 Conservación de una cantidad escalar	39
2.4.5 Ecuaciones de Navier Stokes	39
2.5. Contaminación atmosférica	40
2.5.1 Daños respiratorios y cardiovasculares producto de los contaminantes del aire	41
2.6. Los cánones urbanos	41
2.7. La vegetación	42
2.7.1 Las infraestructuras verdes	42
2.7.1.1 Los techos verdes	43
2.7.1.2 Las fachadas verdes	43
2.8. ENVI-met	43

CAPÍTULO III	44
MARCO METODOLÓGICO	44
3.1 Caracterización de la investigación	44
3.2 Proceso de la investigación	45
3.2.1 Desarrollo del modelo de validación	46
3.2.2 Desarrollo de modelos paramétricos	47
3.2.3 Creación de modelos a escala local de SJL	48
3.3 Estructura del marco metodológico	49
3.3.1 Área de estudio	49
3.4 Descripción de la vegetación de los techos y fachadas verdes	52
3.5 Flujo vehicular en SJL	53
CAPÍTULO IV	54
RESULTADOS Y DISCUSIONES	54
4.1 Optimización del tamaño de celda y evaluación de los resultados en comparación de los datos de la estación para validar los modelos micrometeorológicos	54
4.1.1 Creación del área de validación en ENVI-met y optimización de la celda	54
4.1.2. Validación de los modelos en función a las variables meteorológicas y calidad del aire.	58
4.1.2.1 Temperatura	59
4.1.2.2 Material Particulado PM2.5	61
4.1.2.3 Dióxido de Nitrógeno NO2	65
4.1.2.4 Ozono troposféricos O3	69
4.2 Parametrización de los modelos y la búsqueda del porcentaje óptimo de cobertura vegetal sobre los edificios	72

4.2.1	Techos verdes	74
4.2.1.1	Temperatura	74
4.2.1.2	PM2.5	76
4.2.1.3	NO2	78
4.2.1.4	O3	81
4.2.2	Fachadas verdes	83
4.2.2.1	Temperatura	83
4.2.2.2	PM2.5	85
4.2.2.3	NO2	87
4.2.2.4	O3	89
4.3	Comparación del Caso Base de SJL y el Caso Verde con los porcentajes óptimos de vegetación	91
4.3.1	Caracterizaciones de la sección A y B	94
4.3.2	Concentraciones de los contaminantes	94
4.3.2.1	PM2.5	95
4.3.2.2	NO2	97
4.3.2.3	O3	98
4.3.3	Deposición de los contaminantes	101
4.3.3.1	PM2.5	102
4.3.3.2	NO2	103
4.3.3.3	O3	106
	CONCLUSIONES	111
	RECOMENDACIONES	113

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

115

ANEXOS

121

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Tipo de cañón y ratio entre altura y ancho	42
Tabla 3.1 Principales variables de la investigación	45
Tabla 3.2: Características de las especies vegetales	53
Tabla 4.1: Porcentaje de error entre los resultados por tamaño de grilla y los valores reales	57
Tabla 4.2: Cuadro del error cuadrático medio del PM2.5 por semana en el horario de validación	63
Tabla 4.3: Cuadro del error cuadrático medio del PM2.5 por semana en el horario de validación	65
Tabla 4.4: Gráfico comparativo entre los valores de NO2 en ENVI-met y la estación por semana	67
Tabla 4.5: Cuadro del error cuadrático medio del NO2 por semana en el horario de validación	68
Tabla 4.6: Cuadro del error cuadrático medio del O3 por semana	70
Tabla 4.7: Gráfico comparativo entre los valores de O3 en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación	72
Tabla 4.8: Porcentaje óptimo de techos y fachadas verdes de acuerdo al tamaño del edificio	91

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Capa Límite Atmosférica	34
Figura 2.2. Viento promedio, ondas y turbulencia	35
Figura 3.1 Representación esquemática de la metodología de la investigación	46
Figura 3.2 Ubicación del área de validación	47
Figura 3.3 Ubicación del área de análisis	48
Figura 3.4 Gráfico de temperaturas máximas, medias y mínimas en SJL	49
Figura 3.5: Gráfico de humedades relativas máximas, medias y mínimas en SJL	50
Figura 3.6: Gráfico de concentraciones mensuales de contaminantes en SJL	51
Figura 3.7: Rosa de vientos de SJL en el mes de julio	52
Figura 4.1: Visualización del dominio del modelo y optimización del tamaño de celda.	55
Figura 4.2: Comparación de la concentración de PM2.5 de la estación de SJL y diferentes tamaños de celda	56
Figura 4.3: Comparación de temperaturas entre la estación de SJL y ENVI-met	60
Figura 4.4: Comparación de temperaturas entre la estación de SJL y ENVI-met en el horario de validación	61
Figura 4.5: Gráfico comparativo entre los valores de PM2.5 en ENVI-met y la estación por semana	62
Figura 4.6: Gráfico comparativo entre los valores de PM2.5 en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación	64
Figura 4.7: Gráfico comparativo entre los valores de NO2 en ENVI-met y la estación por semana	66

Figura 4.8: Gráfico comparativo entre los valores de NO ₂ en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación	89
Figura 4.9: Gráfico comparativo entre los valores de O ₃ en ENVI-met y la estación por semana	70
Figura 4.10: Gráfico comparativo entre los valores de O ₃ en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación	71
Figura 4.11: Variación de porcentaje de temperatura con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m	75
Figura 4.12: Variación de porcentaje de la concentración PM _{2.5} con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m	77
Figura 4.13: Variación de porcentaje de la concentración NO ₂ con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m	80
Figura 4.14: Variación de porcentaje de la concentración O ₃ con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.	82
Figura 4.15: Variación de porcentaje de temperatura con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.	84
Figura 4.16: Variación de porcentaje de la concentración PM _{2.5} con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m	86
Figura 4.17: Variación de porcentaje de la concentración NO ₂ con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m	88
Figura 4.18: Variación de porcentaje de la concentración O ₃ con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m	89
Figura 4.19: Área de análisis y el Caso Base	91
Figura 4.20: La subdivisión del caso verde (CV) y el caso base (CB) en secciones A y B para cada uno	92
Figura 4.21: La subdivisión del corredor verde (CV) y el corredor base (CB) en secciones A y B para cada uno	93

Figura 4.22: Comparación de la concentración de PM2.5 entre el CB y el CV a las 5p.m	95
Figura 4.23: Comparación de la concentración de PM2.5 entre el CB y el CV en las horas de análisis	96
Figura 4.24: Comparación de la concentración de NO2 entre el CB y el CV a las 5p.m	97
Figura 4.25: Comparación de la concentración de NO2 entre el CB y el CV en las horas de análisis	98
Figura 4.26: Comparación de la deposición de NO2 entre el CB y el CV a las 5 p.m.	99
Figura 4.27: Comparación de la concentración de O3 entre el CB y el CV en las horas de análisis	100
Figura 4.28: Comparación de la deposición de PM2.5 entre el CB y el CV a las 5p.m	102
Figura 4.29: Comparación de la deposición de PM2.5 entre el CB y el CV en el horario de validación	103
Figura 4.30: Comparación de la deposición de NO2 entre el CB y el CV a las 5 p.m.	104
Figura 4.31: Comparación de la deposición de NO2 entre el CB y el CV en el horario de validación	105
Figura 4.32: Comparación de la deposición de O3 entre el CB y el CV a las 5 p.m.	106
Figura 4.33: Comparación de la deposición del O3 entre el CB y el CV en el horario de validación	107

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Resultados de las simulaciones de la concentración de PM2.5 en el horario de análisis	121
Anexo 2: Resultados de las simulaciones de la concentración de NO2 en el horario de análisis	122
Anexo 3: Resultados de las simulaciones de la concentración de O3 en el horario de análisis	123
Anexo 4: Resultados de las simulaciones de la deposición de PM2.5 en el horario de análisis	124
Anexo 5: Resultados de las simulaciones de la deposición de PM2.5 en el horario de análisis	125
Anexo 6: Resultados de las simulaciones de la deposición de PM2.5 en el horario de análisis	126
Anexo 7: Variación de las temperaturas en la sección A y B	127

RESUMEN

La problemática global de la contaminación del aire requiere soluciones ingeniosas y efectivas. En respuesta, países como Alemania, España y Francia han implementado infraestructuras verdes, como techos y fachadas verdes, para mejorar tanto las condiciones meteorológicas como la calidad del aire en zonas urbanas con escasa vegetación natural. Se debate si la densa cobertura vegetal podría actuar como una barrera que impide el flujo de aire y acumula contaminantes. Para investigar esta cuestión, se realizó un estudio en San Juan de Lurigancho, utilizando el modelo ENVI-met. El análisis cubrió 16 cuadras alrededor de una estación meteorológica del SENAMHI, evaluando cómo los techos y fachadas verdes influyen bajo las condiciones locales de clima y tráfico. El estudio determinó que la cobertura vegetal óptima no necesariamente requiere cubrir el 100% del edificio y que, para edificios de más de 10 metros, los techos verdes tienen poco impacto debido a su mínima interacción con las fuentes de contaminación. Se encontró que la vegetación en los edificios incrementa en promedio un 0.5% la concentración de contaminantes atmosféricos. Por otro lado, se evidenció que en las secciones con mayor área verde lograba capturar a un 1% más de contaminantes que las áreas sin vegetación, mostrando un equilibrio entre el incremento y la captura de contaminantes, lo que resalta la importancia de integrar estrategias de infraestructura verde. Este estudio subraya la necesidad de adaptar las soluciones de infraestructura verde a las condiciones específicas de cada entorno urbano para optimizar los beneficios en la calidad del aire, destacando la complejidad de los efectos de la vegetación y la importancia de un enfoque cuidadoso al implementar estas estrategias en zonas urbanas.

Palabras clave: Calidad del aire; Techos verdes; Fachadas verdes; Deposición de PM2.5 y NO2; Concentración de de PM2.5 y NO2; Morfología urbana; Temperatura

ABSTRACT

EVALUATION OF THE IMPLEMENTATION OF GREEN ROOFS AND FACADES TO IMPROVE AIR QUALITY IN THE SAN JUAN DE LURIGANCHO DISTRICT THROUGH MICROMETEOROLOGICAL MODELS IN ENVI-MET

The global issue of air pollution calls for ingenious and effective solutions. In response, countries like Germany, Spain, and France have implemented green infrastructures such as green roofs and walls to enhance both meteorological conditions and air quality in urban areas with limited natural vegetation. There's a debate about whether dense vegetation can act as a barrier that blocks air flow and accumulates pollutants. To address this, a study was conducted in San Juan de Lurigancho using the ENVI-met model. The analysis covered 16 blocks around a SENAMHI meteorological station, assessing how green roofs and walls influenced local weather and traffic conditions. The study determined that optimal vegetation coverage does not necessarily need to cover 100% of the building, and for buildings taller than 10 meters, green roofs have minimal impact due to their limited interaction with pollution sources. It was found that vegetation on buildings increased the average concentration of atmospheric pollutants by 0.5%. However, it was also noted that sections with more green areas captured 1% more pollutants than areas without vegetation, showing a balance between increase and capture of pollutants, which highlights the importance of integrating green infrastructure strategies. This study underscores the need to tailor green infrastructure solutions to the specific conditions of each urban environment to optimize air quality benefits, highlighting the complexity of vegetation effects and the importance of a careful approach when implementing these strategies in urban zones.

Keywords: Air quality; Green roofs; Green walls; Deposition of PM_{2.5} and NO₂; Concentration of PM_{2.5} and NO₂; Urban morphology; Temperature.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se centra en examinar cómo los techos y fachadas verdes influyen en la calidad del aire en el distrito de San Juan de Lurigancho. Este entorno se ve afectado por una escasez de áreas verdes, lo que intensifica las concentraciones de contaminantes atmosféricos. Esta problemática se ve agravada por la alta congestión vehicular, las emisiones del sector industrial y la presencia de cañones urbanos en la zona. Además, el paisaje en constante cambio y el crecimiento poblacional han alterado las características del viento en el distrito, resultando en una disminución de su fuerza y cambios en su dirección habitual. Esto contribuye a que muchos contaminantes queden atrapados y recirculen en el entorno de forma persistente. Asimismo, la influencia del anticiclón del Pacífico Sur contribuye a la estabilidad de la Capa Límite Atmosférica, lo que ocasiona también una menor velocidad de los vientos y, como consecuencia, una dificultad mayor para la dispersión de los contaminantes. A través de modelos computacionales, esta investigación busca comprender detalladamente cómo los techos y fachadas verdes pueden influir en la mejora de la calidad del aire en esta zona específica. Este enfoque no solo responde a la urgencia de hallar soluciones sostenibles para los desafíos ambientales y de salud pública, sino que también aspira a contribuir al conocimiento existente sobre el impacto positivo de las infraestructuras verdes en la calidad del aire y la salud de la comunidad.

Descripción de la situación problemática

La problemática de la contaminación atmosférica destaca como una de las cuestiones socioambientales más urgentes y perjudiciales debido a su alto impacto negativo en la salud de las personas [1]. Este desafío se manifiesta a nivel global, afectando a numerosas ciudades en todo el mundo y su origen radica principalmente en el aumento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, siendo el sector energético, industrial y el tráfico vehicular las

principales fuentes de emisiones [2]. A través de este tipo de emisiones, se emiten una variedad de contaminantes nocivos que afectan negativamente la calidad del aire, estos están compuestos por material particulado (PM) como el PM10 ($<10\ \mu\text{m}$) y PM2.5 ($<2.5\ \mu\text{m}$), y gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre principalmente [3].

La prolongada exposición a una mala calidad atmosférica está asociada con graves problemas de salud, presentando altas tasas de mortalidad, especialmente entre los grupos más vulnerables como los niños y los adultos mayores [4]. Entre los contaminantes más investigados, están el PM2.5 que es la particular más preocupante debido a su impacto significativamente negativo en la salud pública. Este tipo de partículas se ha vinculado directamente con enfermedades cardiovasculares y el asma infantil, contribuyendo a una mayor incidencia de muerte prematura [5]. Por otro lado, el dióxido de nitrógeno (NO₂) se destaca como uno de los gases más investigados, ya que también está asociado con enfermedades cardiovasculares y puede causar efectos respiratorios crónicos, incluso afectando a los recién nacidos [6]. Finalmente, el ozono troposférico es un contaminante secundario que se forma a partir de reacciones fotoquímicas que involucran óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz solar [7]. Este gas afecta las mucosas respiratorias y los tejidos pulmonares, pudiendo provocar asma, neumonía y enfermedad pulmonar obstructiva crónica, entre otras afecciones [7].

El aire desempeña un papel fundamental en la dispersión y transporte de contaminantes, distribuyéndolos por el entorno urbano y afectando la calidad del aire [8]. La efectividad de esta dispersión está estrechamente ligada a la energía del aire, la cual se ve directamente influenciada por la temperatura local. A medida que la temperatura aumenta, el viento adquiere mayor energía y, por lo tanto, una mayor capacidad de transporte de contaminantes [9]. Sin embargo, durante los meses de invierno, las temperaturas tienden a ser más bajas, lo que resulta en vientos más débiles. Esta disminución en la velocidad del viento dificulta el transporte de los contaminantes [9]. Por otro lado, en áreas densamente edificadas, la capacidad de intercambio de aire entre las fuentes contaminantes a nivel del suelo y el flujo atmosférico sobre los techos de los edificios es limitada [10]. Esto resulta en que muchos contaminantes no logren dispersarse ni eliminarse eficientemente, quedando

atrapados y recirculando en espacios encajonados entre los edificios, conocidos como cañones urbanos [8]. Esta configuración puede alterar las condiciones meteorológicas locales, propiciando un aumento en las concentraciones de contaminantes y empeorando la calidad del aire [10].

Para abordar la concentración de contaminantes en estos entornos urbanos, muchos Estados y Gobiernos vienen implementando la vegetación como parques y jardines e infraestructuras verdes (IV) mediante políticas de financiación y requisitos legales [11]. Estas IV incluyen techos con vegetación, conocidos como techos verdes, y fachadas también cubiertas de vegetación, denominadas fachadas verdes, donde las paredes y techos actúan como soporte para la vegetación incorporada. Estas estrategias permiten que la vegetación, al capturar partículas mediante la deposición sobre sus superficies y absorber contaminantes a través de las estomas, contribuya de manera positiva a la reducción de la concentración de contaminantes atmosféricos en estos entornos urbanos densamente poblados [12].

Sin embargo, algunas investigaciones han demostrado que una planificación deficiente de la vegetación puede acarrear efectos adversos, incluido el empeoramiento de la calidad del aire [13,14]. Según Jeanjean & Wania *et al.* [13,14], la existencia de árboles en los cañones urbanos proporciona resistencia al flujo del aire, reduciendo la mezcla en la vertical y la circulación del aire local, en consecuencia, se genera que la calidad del aire sea afectada negativamente. Por otro lado, Wania demostró a través de simulaciones, que el reemplazo de árboles por setos cerca de la fuente de emisión de contaminantes mejora la calidad del aire, ya que mejora la difusión del aire y logra absorber más eficientemente los gases a comparación de los árboles [14]. Otro estudio realizado por Vos *et al.* sugiere que no implementar IV en los cañones urbanos es mejor alternativa que espacios con IV [15] ya que no hay barreras que generan resistencia a la difusión del aire. En ese sentido, nace una paradoja, la cual es ¿vegetar o no vegetar las ciudades? Ante ello, Abhijith *et al.*, [3] mencionan que es un tema muy complejo seleccionar una IV a implementar en un cañón debido a que hay muchas variables previas a considerar como:

1. Geometría de los edificios (altura, separación, etc.)
2. Tipo de vegetación (árbol, seto, pastos, fachadas y techos verdes, etc.)

3. Características de la meteorología local (dirección y velocidad del viento, humedad relativa, temperatura, radiación, etc.)
4. Características de las especies vegetales como: grosor de hoja, ceras, etc.
5. Proximidad de la IV a la fuente de contaminación.

Un ejemplo paradigmático de un distrito afectado por la deficiencia en la calidad del aire es San Juan de Lurigancho (S JL) [16]. Este distrito se caracteriza por su alta densidad poblacional, una intensa urbanización y una marcada escasez de áreas verdes en su territorio. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) [17]. S JL presenta uno de los peores índices de calidad del aire en Lima, superando diariamente los estándares de calidad del aire (ECAs) propuestos por el Ministerio del Ambiente [16]. Entre los años 2014 y 2016, se registraron 150 fallecimientos de niños y más de 600 de adultos debido a infecciones respiratorias asociadas a la mala calidad del aire en este distrito [18]. Además, S JL cuenta con una superficie verde de apenas 1.59 m² por habitante, muy por debajo del límite establecido por el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), que define como ambientalmente saludable a un distrito con al menos 9 m² de área verde por habitante [17]. Finalmente, S JL y toda la costa peruana experimentan especialmente durante la época de invierno, los efectos del anticiclón del Pacífico Sur sobre la capa límite atmosférica. Esta influencia contribuye a la estabilidad atmosférica en Lima al enfriar la temperatura superficial, lo que resulta en vientos más débiles y una menor eficiencia en la dispersión de contaminantes, los cuales tienden a estancarse en el entorno urbano [19].

En este contexto, es evidente la urgencia de implementar soluciones que reduzcan la concentración de contaminantes atmosféricos y mitiguen sus efectos adversos en S JL. La adopción de infraestructura verde (IV) emerge como una medida clave para mejorar la calidad del aire en este distrito, especialmente ante la escasez de áreas verdes.

Formulación del problema

En este contexto, se plantea el problema de investigación: ¿Qué efectos tienen los techos y fachadas verdes en la calidad del aire? La formulación de este problema tiene como objetivo determinar si la introducción de la infraestructura verde (IV) redundará en una

mejora o deterioro de la calidad del aire en SJL. A través del empleo de software de simulación (ENVI-met) y un análisis de los resultados, se busca contrastar la situación real de este distrito con la hipotética implementación de techos y fachadas verdes.

Objetivos de la investigación

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la efectividad de la implementación de techos y fachadas verdes frente al desafío de la baja calidad del aire en el distrito de San Juan de Lurigancho, mediante el uso de modelos micrometeorológicos. Con este propósito, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. **Desarrollar y validar un modelo de predicción para la concentración de PM2.5, NO2 y ozono troposférico:** Este objetivo busca garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados y predicciones obtenidos. El modelo se ajustará a los datos proporcionados por la estación meteorológica del SENAMHI para verificar su precisión con los datos reales.
2. **Determinar el porcentaje óptimo de cobertura verde para la reducción de los contaminantes:** Este objetivo tiene como propósito desarrollar modelos paramétricos del distrito para identificar el porcentaje ideal de techos y fachadas verdes en los edificios. Este porcentaje está en función a la capacidad de la vegetación para lograr los mejores resultados en la disminución de los contaminantes.
3. **Evaluar la influencia de la infraestructura verde en la calidad del aire en un sector de SJL:** Este objetivo conlleva la creación de dos modelos urbanos para San Juan de Lurigancho: uno que simula la presencia de techos y fachadas verdes (Caso Verde) y otro que representa el escenario sin vegetación (Caso Base). El propósito es comparar estos modelos y analizar cómo la infraestructura verde afecta la concentración y deposición de PM2.5, NO2 y ozono troposférico en el entorno.

Justificación

San Juan de Lurigancho enfrenta una marcada escasez de áreas verdes capaces de contrarrestar los efectos de una mala calidad del aire [17]. Además, este distrito presenta una limitada disponibilidad de espacios para la implementación de parques y jardines, debido a su elevada densidad urbana [17]. Esta situación motiva la búsqueda de alternativas en infraestructuras verdes (IV) como setos, muros verdes, techos y fachadas verdes que se adapten a las condiciones específicas de SJL. El objetivo es mejorar la calidad del aire y mitigar sus impactos adversos. No obstante, la selección de una IV no debe ser aleatoria, ya que cada tipo de infraestructura verde posee características intrínsecas distintas que interactúan de manera única con los cañones urbanos y las condiciones meteorológicas locales [3]. Además, es imperativo realizar pruebas experimentales para evaluar los efectos posibles de estas IV en la calidad del aire [10].

En ese sentido, la presente tesis busca evaluar los impactos de los techos y fachadas verdes en los edificios de SJL sobre la calidad del aire a partir de modelos micrometeorológicos a escala local y determinar si las implementaciones de estas IV pueden mejorar la calidad del aire en este distrito.

Alcances

San Juan de Lurigancho es un distrito con 131.25 km² de superficie. Por ello, esta tesis no contempla un análisis de todo el distrito debido a la enorme exigencia computacional que esta requeriría. Por ello, el área de investigación abarca 16 cuadras a la redonda cercanas a la estación meteorológica del SENAMHI, permitiendo una investigación más manejable y enfocada.

Para el desarrollo de la metodología de investigación, se ha empleado el software meteorológico ENVI-met con el propósito de analizar los impactos de los techos y las fachadas verdes en la calidad del aire de San Juan de Lurigancho. Específicamente, se ha enfocado en un mes invernal, período en el cual se registran concentraciones más elevadas de contaminantes atmosféricos [19]. La elección de este mes se fundamenta en la eficacia del

software ENVI-met en la simulación de datos a escala temporal, principalmente en horas, días y hasta semanas [20]. Este enfoque permitirá una exploración detallada y significativa de los efectos de los elementos verdes en el microclima urbano, durante un lapso representativo y pertinente para el contexto de la investigación.

Por otro lado, esta investigación se centra en las emisiones totales de contaminantes, principalmente provenientes de los gases emitidos por el parque automotor. Sin embargo, es importante señalar que no se han considerado las emisiones de otras fuentes alternativas, como las provenientes de chimeneas, partículas generadas por la combustión de diversos procesos, desgaste de discos de freno y neumáticos, así como la resuspensión del polvo en el ambiente urbano.

Este trabajo no se adentra en una guía detallada de las acciones requeridas para la implementación y el mantenimiento de techos y fachadas verdes. Con este propósito, se han seleccionado especies vegetales específicas: *Sedum rubrotinctum* para los techos verdes y *Hedera helix* para las fachadas verdes. Estudios realizados por Collazo y Sternberg han destacado las capacidades de estas especies para remover contaminantes atmosféricos, gracias a sus atributos morfológicos que les permiten capturar cantidades significativas de contaminantes. Además, se eligieron estas especies por su adaptación a las condiciones ambientales de San Juan de Lurigancho, lo que aumenta la viabilidad y eficacia de las soluciones propuestas [21]. Por último, las características morfológicas de estas especies guardan similitudes con las especies utilizadas en la investigación de Viecco, quien empleó *Sedum album* en la cubierta de sus techos y fachadas verdes [1].

Limitaciones

Las limitaciones de esta investigación se deben, en parte, a la necesidad de contar con una amplia gama de datos para lograr un correcto análisis. Entre estas limitaciones se encuentra la falta de actualización de los datos sobre las características urbanas de San Juan de Lurigancho (S JL), así como la dificultad de acceder a ellos, lo que ha generado la dependencia de estimaciones realizadas mediante herramientas como Google Earth para

obtener información sobre las dimensiones de los edificios, la extensión de las calles y la distribución de áreas verdes. Además, se destaca la escasa disponibilidad de información detallada sobre el impacto específico de la vegetación implementada en los edificios en relación con los niveles de contaminantes en avenidas o distritos.

Por otro lado, es importante considerar que el software ENVI-met funciona de manera óptima en escalas de tiempo que abarcan desde horas hasta semanas, como se mencionó anteriormente [20]. Sin embargo, realizar un análisis a lo largo de varios meses o incluso años requeriría una cantidad considerable de recursos computacionales. Esta limitación práctica restringe la capacidad de esta investigación para extender el análisis más allá de un período máximo de un mes. Por lo tanto, aunque se reconoce la importancia de evaluar los efectos a largo plazo de los techos y fachadas verdes, se ha tomado la decisión de limitar el alcance temporal de esta investigación debido a restricciones de recursos.

Por último, la poca cantidad de experimentos en laboratorios, como los llevados a cabo mediante túneles de viento, y la escasa cantidad de estudios a nivel local en entornos urbanos que evalúen la implementación de techos y fachadas verdes en los edificios para reducir los contaminantes atmosféricos, se resalta la notable ausencia de investigaciones en este campo. Estas limitaciones subrayan la necesidad urgente de realizar estudios adicionales que aborden estos aspectos con mayor profundidad y precisión en el futuro.

CAPÍTULO I

REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

En este capítulo, se lleva a cabo una revisión crítica de la literatura que se centra en la evaluación del impacto de la vegetación para reducir los contaminantes atmosféricos mediante el uso de herramientas computacionales. La revisión tiene como objetivo analizar y detallar los objetivos, metodologías, resultados y conclusiones de cada estudio para obtener una comprensión sólida del estado actual del conocimiento en esta área. Al identificar brechas y limitaciones en la literatura, se busca justificar la importancia de la presente investigación. Además, se realiza un análisis crítico de cada estudio, considerando su calidad, relevancia y limitaciones. Este enfoque metodológico proporciona una visión integral de las diversas perspectivas y enfoques presentes en los estudios revisados, enriqueciendo así la comprensión del campo de estudio.

1.1. Eliminación de partículas contaminantes del aire por parte de la vegetación australiana potencialmente utilizada para barreras verdes

Este estudio fue realizado por Tomson & Michael, el cual tuvo por objetivo evaluar la capacidad y la eficiencia de las plantas australianas nativas para filtrar el material particulado a escala laboratorio con el fin de elaborar una planificación y diseño de paredes verdes a gran escala para mejorar la calidad del aire dentro de un entorno urbano. Los autores desarrollaron un experimento en laboratorio, el cual consistía en tener una cámara empaquetada con vegetación australiana como material filtrante, 2 tuberías de entrada y de salida unidas a una cámara de video, diversos puntos de muestreo y el ingreso uniforme de una corriente de aerosol [23]. El fin de ello era registrar numéricamente cuanto en porcentaje de partículas era retenido por la planta.

Los resultados revelaron una eficacia variable en la retención de partículas gruesas PM10, con eficacias que van desde el 20.1% al 99.9%, y como segundo resultado una retención de partículas finas PM2.5, con eficacias que van desde el 50,1% al 99,9%, mostrando una relación directamente proporcional al tamaño de la partícula [23]. Finalmente, los autores concluyeron que las plantas australianas implementadas como barreras verdes retienen grandes cantidades de material particulado con un diámetro mayor a los 2.5 micrómetros [23].

Los resultados rescatan que las plantas australianas son buenos removedores de partículas contaminantes. No obstante, el estudio se presenta de manera simplificada al obviar diversas variables presentes en entornos reales, tales como la presencia de edificaciones a escala, múltiples fuentes de contaminantes, la velocidad y dirección del viento, así como la consideración de un entorno más amplio. Es importante señalar que los límites de este modelo pueden impactar los resultados, y esta simplificación podría limitar la generalización de los hallazgos a situaciones más complejas y variadas.

1.2. Estimaciones de mitigación de la contaminación del aire con plantas verdes y cubiertas verdes utilizando el modelo UFORE

Este estudio fue dirigido por Currie & Bass, con el objetivo de investigar el efecto de los techos verdes y las paredes verdes en la contaminación del aire en Toronto [23]. Para ello, exploraron diversas combinaciones de vegetación al manipular la cantidad de árboles, arbustos, techos verdes y paredes verdes en el área de estudio. Utilizaron el software de simulación UFORE para desarrollar seis escenarios distintos, comparando los diferentes subconjuntos de vegetación y su impacto en los contaminantes del aire [23].

Los estudios señalan que incluir césped en los techos verdes puede brindar una variedad de beneficios, como la absorción de agua de lluvia, la mejora del aislamiento térmico y la reducción de la contaminación del aire [23]. Esto se debe a la capacidad de las plantas para atrapar partículas y gases contaminantes. Además, se encontró que la combinación de césped en los techos verdes y la integración de paredes verdes produjeron resultados prácticamente equivalentes en la captura de partículas PM10 en comparación con

la plantación de árboles [23]. Por lo tanto, se determinó que aumentar la cobertura de césped en un 20% en los techos de los edificios con techos verdes aumenta su eficacia en la eliminación de contaminantes en un 15%.

Los resultados de este estudio son prometedores, ya que sugieren la viabilidad de aplicar esta metodología en diversas ciudades del mundo para evaluar su eficacia en condiciones variadas. No obstante, es importante destacar algunas limitaciones presentes en la investigación [23]. Por ejemplo, no se evaluó la precisión con la que el modelo UFORE estimó los niveles de contaminantes del aire. Además, el estudio no incluyó un análisis previo de las especies vegetales utilizando fuentes externas, limitándose únicamente a los datos de la base del software [23]. A pesar de estos puntos, el estudio logra cumplir con la función esencial de todo modelo: proporcionar una dirección y tendencia para futuras simulaciones que emplean esta metodología.

1.3. Contaminación del aire en un microclima; el impacto de diferentes barreras verdes en la dispersión

Este estudio, conducido por Taleghani *et al.*, se propuso analizar los impactos variados de diversas barreras verdes en la dispersión de la contaminación en un barrio de Manchester, específicamente en una avenida con alto flujo vehicular. Para lograr este objetivo, se empleó un modelo micrometeorológico en un software de simulación ENVI-MET v4.4, utilizando datos de calidad del aire y condiciones meteorológicas del año 2018 proporcionados por el Departamento del Medio Ambiente del Reino Unido. Además, la avenida en estudio carecía de vegetación en sus alrededores [24].

Los autores llevaron a cabo la simulación de cuatro escenarios con diferentes tipos de barreras verdes (dos escenarios con setos de 2 y 4 metros de altura, y otros dos con árboles de 10 y 20 metros de altura). Los resultados revelaron que los escenarios con setos de 2 y 4 metros de altura aumentaban la concentración en 2 y 3 microgramos por metro cúbico respectivamente, mientras que en el caso de los árboles de 10 y 20 metros, las concentraciones de los contaminantes mejoraron en 3 y 5 microgramos por metro cúbico. Es

decir, los setos presentaban una mayor concentración de dióxido de nitrógeno que los árboles [24].

La conclusión principal del artículo indica que las hojas de los setos actúan como una barrera impermeable, obstaculizando el movimiento del aire y provocando la recirculación del aire contaminado en el cañón urbano. En contraste, los árboles propiciaban una disminución de la concentración de contaminantes, ya que este tipo de barrera facilita la difusión del aire de manera más eficiente [24].

Resulta intrigante la comparación realizada por estos autores entre dos tipos de vegetación. A pesar de que los setos, siendo más pequeños que los árboles, presentan una mayor resistencia al flujo, lo que provoca la falta de desplazamiento del viento y el atrapamiento de contaminantes, aumentando así su concentración; en contraste, los árboles probablemente logren capturar los contaminantes en sus hojas y/o permitan la circulación del aire. No obstante, cabe destacar que los resultados podrían variar al modificar el tipo de especie tanto para los setos como para los árboles, es decir, cambiar determinadas características como el índice de área foliar o la robustez de la especie se cree que podría influir en los resultados de esta investigación.

1.4. Mejorar la calidad del aire local en las ciudades: ¿arbolar o no arbolar?

La investigación realizada por Vos *et al.*, destaca que el análisis del impacto real de la vegetación en la calidad del aire, mediante modelos computacionales, está fuertemente condicionado por factores como la geometría de los edificios, tipos de contaminantes, condiciones meteorológicas (viento, temperatura, humedad) y, en el caso de la vegetación, por su tamaño, posición, porosidad, índice de área foliar y capacidad de filtración. Su objetivo principal fue determinar cómo la vegetación urbana puede emplearse para mejorar la calidad del aire en áreas con alta congestión vehicular. Para lograr este propósito, los investigadores utilizaron el software meteorológico ENVI-met para simular diversos procesos atmosféricos, incluida la dispersión de contaminantes [15].

En el primer paso de su metodología, se llevaron a cabo las configuraciones iniciales, que incluyeron la definición del dominio del modelo. Se optó por un dominio extenso de $8H$ en todas las direcciones cardinales, donde H representa la altura promedio de los edificios, con el objetivo de evitar interferencias de los límites en los procesos atmosféricos. Además, se estableció una dimensión de malla de 0.5 m en las tres dimensiones del modelo [15]. En cuanto a la densidad del área foliar, se asignó un valor predeterminado de $0.7\text{ m}^2/\text{m}^3$ para los árboles, $2\text{ m}^2/\text{m}^3$ para los setos y un valor similar para las barreras verdes. También se consideró un flujo vehicular en la avenida principal de 1600 vehículos por hora [15].

Durante la simulación de los modelos, los investigadores observaron que tanto los setos como los árboles contribuyen al deterioro de la calidad del aire a nivel de la calle, ya que reducen la velocidad del viento, facilitando el transporte horizontal de contaminantes hacia las aceras. Esto resulta en una mayor concentración de contaminantes en comparación con una calle sin setos ni árboles. Por otro lado, las paredes verdes demostraron mejorar la calidad del aire cerca de la acera al proteger de manera efectiva las concentraciones elevadas, permitiendo que los contaminantes se desplacen verticalmente [15]. En resumen, se destaca que el efecto aerodinámico de la vegetación es un factor más determinante que la capacidad de filtración. Además, al aumentar la altura de los setos y paredes verdes, se observó que los setos menores a 1 metro de altura tenían un impacto insignificante en la calidad del aire, mientras que el incremento en la altura de las paredes verdes conducía a concentraciones más bajas en el sendero debido a una mejor protección, aunque esta mejora no era consistente en todas las condiciones, ya que, en casos de viento a 45° , la calidad del aire empeoraba en el lado del sotavento del cañón [15].

Por otro lado, los investigadores modificaron las dimensiones del cañón, donde aumentaba el tamaño de los edificios con el fin de evaluar los efectos de la vegetación en estas condiciones. Sus resultados indicaron que, a medida que la altura de los edificios aumenta, la calidad del aire se deteriora proporcionalmente. De manera adicional, cuando se añadían árboles en estos cañones urbanos, se generaba un empeoramiento adicional en la calidad del aire. Este fenómeno se atribuye a la obstrucción del flujo del aire causada tanto por los árboles como por los edificios [15].

La conclusión más significativa de esta investigación es que el efecto aerodinámico de la vegetación es un factor más determinante que la capacidad de filtración. En consecuencia, en las condiciones específicas de este estudio, una elección inadecuada del tipo de vegetación puede perjudicar la calidad del aire. No obstante, esto no implica que la vegetación sea inherentemente perjudicial; de hecho, existe abundante evidencia que respalda los diversos efectos positivos de la vegetación. No obstante, resulta vital comprender en qué casos y circunstancias el uso de la vegetación actuará como un sumidero efectivo de contaminantes.

1.5. Diseño de techos y fachadas verdes para mejorar la calidad del aire urbano mediante la mitigación del material particulado

Esta investigación, llevada a cabo por Viecco *et al.*, tenía como objetivo principal analizar diversos diseños de techos y fachadas verdes para evaluar su eficacia en la retención de partículas PM2.5 en un barrio urbano de Santiago de Chile. Para lograr este propósito, se llevaron a cabo tres procesos previos: la creación de un modelo de validación, la elaboración de un modelo para determinar el diseño óptimo de la cobertura de techos y fachadas verdes, y, finalmente, el desarrollo de un modelo que abarcaba 16 cuadras alrededor de una estación meteorológica en Santiago de Chile [1].

En cuanto al primer modelo, se verificó que los datos recolectados por la estación meteorológica y de calidad del aire concordaban de manera satisfactoria con los proporcionados por ENVI met, basándose en la cantidad de flujo vehicular. Esta correlación positiva se tradujo en un valor de R2 de 0.61 [1]. En relación con el segundo modelo, centrado en los techos, se evaluaron coberturas vegetales del 25, 50, 75 y 100% en edificios de 5, 10, 20 y 30 metros de altura. Se observó una mayor reducción de las concentraciones de PM2.5 en edificios de 5 y 10 metros con una cobertura vegetal completa, mientras que en edificios de 20 y 30 metros totalmente cubiertos, no se evidenció una mejora significativa en la calidad del aire a nivel del peatón. Asimismo, en edificios de 5 y 10 metros de altura, no se observó una reducción significativa del PM2.5 en coberturas del 50, 75 y 100% [1]. Finalmente, para el tercer modelo, ellos utilizaron esta superficie óptima de techos y fachadas verdes, y

recrearon 16 cuadras del centro de Santiago de Chile, en donde compararon los edificios sin cobertura vegetal versus los edificios con cobertura vegetal. En los edificios con vegetación, se evidenció una reducción de PM2.5 de hasta el 15% en todos los casos. A medida que aumentaba la superficie verde en las paredes, se observaron mejoras marginales en la disminución de contaminantes, siendo el 25% de superficie la óptima para mejorar la calidad del aire a nivel del peatón [1].

En síntesis, los investigadores al juntar ambos estilos de vegetación, observaron que los niveles más altos de contaminantes se encontraron dentro de los cañones de las calles y la concentración disminuye mientras esté lejos de la fuente. Por otro lado, los techos verdes funcionan mejor en edificios de baja altura. En última instancia, al comparar ambos estilos, los autores concluyeron que las fachadas verdes son más efectivas para la reducción de PM2.5, gracias a su proximidad a la fuente de emisión y a la presencia de una mayor superficie vegetal. En consecuencia, determinaron que las reducciones de PM2.5 dependen tanto de la ubicación de la vegetación respecto a la fuente de contaminación como de la extensión de la superficie vegetal disponible.

1.6. Evaluación del papel de la infraestructura verde en la dispersión y eliminación de contaminantes cercanos a la carretera: Modelado y Medición

Esta investigación realizada por Morakinyo *et al.*, tenía como objetivo evaluar los efectos de dos tipos de barreras: barrera vegetal y muro verde sobre la calidad del aire en un tramo de carretera. Ellos querían observar como el tipo de vegetación influye en la dispersión vertical de los contaminantes cuando la altura de estas barreras varía [25].

Para lograr este objetivo, ellos usaron el software meteorológico ENVI-met para llevar a cabo diversas simulaciones en una calle adyacente a la Universidad Bautista de Hong Kong. Además, se utilizaron medidores de PM2.5 ubicados en distintos puntos de esta vía, junto con una cámara de video encargada de registrar la cantidad de vehículos que transitaban por hora en este tramo. Asimismo, se incorporaron datos meteorológicos provenientes del Centro Observatorio de Hong Kong [25].

Durante las diversas simulaciones, los investigadores observaron dos resultados que no pueden ser claramente categorizados como positivos o negativos. La implementación de una barrera vegetal conlleva a un empeoramiento de la calidad del aire a medida que se aleja de la barrera, pero mejora significativamente antes de llegar a ella [25]. Por otro lado, al instalar un muro verde, se logra una mejora en la calidad del aire después de la barrera; no obstante, antes de la barrera, especialmente a medida que ascendemos en altura vertical desde el nivel del suelo, la calidad del aire experimenta un deterioro, generando vórtices que recirculan el aire y aumentan la concentración de contaminantes [25].

En este contexto, resulta crucial definir el propósito detrás de la implementación de una Infraestructura Verde (IV) en un espacio determinado. A partir de los hallazgos de esta investigación, se puede concluir que es aconsejable emplear barreras vegetales cuando se busca mejorar la calidad del aire en áreas cercanas a las fuentes de emisión de contaminantes [25]. En contraste, si el objetivo es mejorar la calidad del aire en zonas distantes de una fuente, se recomienda el uso de muros verdes. No obstante, es necesario tener en cuenta que la implementación de un tipo de IV puede tener impactos en otras áreas. Por lo tanto, se sugiere considerar alternativas previas que mitiguen los posibles efectos adversos de esta vegetación [25].

1.7. Reducción de la efectividad de la plantación de árboles en el enfriamiento del microclima debido a la contaminación por ozono: un estudio de modelización

El estudio realizado por Wai *et al.*, el cual se enfocó en investigar los efectos del ozono troposférico en el Índice de Área Foliar (LAI) de los árboles, y cómo esto reduce la efectividad de los árboles para proporcionar enfriamiento en microclimas urbanos [26]. La investigación se llevó a cabo en dos ubicaciones en la ciudad de Hong Kong. Para alcanzar este objetivo, utilizaron el software ENVI-met para modelar escenarios que representan las condiciones más adversas, con altas concentraciones de ozono. En sus simulaciones, emplearon tres especies de árboles: *Ficus microcarpa*, *Melaleuca leucadendron* L. y *Spathodea campanulata* [26].

Para validar la precisión del modelo, se compararon los resultados de las mediciones con los datos medidos recopilados en cada zona residencial. Estos datos medidos se compararon con los resultados de las simulaciones para corroborar el modelo. Los hallazgos revelaron que el ozono troposférico afecta a los árboles, disminuyendo su capacidad para refrescar el aire. Cuando los árboles están estresados por el ozono, el aire se calienta y la temperatura de la superficie aumenta, lo que indica una disminución en la eficacia de los árboles para enfriar el entorno [26]. Además, se observó que la reducción del tamaño de las hojas de los árboles hasta en un 25% debido al estrés del ozono puede provocar una sensación de mayor calor para las personas en esas áreas, aumentando la temperatura hasta 1°C [26].

Resulta intrigante cómo las altas concentraciones de ozono troposférico no solo afectan la salud de las personas [26], sino que también generan estrés en los árboles, disminuyendo sus índices de área foliar y, por consiguiente, afectando su capacidad para reducir la temperatura ambiente. Este estudio revela la importancia de comprender que el ozono es un gas que requiere mayor atención en nuestras investigaciones. Además, sugiere que investigaciones previas en este campo han subestimado el impacto del ozono, resaltando así la necesidad de una investigación más detallada y realista sobre este tema.

1.8. El papel de la vegetación en la atmósfera urbana de tres ciudades europeas.

Parte 2: Evaluación del impacto de la vegetación en las concentraciones y deposiciones de contaminantes atmosféricos

Esta investigación, llevada a cabo por Mircea *et al.*, tuvo como objetivo principal examinar el impacto de la vegetación en la calidad del aire en tres ciudades europeas mediante el uso de modelos atmosféricos. Para lograrlo, los investigadores compararon escenarios con y sin vegetación durante varios meses tanto en invierno como en verano. En sus hallazgos, observaron variaciones en las concentraciones de contaminantes en las ciudades, lo que evidenció tanto efectos positivos como negativos [27].

En el caso de Madrid, por ejemplo, se registró una disminución de $7.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones de ozono troposférico, mientras que en Milán se observó un aumento de $+2.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Respecto al NO_2 , se encontró una disminución de hasta $-3.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Milán y un aumento de hasta $+7.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Madrid [27]. Asimismo, al analizar la cantidad de masa depositada de los contaminantes, se determinó que la presencia de vegetación conllevaba a porcentajes de masa depositada hasta un 29% mayores que en los casos sin vegetación. Sin embargo, en Madrid y Bolonia, estos porcentajes fueron menores, oscilando entre el 15% y el 20% [27].

Uno de los aspectos más interesantes de este estudio radica en que la vegetación, en ciertos escenarios, puede contribuir al aumento de los contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, en el caso del O_3 , esto podría deberse a la emisión de compuestos orgánicos volátiles por parte de la vegetación, los cuales al reaccionar con la luz y los óxidos de nitrógeno favorecen la producción de este contaminante. Sin embargo, la inclusión de vegetación sin duda favorece una mayor captura de los contaminantes, lo que en última instancia mejora la calidad del aire.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se introdujeron los conceptos clave esenciales para analizar y contextualizar los descubrimientos de este estudio. Esta información ha sido fundamental para establecer una base sólida y bien fundamentada en la presente investigación. Por último, mediante este marco teórico, se pretende establecer una conexión integral entre los conceptos teóricos y la realidad empírica, proporcionando una perspectiva clara y coherente que respalde el desarrollo de la investigación y la interpretación de los resultados obtenidos.

2.1 Capa límite atmosférica (CLA)

Esta capa pertenece a la Tropósfera, donde los gases atmosféricos están directamente sujetos a la influencia de la superficie terrestre. Factores como el arrastre por fricción, transferencia de calor, emisión de contaminantes y las alteraciones causadas por rugosidades como las edificaciones, barreras y vegetación, modifican el flujo del aire. Estos cambios generan alteraciones en los movimientos del aire, lo que puede tanto favorecer como perjudicar los fenómenos de difusión y transporte de masa y energía [8].

La Capa Límite Atmosférica (CLA) experimenta variaciones temporales: durante el día, se forman regiones de baja presión, elevando la altura de esta capa, mientras que, durante la noche, se generan áreas de alta presión, disminuyendo su altura. En las zonas de baja presión diurnas, los movimientos ascendentes provocados por el calentamiento solar elevan el aire de la capa límite a altitudes considerables. Al llegar a cierto nivel, este aire se enfría, generando un sistema de alta presión que redirige los gases fríos hacia áreas de alta presión [8]. La CLA desempeña funciones vitales, tales como: i) facilitar procesos meteorológicos fundamentales para la vida, ii) posibilitar diversos desplazamientos en el aire o en el mar, y iii) retener todos los contaminantes atmosféricos [8]. Estructuralmente, la CLA se compone principalmente de tres capas: la capa mixta, la capa residual y la capa límite estable. Estas

capas experimentan cambios en su tamaño a lo largo del día, incluso llegando a desaparecer para luego reaparecer, dependiendo de la hora del día [8] (ver figura 2.1).

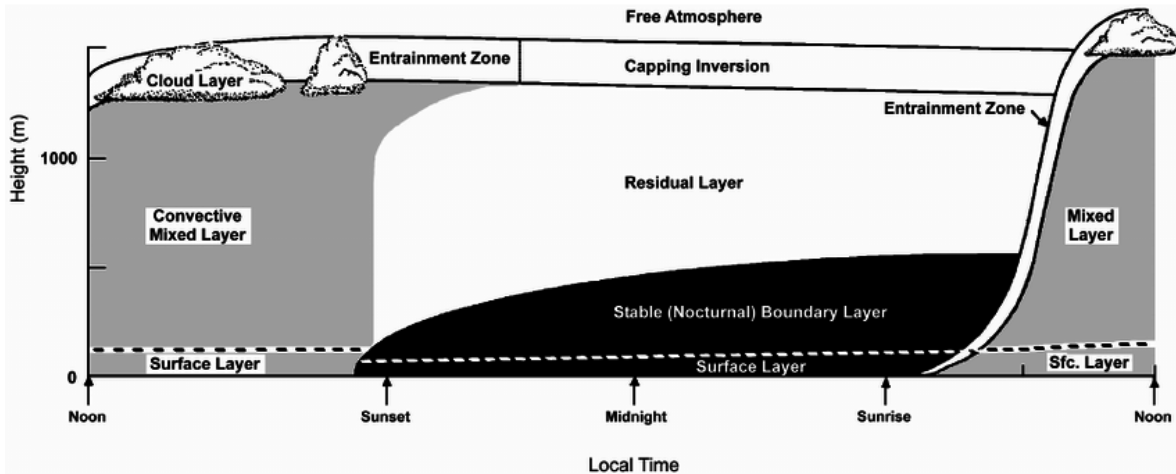


Figura 2.1: Capa Límite Atmosférica [8].

2.2 Anticiclón del Pacífico Sur

El Anticiclón del Pacífico Sur (APS) es un sistema atmosférico que se forma sobre el océano Pacífico. Este fenómeno, en conjunto con los vientos alisios, se encargan de transportar aire seco desde el océano hacia las regiones costeras de América del Sur [28]. La presencia de esta masa de aire seco contribuye significativamente a la estabilidad atmosférica en las áreas bajo su influencia [28].

La estabilidad atmosférica inducida por el APS tiene importantes implicaciones. Una atmósfera estable favorece la disminución de la velocidad de los vientos, lo que resulta en un transporte menos eficiente del calor y diversos contaminantes [19]. Esta reducción en el transporte de la energía puede influir en diversos aspectos, como la distribución de la temperatura, la formación de nubes y la calidad del aire.

2.3 Vientos y flujos turbulentos

Los vientos son corrientes de aire, generados por las fluctuaciones en las presiones atmosféricas, constituyen la principal fuerza impulsora del transporte de elementos como la humedad, el calor y los contaminantes. Estos vientos se clasifican en tres componentes distintos: el viento promedio, las ondas y la turbulencia [8].

El viento promedio es el responsable principal del transporte horizontal o también llamado como advección, tiende a ser más lento cerca de la superficie, mientras que los vientos medios verticales tienden a aproximarse a cero [8]. Las ondas, más notables cuando la capa residual de la CLA es más extensa, suelen transportar limitadas cantidades de calor, humedad y contaminantes, pero destacan en el transporte de energía e impulso. Estas ondas se generan a partir de las cizallas del viento promedio causadas por obstáculos [8]. En cuanto a la turbulencia, caracterizada por el movimiento aleatorio del fluido, sigue patrones desordenados que forman trayectorias sinuosas, generando remolinos. Cuando la radiación solar calienta la superficie del suelo, se originan corrientes de aire cálido conocidas como "termales", las cuales ascienden debido a su baja densidad y crean remolinos verticales. La turbulencia también puede generarse cuando los vientos chocan contra obstáculos como edificios, árboles o montañas, desviando el flujo y provocando estelas turbulentas adyacentes [8]. La importancia de la turbulencia radica en su capacidad para transportar contaminantes, calor, humedad, masa y energía, siendo una característica fundamental de la CLA que la distingue de otras capas atmosféricas [8].

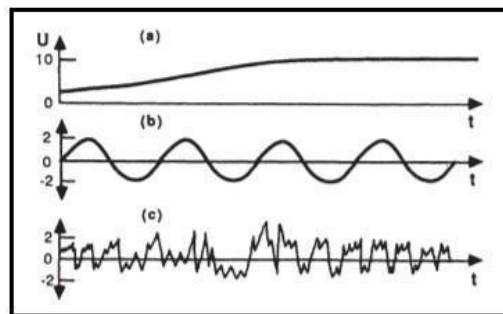


Figura 2.2: Viento promedio (a), ondas (b) y turbulencia (c) [8].

2.4 Ecuaciones de conservación de la Capa Límite Atmosférica

En el análisis de la Capa Límite Atmosférica (CLA), las ecuaciones de conservación son esenciales para comprender y modelar el comportamiento del flujo del aire. Estas ecuaciones son indispensables para estudiar y explicar los diversos fenómenos que tienen lugar en esta crucial capa atmosférica. Por lo tanto, es imperativo emplear una variedad de ecuaciones de la mecánica de fluidos que describan el comportamiento de los gases que constituyen la CLA. A continuación, se presentan las ecuaciones más relevantes:

2.4.1 Ecuación de estado (leyes de los gases ideales)

La ecuación de estado de los gases es aquella que describe el estado de los gases, relacionando diversas propiedades como la presión, volumen, temperatura y masa de un gas específico [8].

$$PV = nRT \quad (\text{II.1})$$

Donde P es la presión del aire, V es el volumen, n es la cantidad de determinado gas, R es la constante de los gases ideales y T es la temperatura [8].

2.4.2 Conservación de momento

La ecuación establece que la variación temporal de la velocidad, sumada al producto punto entre la velocidad y el gradiente de la velocidad, es equivalente a la suma de las fuerzas externas que inciden sobre el fluido. Dichas fuerzas externas pueden abarcar la presión, el gradiente de presión, la influencia gravitatoria, y otras fuerzas exteriores relevantes [8].

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \mu \nabla^2 v \quad (\text{II.2})$$

Donde:

- $\frac{\partial v}{\partial t}$: Tasa de cambio temporal del vector de velocidad
- $(v \cdot \nabla)v$: Producto escalar entre el vector de velocidad v y el operador delta aplicado a la velocidad
- $-\frac{1}{\rho} \nabla p$: Gradiente de presión, escalado por el inverso de la densidad
- g : Vector de aceleración gravitatoria.
- $\mu \nabla^2 v$: Término de viscosidad que representa los efectos viscosos en el flujo

2.4.3 Conservación de la masa

La relevancia de esta ecuación se manifiesta en su papel fundamental para la comprensión de los fenómenos atmosféricos. Su formulación precisa establece que la masa, componente esencial de la atmósfera, no experimenta cambios en su cantidad total; en cambio, se somete a procesos de transformación dentro del sistema atmosférico [8].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (\text{II.4})$$

Donde:

- $\frac{\partial \rho}{\partial t}$: Tasa de cambio temporal de la densidad
- $\nabla \cdot (\rho v)$: Divergencia del producto entre la densidad ρ y el vector de velocidad v

2.4.4 Conservación de la humedad

Esta ecuación expone que la cantidad específica de agua, tanto antes como después de una reacción, permanece constante [8].

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (vq) = E - P \quad (\text{II.5})$$

Donde:

- $\frac{\partial q}{\partial t}$: Tasa de cambio temporal de la densidad de vapor de agua.
- $\nabla \cdot (vq)$: Divergencia del flujo de vapor de agua.
- E : Tasa de evaporación o ganancia de vapor de agua
- P : Tasa de precipitación o pérdida de vapor de agua debido a la condensación.

2.4.5 Conservación de la energía

Esta ecuación postula que la energía total de un sistema dado se conserva con el tiempo, aunque puede experimentar transformaciones hacia otras formas de energía [8].

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E v) = -\nabla \cdot q + \rho g \cdot v + \dot{Q} \quad (\text{II.6})$$

Donde:

- $\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}$: Tasa de cambio temporal de la densidad de energía.
- $\nabla \cdot (\rho E v)$: Divergencia del flujo de energía convectiva.
- $-\nabla \cdot q$: Divergencia del flujo de calor conductivo.
- $\rho g \cdot v$: Trabajo realizado por la gravedad.
- \dot{Q} : Tasa de generación o disipación de calor.

2.4.6 Conservación de una cantidad escalar

Esta ecuación establece que la concentración específica de un escalar, tanto antes como después de una reacción, permanece constante [8].

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi v) = S + \nabla \cdot (p \cdot v) \quad (\text{II.7})$$

Donde:

- $\frac{\partial \phi}{\partial t}$: Tasa de cambio temporal de la cantidad escalar (ϕ)
- $\nabla \cdot (\phi v)$: Divergencia del producto entre ϕ y el vector de velocidad
- S : Fuente o sumidero de la cantidad escalar
- $\nabla \cdot (p \cdot v)$: Representa el trabajo realizado por las fuerzas de presión.

2.4.7 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones fundamentales que rigen el flujo del aire son las ecuaciones de Navier-Stokes, derivadas de los principios de conservación de masa, momento y energía, junto con las ecuaciones de estado de los gases ideales [8]. Estas ecuaciones representan otra manera de expresar las ecuaciones de la 2da ley de Newton o la conservación de momento, pero usando expresiones de varios tipos de fuerzas involucradas en el movimiento de los fluidos [29]. Dependiendo de los objetivos a resolver, se puede realizar diversas simplificaciones, tal es el caso de la ecuación de Bernoulli. Asimismo, la función de estas ecuaciones es comprender y describir el comportamiento de los fluidos alrededor o a través de varios objetos como los obstáculos [29]. Estas ecuaciones son complejas de resolver debido a que son ecuaciones diferenciales de segundo orden y no lineales. Por consiguiente, se hace necesario recurrir a aproximaciones y simplificaciones computacionales para obtener soluciones aproximadas.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \quad (\text{II.8})$$

Donde:

- $\frac{\partial v}{\partial t}$: Tasa de cambio temporal del vector de velocidad

- $(v \cdot \nabla)v$: Producto escalar entre el vector de velocidad v y el operador delta aplicado a la velocidad
- $-\frac{1}{\rho} \nabla p$: Gradiente de presión, escalado por el inverso de la densidad
- g : Vector de aceleración gravitatoria.
- $\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v$: Término de viscosidad que representa los efectos viscosos en el flujo

2.5 Contaminación atmosférica

La contaminación del aire surge de las emisiones descontroladas de diversos gases tóxicos, como los óxidos de carbono (COx), óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SOx), principalmente provenientes del tráfico vehicular. Además, se generan partículas contaminantes, como el material particulado [3]. A su vez, existen contaminantes secundarios, como el ozono troposférico, que se forma a partir de reacciones fotoquímicas de los NOx con la energía [3]. Estas emisiones alteran las condiciones naturales de la Capa Límite Atmosférica (CLA), afectando principalmente la salud de los peatones. Además, los obstáculos y barreras urbanas, como los edificios, modifican el flujo de los vientos, impidiendo que los contaminantes gaseosos se dispersen hacia otras áreas y provocando que queden atrapados y recirculen dentro de estas barreras [8].

En la actualidad, la contaminación atmosférica ocupa un lugar destacado en la agenda del desarrollo sostenible, y esto se debe principalmente a dos razones fundamentales: i) los contaminantes del aire son causantes de importantes problemas respiratorios y cardiovasculares; y ii) los gases de efecto invernadero, que también son contaminantes atmosféricos, retienen parte de la energía solar, contribuyendo al calentamiento de la superficie terrestre [4].

2.6 Daños respiratorios y cardiovasculares producto de los contaminantes del aire

Los gases tóxicos como el NOx, COx, el ozono troposférico, así como el material particulado, son los principales agentes causantes de daños a la salud [30]. En concentraciones elevadas, estos contaminantes ingresan fácilmente a través de las vías

respiratorias y alcanzan los pulmones [31]. En estos espacios, provocan inflamaciones alveolares y, en el caso del monóxido de carbono, pueden sustituir al oxígeno pulmonar, ocasionando hipoxia celular [31].

Actualmente, la contaminación atmosférica es una preocupación clave en la agenda del desarrollo sostenible, y esto se debe a dos motivos principales: i) los contaminantes del aire son uno de los agentes primarios que causan daños respiratorios y cardiovasculares; y ii) los gases de efecto invernadero, que también son contaminantes del aire, retienen parte de la energía solar, contribuyendo al calentamiento de la superficie terrestre [30].

2.7 Los cañones urbanos (CU)

Según el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) , los cañones urbanos se definen de manera sencilla como el espacio donde una calle determinada está limitada por edificios [32]. La característica principal de los cañones urbanos es la alteración de las condiciones atmosféricas locales, que incluyen cambios en la temperatura, en las características del viento, la retención del ruido y la modificación de la calidad del aire [8]. Estos efectos se deben principalmente a la geometría del cañón y a la naturaleza de los edificios (como el tipo de material de construcción), que pueden facilitar o dificultar la dispersión de los contaminantes del aire debido a la variación en la densidad y la obstrucción de los vientos [32]. Además, estos cañones artificiales, al interferir con los movimientos del viento, provocan la recirculación de los contaminantes en el medio, lo que aumenta su concentración [8].

TIPO DE CAÑÓN	RATIO ENTRE ALTURA Y ANCHO
Cañones poco profundos	<1
Cañones uniformes	=1
Cañones profundos	>1

Tabla 2.1: Tipo de cañón y ratio entre altura y ancho [32].

2.8 La vegetación

La vegetación representa una forma de vida capaz de atenuar los impactos y secuelas del cambio climático y la contaminación atmosférica [33]. A través de sus estomas, ubicados en las hojas, la vegetación tiene la capacidad de absorber contaminantes del aire, predominantemente cationes de compuestos químicos, y liberar aniones, como es el caso del oxígeno. En relación con las partículas suspendidas en el aire, estas quedan atrapadas en la capa cerosa de las hojas, y durante las precipitaciones, tienden a descender al suelo gracias a la acción de la gravedad [33].

2.8.1 Infraestructuras Verdes

Estas estructuras, concebidas por el ser humano, combinan elementos como edificios, muros y barreras con la vegetación, todo ello con una variedad de propósitos. Entre ellos destacan fines estéticos, la mejora de las condiciones meteorológicas locales y la reducción de los contaminantes atmosféricos. En el marco de esta investigación, se enfatizan dos tipos de Infraestructuras Verdes: los techos y las fachadas verdes, los cuales han demostrado ser efectivos. Estas no solo ofrecen beneficios ambientales, sino que también promueven la biodiversidad local y contribuyen al bienestar de la comunidad circundante [34].

2.8.1.1 Techos verdes

Los techos verdes, también conocidos como jardines de azotea, son cubiertas vegetales instaladas en la parte superior de edificios y viviendas. En la actualidad, se reconoce que esta implementación verde en las infraestructuras proporciona sombra, reduce el exceso de calor circundante y disminuye la temperatura del techo. Estos beneficios no solo pueden traducirse en ahorro energético al reducir la necesidad de utilizar sistemas de enfriamiento eléctricos [34], sino que también ofrecen otras grandes ventajas, como fomentar

la agricultura urbana, mejorar la calidad del aire, reducir el ruido urbano, aumentar la biodiversidad de especies locales, mitigar la escorrentía en entornos urbanos y embellecer el paisaje, entre otros [34].

2.8.1.2 Fachadas verdes

Conocidas también como fachadas verdes, estas son coberturas vegetales instaladas en las paredes de edificios y viviendas. Al igual que los techos verdes, desempeñan funciones clave, tales como la reducción del ruido ambiental, el embellecimiento del entorno, el control de la temperatura local y la mejora de la calidad del aire [34].

2.9 ENVI-met

ENVI-met destaca como un software especializado en la creación de modelos tridimensionales para la dinámica de fluidos computacional y la micrometeorología. Su aplicación se enfoca en el desarrollo de modelos a escala local que abordan fenómenos meteorológicos [35]. Este software considera variables clave como cañones urbanos, parámetros meteorológicos, fuentes de emisión de contaminantes, tipos de vegetación y las características específicas de cada entorno [35]. Al emplear un solucionador de flujo basado en las ecuaciones de Navier-Stokes y describir los efectos de la turbulencia mediante el modelo $k-\varepsilon$ [35].

Este software se revela como una herramienta crucial para este estudio debido a su capacidad única para simular de manera simultánea las condiciones micrometeorológicas, la dispersión y deposición de contaminantes, así como la interacción entre la vegetación, la superficie y los contaminantes, todo ello con una alta resolución espacial y temporal [35].

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Caracterización de la investigación

Siguiendo a Hernández *et al.* [36], esta investigación persigue objetivos tanto aplicativos como fundamentales. En el ámbito aplicativo, se enfoca en evaluar el impacto de los techos y fachadas verdes en la calidad del aire dentro del distrito de SJL. La implementación de estas soluciones podría ofrecer una alternativa valiosa ante la escasez de áreas verdes, como parques y jardines, en este distrito. Sin embargo, la tesis también adopta un enfoque fundamental al indagar si la efectividad de los techos y fachadas verdes no solo es evidente a gran escala (a nivel de la ciudad), sino también a escala local (a nivel de avenidas) [36].

Este trabajo aborda, además, un enfoque cuantitativo al requerir la recopilación y análisis de diversos datos numéricos. Entre estos datos se incluyen dimensiones como el ancho y la altura de los cañones urbanos, el flujo vehicular, el diámetro de las estomas, las áreas foliares, el albedo y varios parámetros atmosféricos, como la humedad, la temperatura, las características de los vientos, la calidad del aire y la radiación solar, con el fin de alcanzar los objetivos propuestos [36]. Además de estas variables cuantitativas, la investigación incorpora variables cualitativas, como el reconocimiento del tipo de suelo y el tipo de vegetación (consultar tabla 3.1).

VARIABLES CUANTITATIVAS	VARIABLES CUALITATIVAS
<ul style="list-style-type: none"> ● Ancho y altura de los cañones urbanos. ● Flujo vehicular ● Temperatura y la humedad ● Velocidad y dirección de los vientos 	<ul style="list-style-type: none"> ● Tipo de suelo ● Tipo de vegetación

Tabla 3.1: Principales variables de la investigación

3.2. Proceso de la investigación

La concepción de esta tesis se inspira en la investigación llevada a cabo por Viecco *et al.* [1]. Sus hallazgos han revelado información crucial que podría ser extrapolada a Lima, específicamente en SJL. La posibilidad de aplicar estos resultados en dicha localidad abre la puerta a una potencial solución para la carencia de áreas verdes en este distrito. Asimismo, contribuiría al enriquecimiento de las referencias teóricas sobre el impacto de los techos y fachadas verdes en la calidad del aire en entornos edificados.

En este contexto, la presente investigación se estructuró en torno a tres hitos fundamentales, desarrollados mediante el uso del software ENVI-met: i) La construcción de un modelo de validación para verificar la precisión de las simulaciones realizadas en el software; ii) La ejecución de modelos paramétricos destinados a determinar el porcentaje óptimo de techos y fachadas verdes en base a la altura de edificios y la cobertura vegetal; y iii) La elaboración de 2 modelos a escala local que abarcan 16 cuadras cercanas a la estación meteorológica. Un modelo representa el caso base, mientras que el otro incorpora los porcentajes óptimos de techos y fachadas verdes para SJL (ver Figura 3.1).

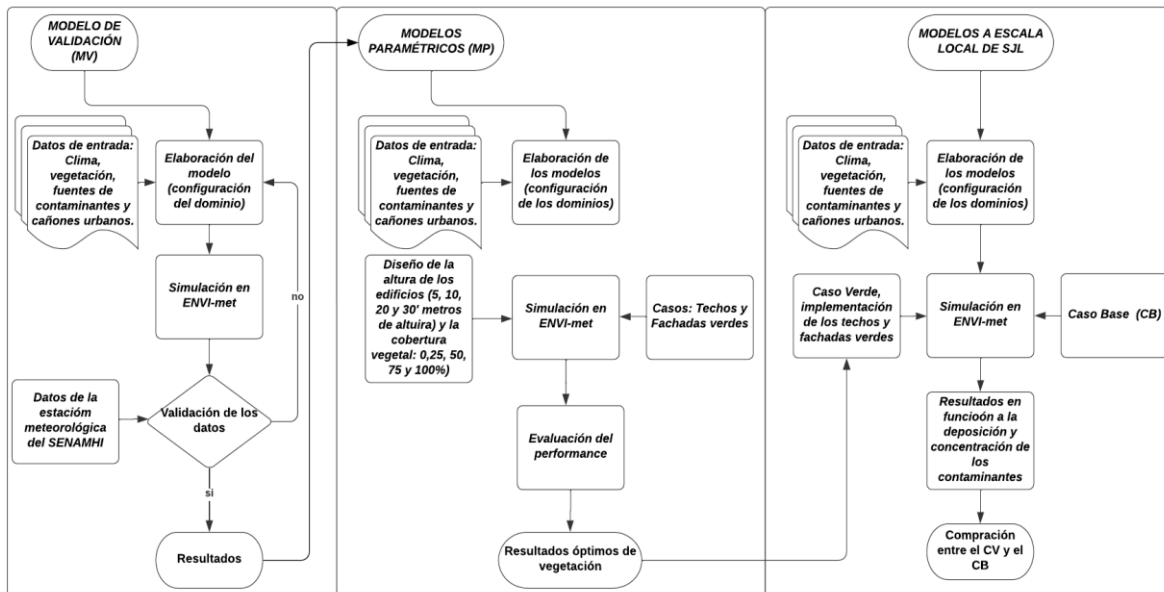


Figura 3.1: Representación esquemática de la metodología de la investigación. Modificado de [1].

3.2.1 Desarrollo del modelo de validación

El objetivo principal de desarrollar este modelo fue validar los resultados generados por el software ENVI-met. Para lograrlo, se seleccionó una manzana ubicada en las proximidades de la estación meteorológica del SENAMHI (ver Figura 3.2). Se determinó el mejor tamaño de celda para la creación de los modelos micrometeorológicos, considerando especialmente la concentración de PM_{2.5}, y se llevaron a cabo diferentes simulaciones durante 24 horas en el mes de julio de 2018. La elección del tamaño de celda ideal se basó en la duración de las simulaciones y la precisión de los resultados en comparación con los datos medidos por la estación meteorológica del SENAMHI. Posteriormente, una vez establecido el mejor tamaño de celda, se procedió a evaluar varios modelos utilizando el tamaño de celda óptimo en horas específicas del día, teniendo en cuenta la temperatura y los contaminantes atmosféricos (PM_{2.5}, NO₂ y ozono troposférico). El análisis de los resultados se llevó a cabo teniendo en cuenta la altura promedio del peatón, fijada en 1.5 metros, ya que son las personas que se encuentran cerca de las vías o fuentes de emisión las más afectadas.

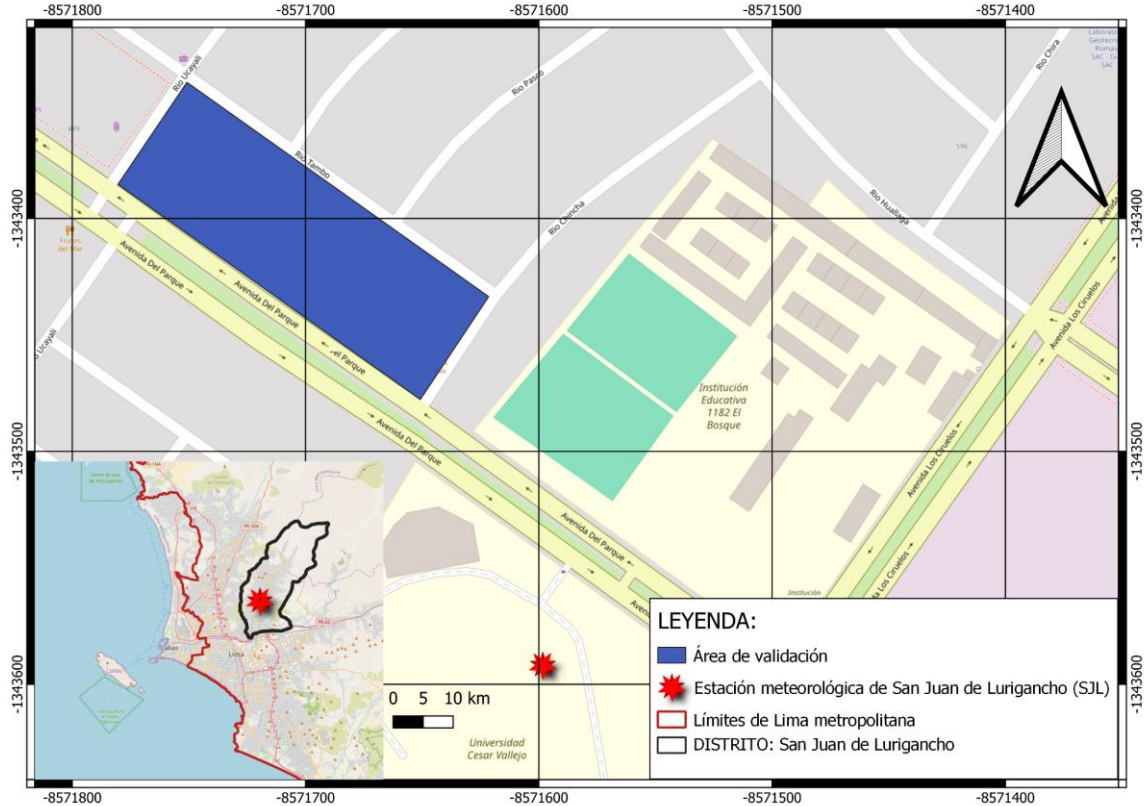


Figura 3.2: Ubicación del área de validación. Elaboración propia.

3.2.2 Creación de modelos paramétricos

El propósito de desarrollar estos modelos es determinar el porcentaje óptimo de techos y fachadas verdes en los edificios, con el objetivo de reducir las concentraciones de los contaminantes. Esto se logra considerando tanto la superficie de área cubierta por vegetación como la altura de los edificios. Se aplicaron diferentes coberturas vegetales: 25%, 50%, 75% y 100%, distribuidas en cuatro cuadras simplificadas. Estos casos representaron cuadras que incluían edificios de 5 metros (primer caso), 10 metros (segundo caso), 20 metros (tercer caso) y 30 metros (último caso). Posteriormente, se llevó a cabo un análisis comparativo de los cuatro casos, teniendo en cuenta diversas alturas y recubrimientos verdes, con el fin de evaluar su impacto en la calidad del aire y la temperatura. Una vez identificado el porcentaje óptimo de techos y fachadas verdes, así como la altura adecuada de los edificios

para que estos recubrimientos sean efectivos, se procedió a desarrollar un modelo a escala local que abarca 16 cuadras en este distrito.

3.2.3 Creación de un modelo a escala local de SJL

El propósito fundamental de este modelo es evaluar los efectos de la implementación de techos y fachadas verdes en los edificios y residencias de San Juan de Lurigancho (SJL) con respecto a la mejora de la calidad del aire. Para lograr este objetivo, se aplicó el porcentaje óptimo de techos y fachadas verdes, previamente calculado según la altura de cada tipo de edificio, en 16 cuadras cercanas a la estación meteorológica del distrito (ver Figura 3.3). Posteriormente, se realizó una comparación detallada entre el modelo convencional (caso base) y el modelo que incorpora la vegetación en el caso base, considerando las concentraciones y la masa total depositada de los contaminantes.

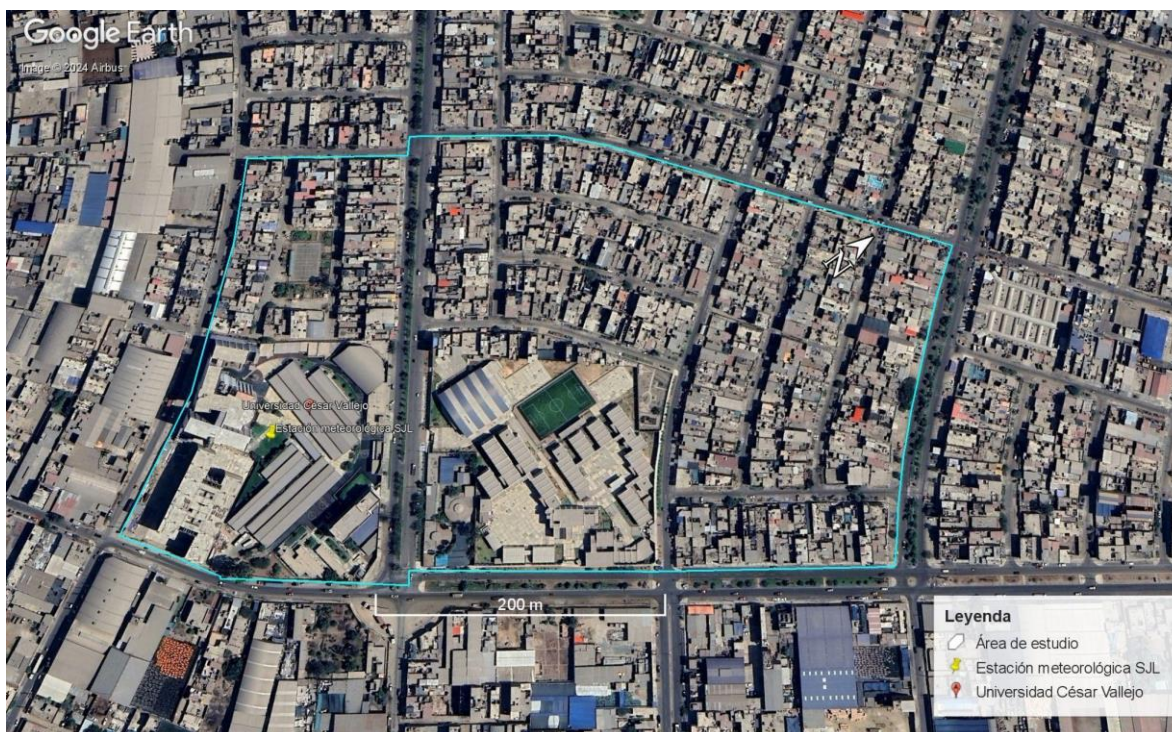


Figura 3.3: Ubicación del área de análisis. Fuente: Google Earth Pro.

3.3 Estructura del marco metodológico

3.3.1 Área de estudio

La ubicación del área de estudio se encuentra en las inmediaciones de la estación meteorológica del SENAMHI, ubicada en el distrito de San Juan de Lurigancho. Este espacio abarca un radio de 16 cuadras alrededor de dicha estación, con una extensión total de 16.9 hectáreas (ver Figura 3.3).

Este distrito experimenta temperaturas elevadas durante los meses de verano, especialmente en enero, febrero y marzo. Por otro lado, las temperaturas más bajas se registran durante los meses invernales, entre mayo y agosto (ver Figura 3.4). Además, la Figura 3.5 ilustra la humedad relativa en el distrito, destacando los meses de julio y agosto como aquellos con los valores más altos. Finalmente, la Figura 3.6 ilustra la concentración promedio mensual de PM2.5, NO2 y O3, resaltando que sus niveles más elevados se observan durante los meses de invierno, a diferencia del ozono que su concentración está directamente vinculada con la temperatura del entorno.

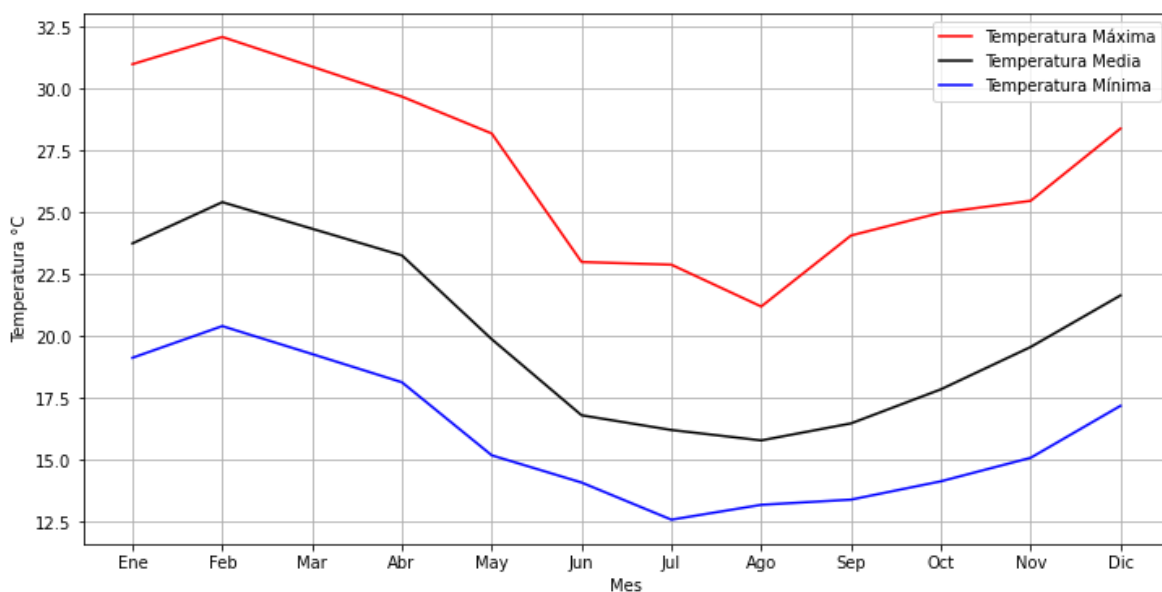


Figura 3.4: Gráfico de temperaturas máximas, medias y mínimas en S.J.L.

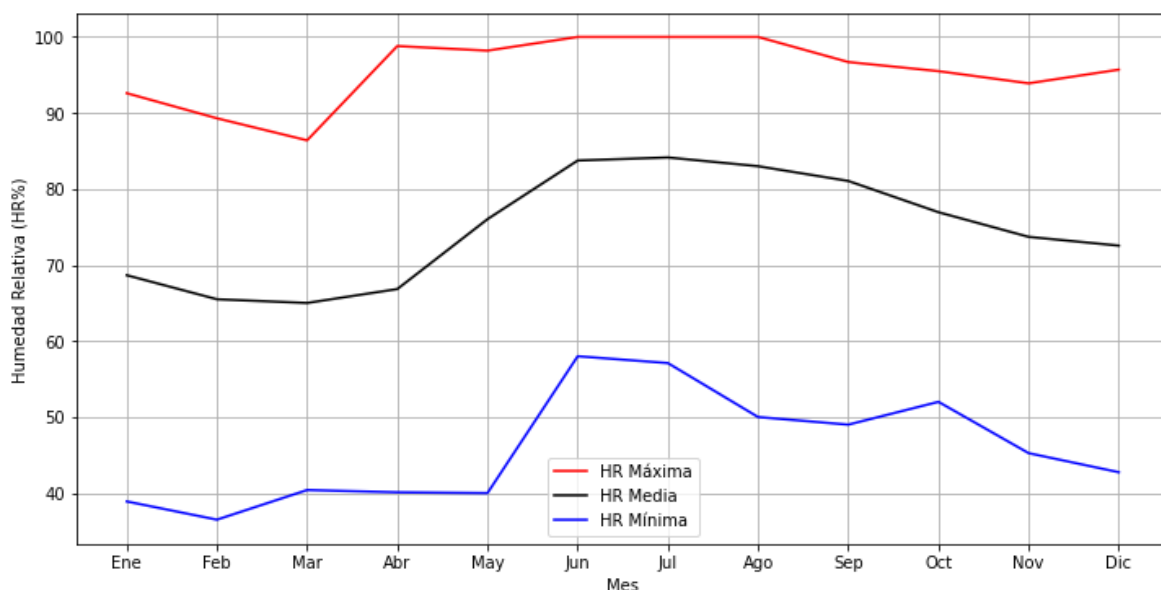


Figura 3.5: Gráfico de humedades relativas máximas, medias y mínimas en SJJL.

Debido a las restricciones y capacidades computacionales asociadas con la extensión del análisis temporal de esta investigación, se hace necesario focalizar en un mes invernal, período en el cual las concentraciones de contaminantes tienden a ser más elevadas. Julio destaca particularmente en este contexto, presentando temperaturas descendentes que pueden llegar hasta los 12.6°C, una humedad relativa del 100% (ver figuras 3.4 y 3.5), y niveles significativos de contaminantes, siendo este mes invernal el de mayor concentración de ozono (véase la Figura 3.6).

En consecuencia, la elección de julio como mes de estudio se fundamenta en las condiciones climáticas específicas de San Juan de Lurigancho, donde las bajas temperaturas propician una mayor acumulación de contaminantes. Los vientos de baja intensidad (ver figura 3.7), asociados al anticiclón del Pacífico Sur y a las temperaturas frías, dificultan el desplazamiento de muchos contaminantes, lo que resulta en su retención y circulación en el entorno.

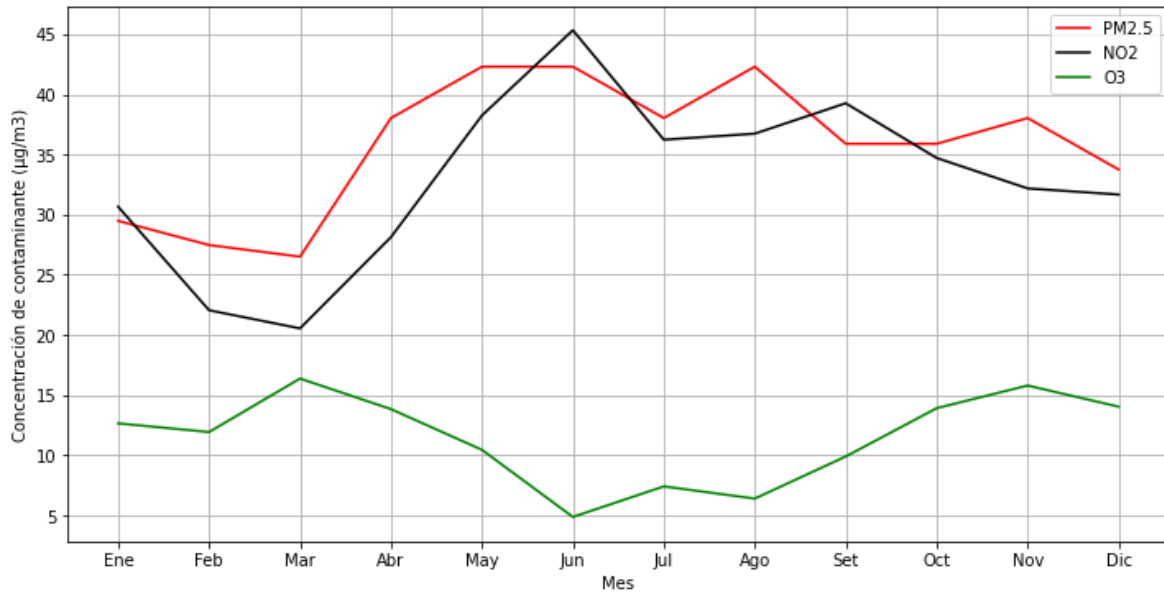


Figura 3.6: Gráfico de concentraciones mensuales de contaminantes en SJL.

La representación de la rosa de vientos durante el mes de julio se basa en estas condiciones atmosféricas específicas. Aunque el análisis se centró en este mes en particular, esto no excluye la relevancia de otros periodos para el estudio de la calidad del aire en la zona. Sin embargo, debido a la singularidad de las condiciones climáticas de julio en San Juan de Lurigancho, se consideró crucial examinar detalladamente los patrones de viento y las variables climáticas durante este periodo. Finalmente, la velocidad promedio del viento en SJL es de 1.54 m/s, con una dirección predominante desde el suroeste hacia el noreste (ver Figura 3.7).

ultrafinas [38]. Estas características hacen que la elección de estas especies sea aún más relevante en el contexto de San Juan de Lurigancho, contribuyendo no solo a la mejora de la calidad del aire, sino también al bienestar y salud de los habitantes de la zona [21].

Finalmente, otro factor determinante en la selección de estas especies fue la investigación llevada a cabo por Viecco, quien utilizó especies de la misma familia, específicamente *Sedum album*. Los objetivos de su estudio están alineados con los de esta investigación, y estas especies comparten características morfológicas similares a las analizadas en este estudio [1]. A continuación, se presenta una tabla que detalla las características de las especies seleccionadas, información esencial para la posterior implementación de techos y fachadas verdes en ENVI-met (ver tabla 3.2).

Características	Especie Vegetal	
	<i>Sedum rubrotinctum</i>	<i>Hedera helix</i>
Albedo	0.3	0.2
Emisividad	0.9	0.97
Transmitancia	0.25	0.3
Altura	0.25	0.25
Área Foliar	0.2	0.15

Tabla 3.2: Características de las especies vegetales [20,21].

3.5 Flujo vehicular en SJL

Los datos sobre el flujo vehicular se obtuvieron a través de la Organización 'Lima Cómo Vamos' y la Autoridad de Transporte Urbano (ATU), coinciden en que, las principales vías de este distrito experimentan un tránsito diario de entre 100,000 y 150,000 vehículos [39]. Es importante tener en cuenta que estos valores pueden variar según el día de la semana. Para el análisis de esta investigación, se consideraron los días laborables de lunes a viernes, ya que durante los fines de semana la cantidad de vehículos tiende a ser mucho mayor de lo estimado por esta organización.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo, se exponen con detalle los descubrimientos obtenidos, acompañados de un análisis e interpretación de los diversos modelos simulados en ENVI-met. Los resultados se han organizado y clasificado según cada objetivo específico, estableciendo un vínculo lógico entre los distintos hallazgos. Cada revelación representa una puerta abierta hacia el desarrollo del siguiente objetivo, evidenciando así la progresión y la interconexión de los logros alcanzados. Este enfoque estructurado permite una comprensión clara y contextualizada de los resultados, sentando las bases para las conclusiones y futuras investigaciones.

4.1 Optimización del tamaño de celda y evaluación de resultados en comparación con los datos de monitoreo para validar los modelos micrometeorológicos

4.1.1 Creación del área de validación en ENVI-met y optimización del tamaño de celda

Se replicó el área de validación en ENVI-met, como se observa en la Figura 4.1. En este modelo, el objetivo principal fue determinar el mejor tamaño de malla, teniendo en cuenta factores como la velocidad del proceso de simulación, el nivel de detalle, los recursos computacionales y la precisión de los resultados. Para lograrlo, se eligieron tres tamaños de malla distintos: 3, 5 y 10 metros. En este contexto, se llevó a cabo una comparación detallada entre los resultados de la concentración de PM_{2.5} obtenidos y los datos de calidad del aire provenientes de la estación meteorológica de SJL.

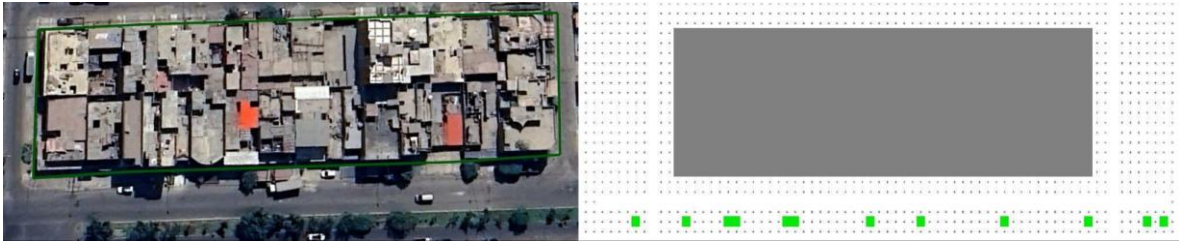


Figura 4.1: Visualización del dominio del modelo y optimización del tamaño de celda. Imagen de Google Earth. Visualización en ENVI-met.

La Figura 4.2 presenta los valores promedio diarios de PM_{2.5} para el mes de julio. En este gráfico, se observa que los resultados de los modelos simulados con diferentes tamaños de malla siguen una tendencia similar a los valores reales registrados por la estación meteorológica. Los picos de las concentraciones de este contaminante ocurren entre las 6 y 9 a.m., y entre las 4 y 9 p.m., respectivamente. La concordancia encontrada sugiere que el modelo es altamente sensible a los cambios en el flujo vehicular y puede reproducir de manera efectiva los patrones de emisión relacionados con las horas de mayor congestión en la ciudad. El modelo, al incorporar los factores meteorológicos, el flujo vehicular y las características del área de validación, logra reproducir los picos de concentración de PM_{2.5} observados durante las horas de la mañana y tarde, momento en el cual se registran los niveles más altos de tráfico vehicular y, por ende, mayores emisiones de contaminantes.

Los resultados obtenidos siguen una tendencia similar a los hallados en la investigación encabezada por Taleghani, quien encontró resultados similares en su estudio. A pesar de forzar algunas variables, estos autores también identificaron que el modelo utilizado se ajustaba de manera destacada sólo durante las horas de la tarde [24]. Esta consistencia en los resultados sugiere que las condiciones atmosféricas y el tráfico vehicular son factores críticos que influyen en la distribución y concentración de los contaminantes. Estos factores son capturados eficazmente por el modelo ENVI-met, especialmente durante las horas de mayor tráfico y condiciones atmosféricas específicas.

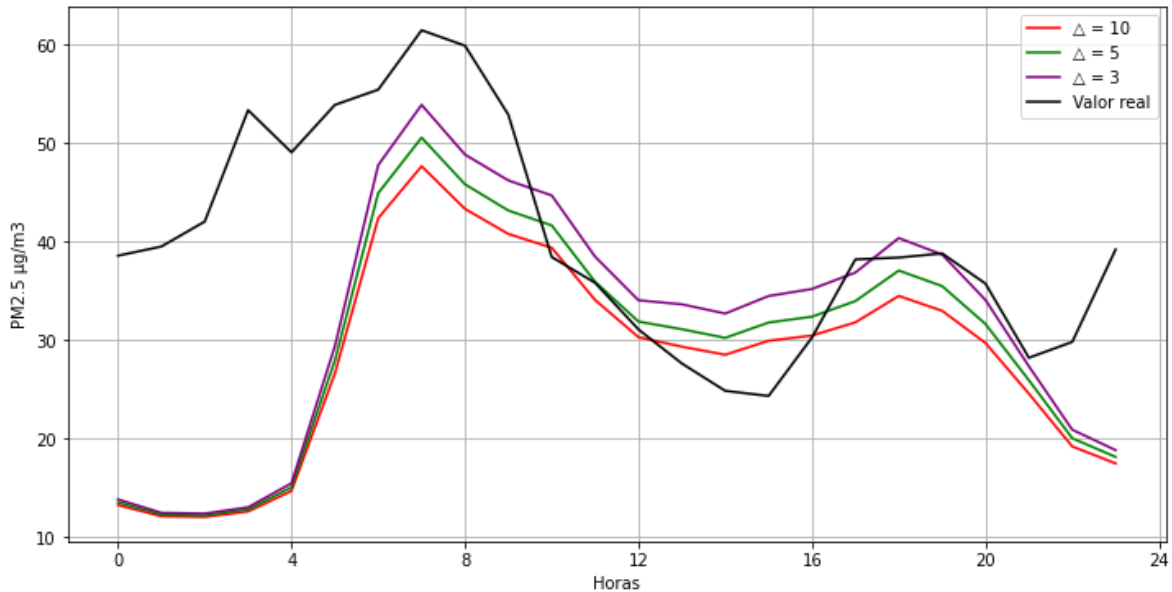


Figura 4.2: Comparación de la concentración de PM2.5 de la estación de SJL y diferentes tamaños de celda.

Para lograr una simulación más precisa de los diferentes modelos y cumplir con los objetivos de esta investigación, se hizo necesario seleccionar cuidadosamente un bloque horario específico, considerando tanto los alcances como las limitaciones del estudio. Se prioriza la elección de un período que presenta variaciones rápidas en la temperatura y la concentración de contaminantes, con el fin de ofrecer una representación más completa del ciclo diurno. Es así que se seleccionó el horario de 4 p.m. a 9 p.m. para evaluar una representación del día que incluye la temperatura máxima, que usualmente ocurre a las 4 p.m., seguida por un descenso progresivo. Esta decisión permite capturar un ciclo diario completo de variación térmica, esencial para el análisis. Además, este intervalo coincide con la mayor producción de ozono, como se evidencia en la Figura 4.9. La elección de este bloque horario también está respaldada por la consistencia observada entre los datos simulados y los registrados por la estación meteorológica, lo que refuerza la validez de esa selección.

Por otro lado, la elección del tamaño óptimo de la celda no puede depender únicamente de la evaluación visual; es crucial realizar pruebas de error que confronten los

resultados con los datos reales provenientes de la estación. La Tabla 4.1 detalla el porcentaje de error asociado a cada tamaño de celda durante diferentes momentos del día, tomando como referencia los registros de la estación meteorológica de SJL. Es importante señalar que la celda de 3 metros mostró el menor porcentaje de error, el cual fue del 5.15%.

En la investigación de Taleghani, se observó un porcentaje de error del 7.12% al comparar los datos observados con los simulados [24]. En contraste, *Park et al.* registraron un porcentaje de error significativamente mayor, alcanzando el 16.04% [40]. Ambos estudios emplearon modelos de validación desarrollados en ENVI-met, evidenciando errores que superan incluso el 5.15% reportado en esta investigación. Esta comparativa destaca la precisión relativa de nuestro estudio frente a investigaciones previas en el campo. Este valor confirma una buena precisión de los modelos micrometeorológicos elaborados con diferentes tamaños de celdas. Estos datos resaltan la importancia del error como indicador de la exactitud de las simulaciones, especialmente en la predicción micrometeorológica, donde existe naturalmente un margen de error. Sin embargo, su utilidad radica en la capacidad de discernir tendencias y patrones en los resultados.

HORA	X=10	X=5	X=3
4 p.m	0.65	6.99	14.0
5 p.m	16.8	11.1	3.62
6 p.m	10.2	3.45	4.91
7 p.m	15.0	8.56	0.29
8 p.m	16.9	11.5	4.89
9 p.m	12.9	8.09	3.15
Promedio	12.1	8.28	5.15

Tabla 4.1: Porcentaje de error entre los resultados por tamaño de grilla y los valores reales.

En síntesis, los resultados de este estudio respaldan la eficacia del software de simulación ENVI-met para ajustarse a las condiciones específicas de San Juan de Lurigancho durante julio. Destaca especialmente su rendimiento durante la tercera semana, entre las 4 p.m. y las 9 p.m. (el período de validación). Estos hallazgos validan tanto las condiciones meteorológicas como los niveles de contaminantes atmosféricos, proporcionando una base sólida para continuar con futuras simulaciones y alcanzar los objetivos específicos 2 y 3.

4.1.2 Validación de los modelos en función a variables meteorológicas y calidad del aire

ENVI-met es un modelo de simulación numérica que se fundamenta en los principios físicos clave, empleando las ecuaciones de conservación de la capa límite atmosférica (CLA) para analizar el microclima urbano [41]. Este modelo utiliza la conservación de la energía como principio fundamental para estimar la temperatura y humedad relativa, calculando la distribución de estas variables mediante la ecuación de advección y difusión. La conservación de la energía en el contexto del modelo ENVI-met considera una variedad de tipos de radiación, incluyendo las ondas cortas y largas con respecto a la sombra, así como la re-radiación de los sistemas de construcción y la vegetación. Además, el modelo incorpora los efectos de la transpiración, evaporación y el flujo de calor de la vegetación, junto con los sumideros de calor y vapor, como la superficie del suelo y la vegetación [41].

En cuanto a la determinación de las concentraciones de gases y partículas contaminantes, ENVI-met emplea las ecuaciones combinadas de advección y difusión. Estas ecuaciones incluyen tanto las fuentes como los sumideros, integrándose en la ecuación de “conservación de una cantidad escalar”. Por consiguiente, el modelo ENVI-met tiene en cuenta la sedimentación en superficies y vegetación, abordando así la dinámica completa de la dispersión de contaminantes en el entorno urbano [41].

Finalmente, para validar los modelos desarrollados con la resolución de grilla previamente determinada (3 metros), fue fundamental realizar una comparación de los resultados obtenidos con los datos registrados por la estación meteorológica en función a las siguientes variables: temperatura, humedad relativa, PM2.5, NO2 y O3. Con el propósito de asegurar la precisión de esta comparación, se han empleado métricas de calidad de resultados, tales como la correlación lineal y el error cuadrático medio (MSE). Estas métricas no solo brindan una evaluación cuantitativa de la coherencia entre las predicciones del modelo y las observaciones reales, sino que también respaldan la fiabilidad de los resultados obtenidos. Además, al igual que en la determinación del porcentaje de error de las simulaciones, se llevó a cabo un análisis segmentando las horas entre las 4 y las 9 p.m. por las razones previamente señaladas (horario de validación). Finalmente, se consideró la altura promedio del peatón, 1.5 metros, para los resultados de los modelos desarrollados, dado que los peatones son los principales afectados por la mala calidad del aire. Esta decisión garantiza que la evaluación sea relevante para la exposición humana en entornos urbanos.

4.1.2.1 Temperatura

La figura 4.3 resalta una tendencia similar en los valores de ENVI-met y la estación meteorológica. No obstante, se observan los valores más altos, específicamente entre las 11 a.m. y las 3 p.m. Este hallazgo concuerda con los resultados obtenidos por Taleghani [24], quien también señaló que, durante este intervalo horario específico, el modelo no se ajusta adecuadamente a la realidad observada. La correlación lineal obtenida para la comparación fue de 0.98, indicando una fuerte relación entre las dos series de datos, mientras que el MSE fue de $0.92 \text{ } ^\circ\text{C}^2$, sugiriendo una buena precisión general en las predicciones del modelo.

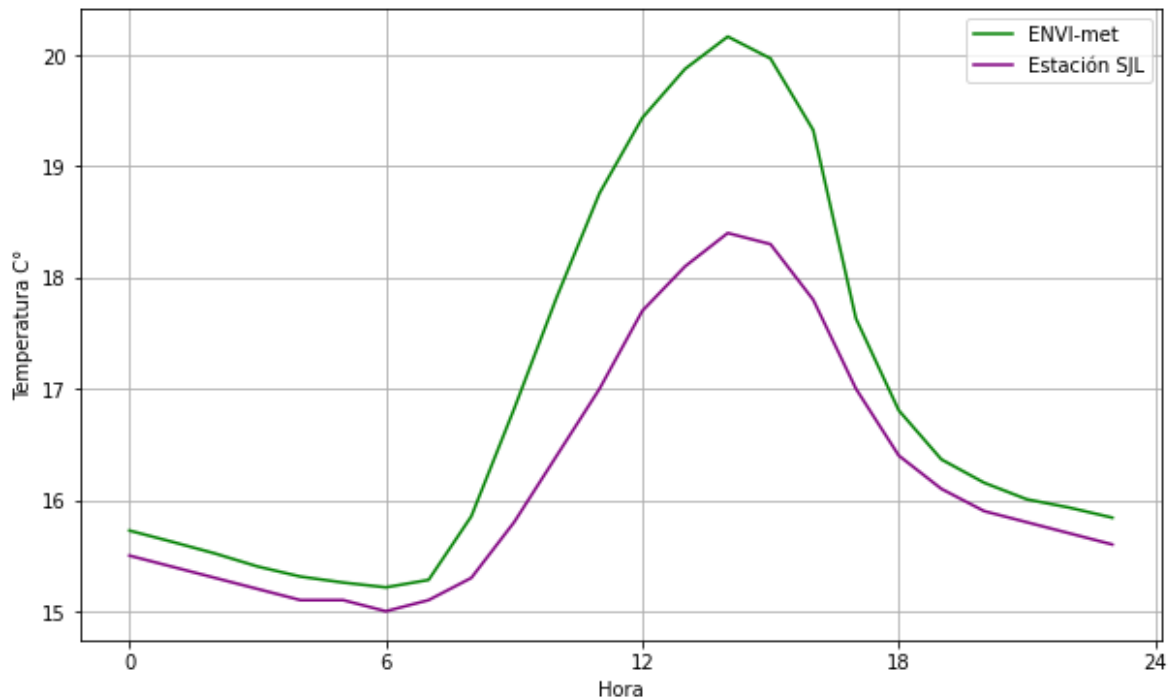


Figura 4.3: Comparación de temperaturas entre la estación de SJL y ENVI-met.

Es en ese sentido que, en la figura 4.4, se presenta una sección específica extraída de la figura 4.3, focalizada en el horario de validación. En este gráfico, se destaca claramente que los valores del modelo y la estación exhiben una tendencia muy parecida. El valor de la correlación lineal mejora, alcanzando un valor de 0.99, mientras que el MSE disminuye hasta un valor de $0.44 \text{ } ^\circ\text{C}^2$. Estos resultados subrayan la coherencia y precisión del modelo durante el período de tarde-noche, respaldando su capacidad para proporcionar estimaciones confiables en condiciones específicas de tiempo.

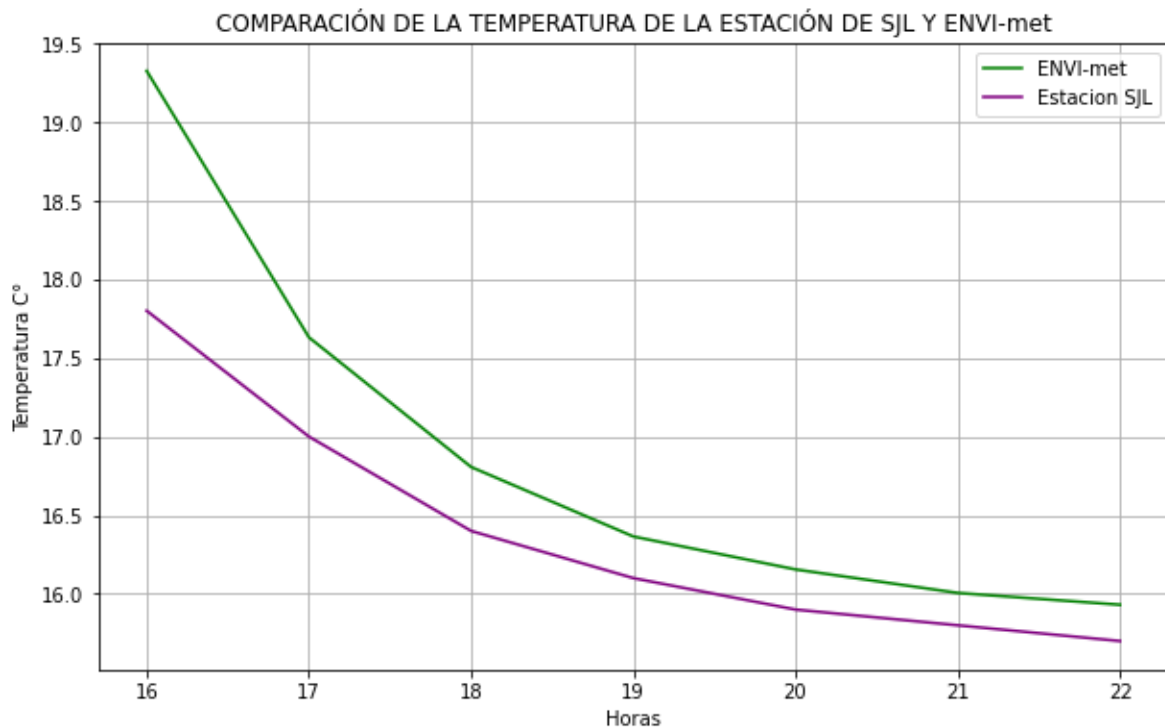


Figura 4.4: Comparación de temperaturas entre la estación de SJL y ENVI-met en el horario de validación.

4.1.2.2 Material Particulado PM2.5

Para evaluar la precisión del modelo ENVI-met en la simulación de contaminantes atmosféricos durante julio, el mes se dividió en cuatro semanas. Esta segmentación respondió a las variaciones observadas en los datos, así como a las limitaciones de esta investigación. Se calcularon promedios horarios de las concentraciones de contaminantes para cada periodo, tomando en cuenta la variabilidad del flujo vehicular. Este método permitió identificar la semana con mejor alineación entre los valores simulados y los datos reales obtenidos de la estación meteorológica. Para asegurar la fiabilidad de los resultados, la concordancia entre los valores simulados y observados se evaluó utilizando dos métricas de calidad: la correlación lineal y el error cuadrático medio (MSE).

La Figura 4.5 muestra los resultados semanales de las simulaciones comparadas con los datos de PM_{2.5} de la estación meteorológica. Se observa una tendencia consistente a lo largo del mes, destacándose correlaciones más elevadas entre la segunda y tercera semana. Para validar estos hallazgos, se calculó el error cuadrático medio (MSE), cuyos valores están detallados en la Tabla 4.2. Además, se evidencia una correlación positiva entre el incremento de los niveles de PM_{2.5} y las horas pico de tráfico.

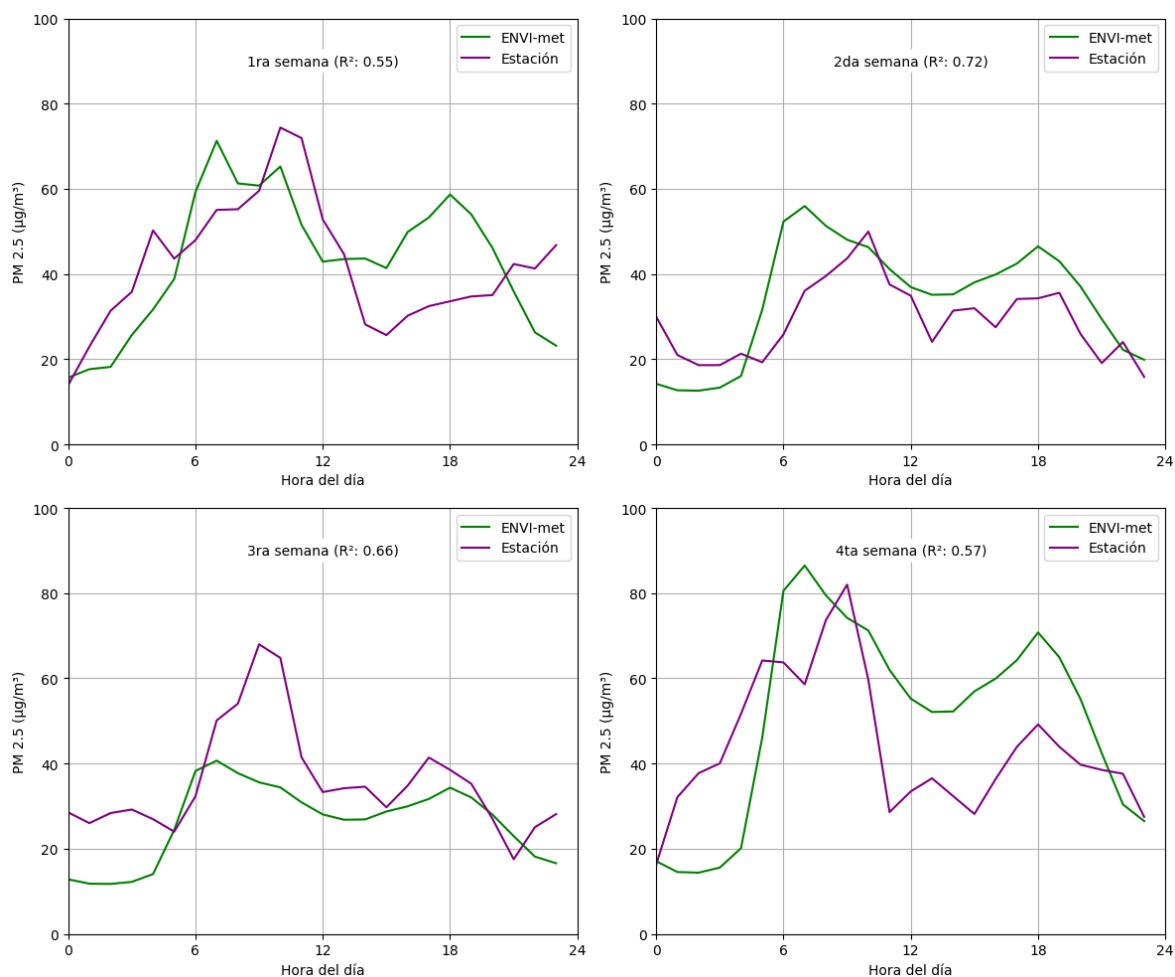


Figura 4.5: Gráfico comparativo entre los valores de PM_{2.5} en ENVI-met y la estación por semana.

Número de Semana	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
Primera	206.3
Segunda	112.3
Tercera	173.08
Cuarta	387.34

Tabla 4.2: Cuadro del error cuadrático medio del PM2.5 por semana en el horario de validación.

A pesar de considerar a la 2da y 3ra semana como aquellas que poseen las mejores correlaciones y los menores MSE en comparación con el resto de semanas, sin embargo, el análisis debe darse en el horario de validación (4 p.m. a 9 p.m.), ya que en este intervalo se determinó que el modelo se ajusta de mejor manera a los valores reales de la estación, como se observa en la figura 4.6. Este gráfico revela un mejor ajuste durante la segunda y tercera semana, respaldado por los coeficientes de correlación de 0.77 y 0.76, respectivamente. A pesar de esto, se recurrió nuevamente al MSE (ver tabla 4.3), cuyos resultados indican que ENVI-met presenta un ajuste más preciso durante la tercera semana en comparación con la segunda.

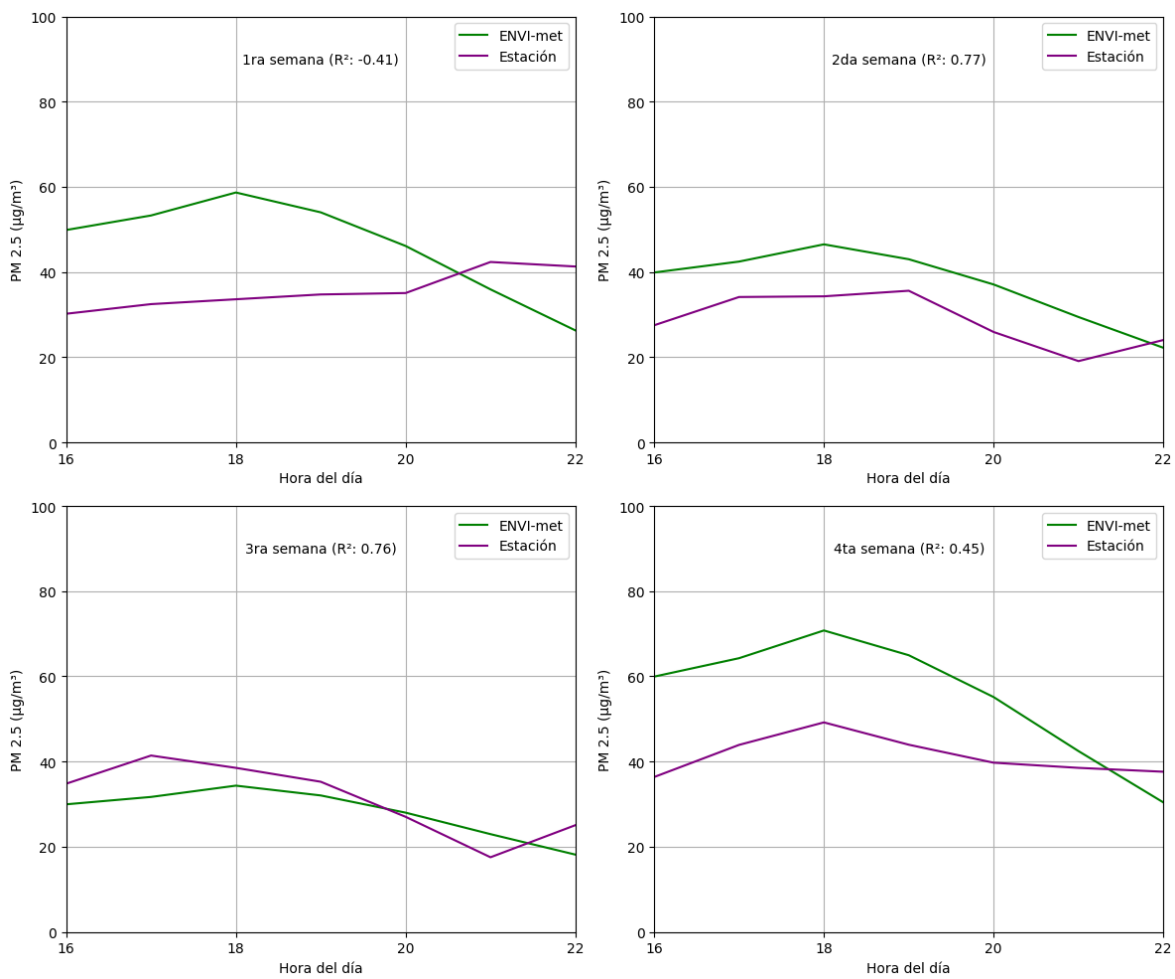


Figura 4.6: Gráfico comparativo entre los valores de PM_{2.5} en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación.

Número de Semana	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
Primera	269.4
Segunda	83,4
Tercera	33.8
Cuarta	364.6

Tabla 4.3: Cuadro del error cuadrático medio del PM2.5 por semana en el horario de validación.

4.1.2.3 Dióxido de Nitroeno NO₂

De manera similar al análisis del PM_{2.5}, se ha investigado el desempeño del modelo ENVI-met en relación con los gases contaminantes. La figura 4.7 presenta los resultados semanales de las simulaciones de NO₂, comparándolos con los datos obtenidos de la estación meteorológica. De esta comparativa, se destaca que las terceras y cuartas semanas muestran correlaciones relativamente altas en comparación con las dos primeras. Sin embargo, los valores de Error Cuadrático Medio (MSE), detallados en la tabla 4.4, indican que durante la primera y tercera semana el modelo reproduce de manera precisa las concentraciones observadas. Al igual que en el estudio previo, es crucial enfocar el análisis en los horarios específicos de validación.

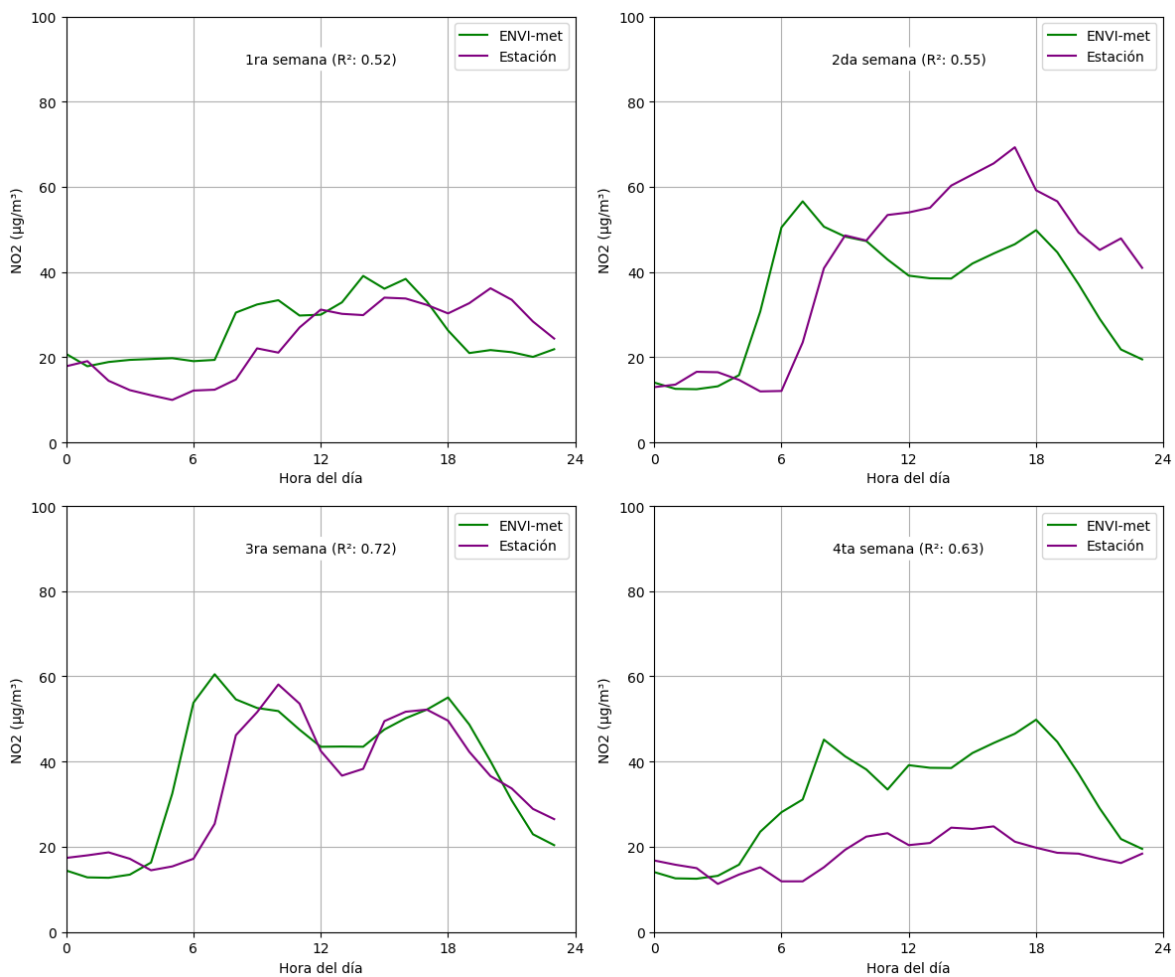


Figura 4.7: Gráfico comparativo entre los valores de NO₂ en ENVI-met y la estación por semana.

Número de Semana	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
Primera	65.22
Segunda	304.5
Tercera	139.38
Cuarta	282.15

Tabla 4.4: Gráfico comparativo entre los valores de NO₂ en ENVI-met y la estación por semana.

La figura 4.8 revela una perspectiva más detallada sobre la información presentada en la figura 4.7, indicando que la segunda y tercera semana exhiben las correlaciones más elevadas. Sin embargo, es importante destacar que la interpretación puede ser engañosa si no se consideran los detalles proporcionados por la figura 4.8. Adicionalmente, al consultar la tabla 4.5, se confirma que la tercera semana se caracteriza por poseer el MSE más bajo en comparación con las demás semanas.

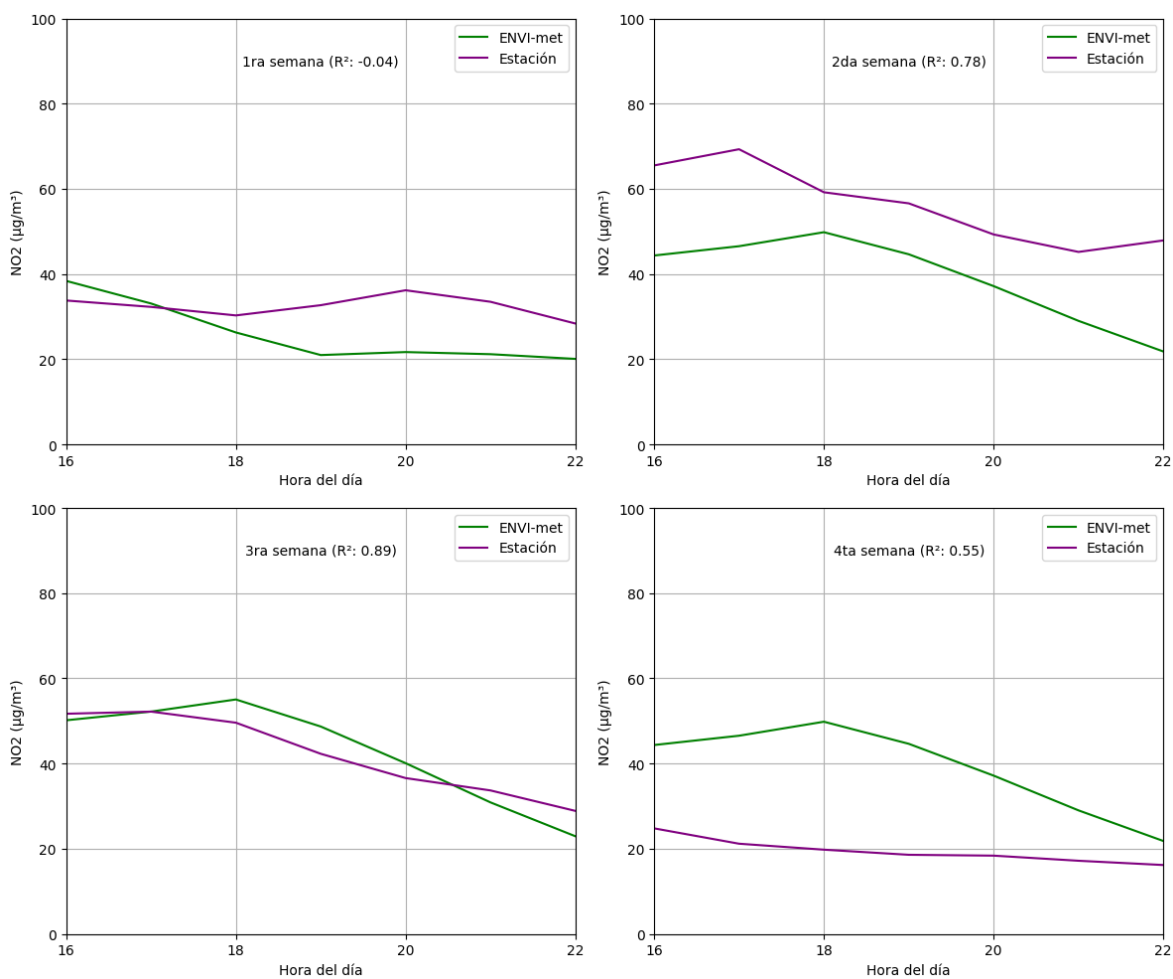


Figura 4.8: Gráfico comparativo entre los valores de NO₂ en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación.

Número de Semana	Concentración (µg/m ³) ²
Primera	65.22
Segunda	304.5
Tercera	139.38
Cuarta	282.15

Tabla 4.5: Cuadro del error cuadrático medio del NO₂ por semana en el horario de validación.

4.1.2.4 Ozono Troposférico O₃

Al igual que con su precursor, el NO₂, se realizó un análisis del desempeño de ENVI-met para estimar los valores de las concentraciones simuladas del ozono. La Figura 4.9 muestra la comparación entre los valores medidos y los valores calculados de las concentraciones del ozono troposférico. Se observa que las mejores correlaciones lineales se presentan en la 2da, 3ra y 4ta semana, sin embargo, es en la 3ra y 4ta semana donde se encuentran los valores más bajos del MSE, siendo de 5.50 y 5.88 respectivamente (ver Tabla 4.6). Para un análisis más detallado, se evaluó específicamente el horario de validación.

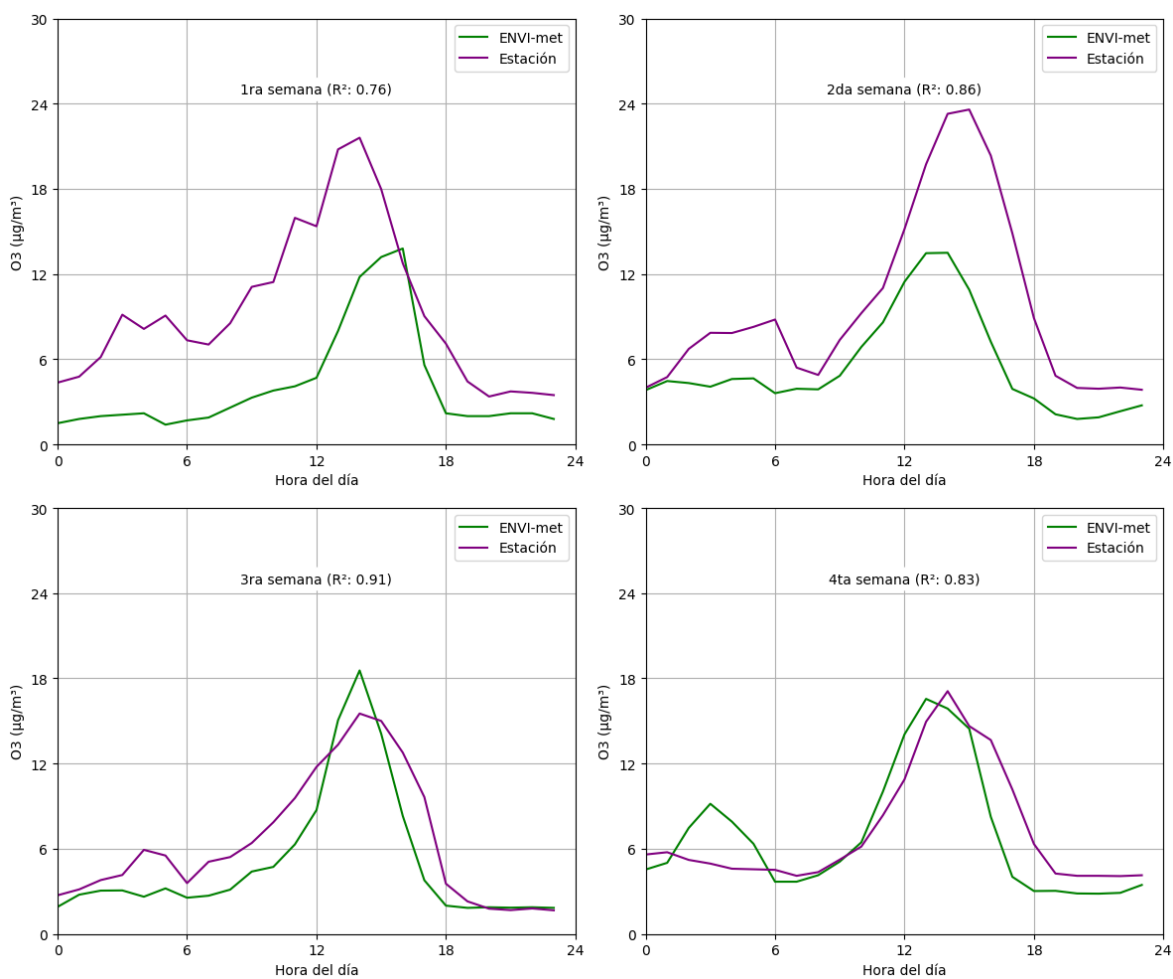


Figura 4.9: Gráfico comparativo entre los valores de O₃ en ENVI-met y la estación por semana.

Número de Semana	Concentración (µg/m ³) ²
Primera	40.8
Segunda	31.1
Tercera	5.50
Cuarta	5.88

Tabla 4.6: Cuadro del error cuadrático medio del O₃ por semana

La Figura 4.10 muestra los resultados enfocados en el horario de validación. Se observa que tanto para la 3ra como para la 4ta semana presentan correlaciones lineales similares. Sin embargo, al comparar los valores de MSE, se evidencia que en la 3ra semana (ver tabla 4.7), al igual que para el resto de contaminantes y parámetros meteorológicos evaluados en ENVI-met, muestra un buen ajuste específicamente para esta semana.

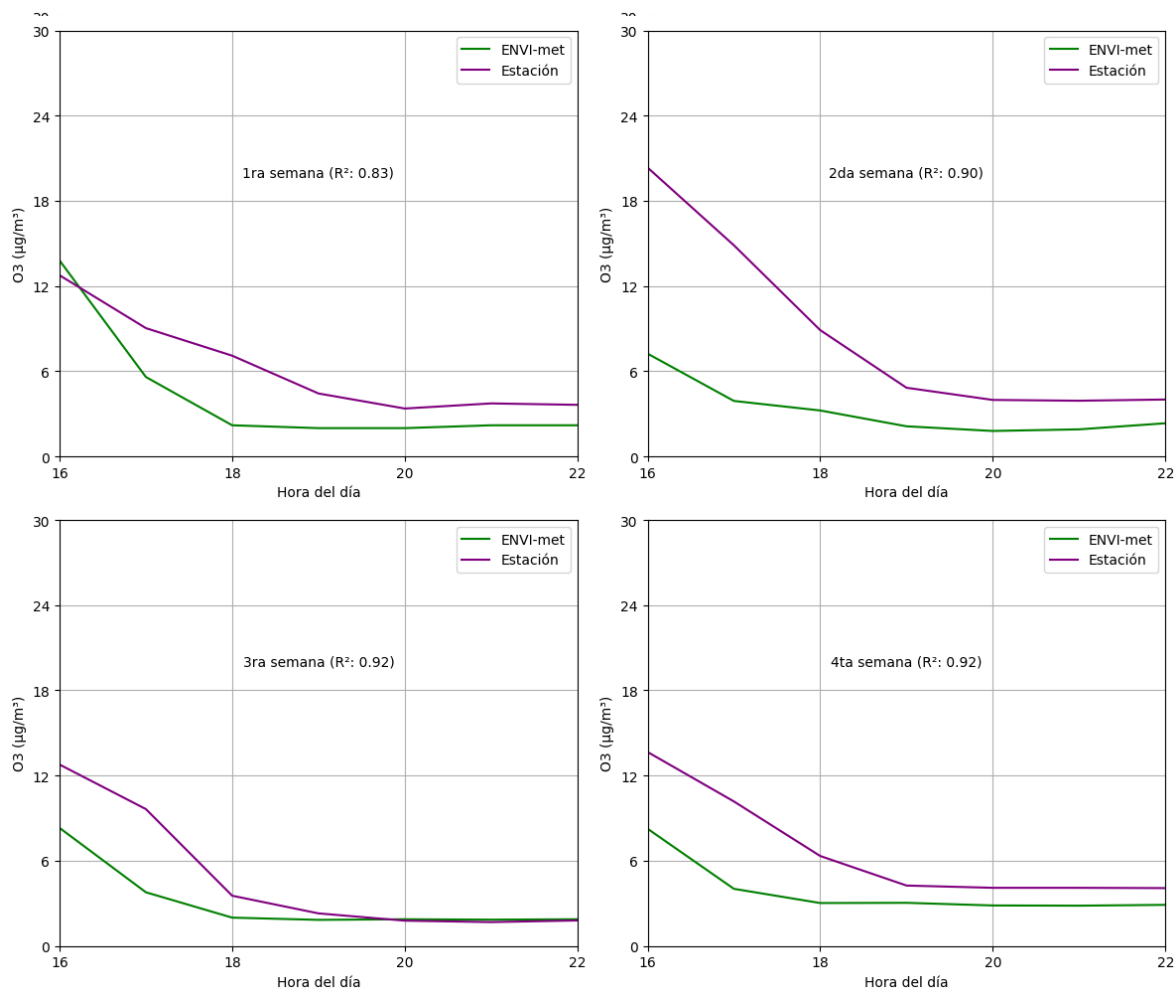


Figura 4.10: Gráfico comparativo entre los valores de O₃ en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación.

Número de Semana	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
Primera	33.1
Segunda	63.8
Tercera	6.98
Cuarta	8.81

Tabla 4.7: Gráfico comparativo entre los valores de O3 en ENVI-met y la estación por semana en el horario de validación.

En síntesis, los resultados de este estudio respaldan la eficacia del software de simulación ENVI-met para ajustarse a las condiciones específicas de San Juan de Lurigancho durante julio. Destaca especialmente su rendimiento durante la tercera semana, entre las 4 p.m. y las 9 p.m. (el período de validación). Estos hallazgos validan tanto las condiciones meteorológicas como los niveles de contaminantes atmosféricos, proporcionando una base sólida para continuar con futuras simulaciones y alcanzar los objetivos específicos 2 y 3.

4.2 Parametrización de los modelos y la búsqueda del porcentaje óptimo de cobertura vegetal sobre los edificios.

Varios estudios, incluyendo los realizados por Viecco *et al.*, Taleghani *et al.* y Currie *et al.*, han resaltado que la cobertura vegetal del 100% en edificios, ya sea en forma de fachada, muro verde o techo verde, no garantiza la mejor eliminación de contaminantes [1,24]. Viecco demostró mediante simulaciones que, a medida que aumenta la altura de los edificios y la cobertura vegetal, también puede incrementarse la concentración de contaminantes [1]. Por otro lado, Currie mencionó que las barreras verdes altas generan una mayor obstrucción al flujo del aire, lo que puede resultar en un estancamiento del mismo. Estas revelaciones plantean dudas sobre la eficacia de la estrategia de cubrir completamente los edificios con vegetación.

En este contexto, se han diseñado diversos escenarios mediante modelos simplificados, donde se han variado dos variables clave: la altura de los edificios y el porcentaje de cobertura vegetal. El objetivo principal es determinar cuáles son los porcentajes óptimos de cobertura vegetal en donde exista mayor capacidad reductora de los contaminantes atmosféricos. Para lograrlo, se emplearon boxplots como representación gráfica, los cuales muestran la variación en los parámetros meteorológicos y los niveles de contaminantes.

En la investigación de Mircea *et al.*, se destaca que incluso pequeñas variaciones en las concentraciones de temperatura y contaminantes atmosféricos, inducidas por la vegetación, tienen un impacto significativo, enfatizando la importancia vital de la infraestructura verde en la mejora de la calidad del aire urbano [27]. De manera complementaria, los estudios realizados por Viecco, Taleghani y Currie revelan que la influencia de la vegetación sobre la calidad del aire está directamente relacionada con el tamaño de las áreas verdes implementadas; a mayor extensión de estas áreas, mayores son las mejoras observadas [1,23,24]. Además, se ha demostrado que la vegetación también mitiga otros impactos urbanos como los efectos de las islas de calor, la reducción del ruido, el ahorro energético y la atenuación de los efectos negativos de las precipitaciones. Por lo tanto, la implementación de vegetación en ciudades densamente pobladas es crucial, ya que cualquier variación inducida por esta puede ser significativa [27].

Finalmente, es importante señalar que, en los boxplots, las unidades representan diferencias porcentuales entre los valores del escenario verde y el caso base. Un resultado positivo sugiere que las mediciones de variables específicas como temperatura, PM2.5, NO2 y ozono son mayores en el escenario verde que en el caso base, indicando que la vegetación no está logrando una reducción efectiva de estos contaminantes. Por el contrario, un resultado negativo señala que las concentraciones de estas variables son menores en el escenario verde, demostrando que la vegetación está funcionando efectivamente para mejorar la calidad del aire. En este estudio, se exploraron dos escenarios principales: la implementación de techos verdes y de fachadas verdes, con el objetivo de evaluar el impacto de la vegetación en la reducción de la temperatura y las concentraciones de los contaminantes.

4.2.1 Techos Verdes

4.2.1.1. Temperatura

La Figura 4.11 ilustra la variación porcentual de la temperatura como resultado de la instalación de techos verdes en comparación con los edificios sin techos verdes. Se observa que la vegetación añadida a las estructuras genera una reducción térmica en todos los escenarios examinados. Es notable que la disminución de la temperatura es más significativa en los edificios más pequeños (caso a y b) en contraste con los de mayor altura. Esto sugiere que la colocación de techos verdes cerca de la fuente de emisión produce resultados más efectivos en la reducción de la temperatura a nivel del suelo (1,5 metros).

Específicamente, para los edificios de 5 y 10 metros, el enfriamiento alcanza un 0.55% y un 0.45%, respectivamente, al optar por una cobertura vegetal completa. En cambio, para alturas de 20 y 30 metros, se reporta una reducción más pequeña, de 0.29% y 0.21%, correspondientemente. Este patrón apunta a un impacto diferenciado de los techos verdes que podría estar influenciado por la dinámica térmica asociada a la altura de las construcciones. La comparación de estos hallazgos con los de Berardi, quienes reportaron una disminución de hasta un 1.5% en la temperatura con la aplicación integral de techos verdes en un área más extensa que la de esta investigación [42], destaca la significancia de esta investigación, particularmente en edificios de altura reducida. En edificios de 5 metros, la reducción de temperatura es de hasta un 0.5%, y para aquellos de 10 metros, de un 0.4%, reflejando una reducción térmica importante. Por otra parte, los edificios más altos, de 20 y 30 metros, presentan también disminuciones considerables, con una reducción de un 0.3% y un 0.2% respectivamente, aunque estas cifras no alcancen el pico reportado por Berardi. antes mencionados.

Estas reducciones, si bien varían con la altura, muestran una eficiencia significativa de los techos verdes, superando las expectativas en el 25% de los casos más eficaces de cada grupo de altura estudiado. Tal consistencia en la disminución de la temperatura a lo largo de variadas alturas edilicias reafirma la efectividad de los techos verdes como una medida para el enfriamiento urbano.

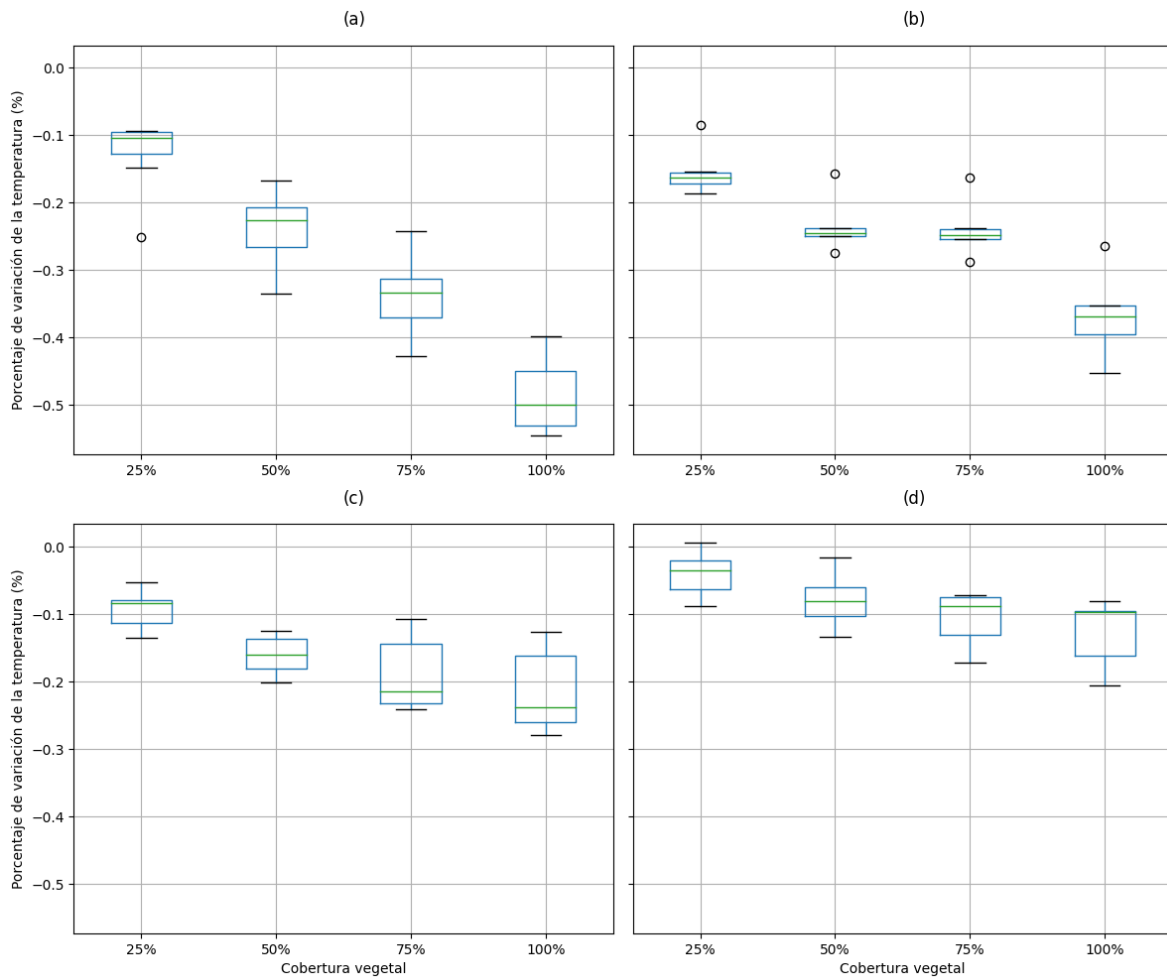


Figura 4.11: Variación de porcentaje de temperatura con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b) 10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.1.2. Material Particulado PM2.5

La Figura 4.12 presenta la variación porcentual de las concentraciones de PM2.5 en diferentes alturas y niveles de cobertura vegetal en techos verdes. En edificios de 5 metros (a), se registra una reducción aproximada del PM2.5 del 2.54% al 50% de cobertura, con variaciones mínimas para coberturas del 75% y 100% en comparación con el 50%. En edificios de 10 metros (b), la reducción es en promedio un 0.3% menor que en los de 5 metros, siendo la cobertura del 50% el escenario más efectivo. Curiosamente, las coberturas más completas no muestran un aumento proporcional en la remoción de PM2.5, sugiriendo un rendimiento óptimo en coberturas intermedias. En edificios más altos de 20 (c) y 30 metros (d), la relación entre cobertura vegetal y reducción de PM2.5 es más variable y menos predecible, incluso con aumentos en la concentración de PM2.5 en algunos casos, indicando que la altura y la interacción con el flujo de aire urbano pueden modificar la capacidad de la vegetación como filtro efectivo.

La evaluación de las variaciones en la remoción de PM2.5 en este estudio revela una clara mejora en la calidad del aire a nivel peatonal (1.5 metros) con el aumento de la cobertura vegetal en los techos verdes, especialmente en edificaciones de menor altura. Al contrastar estos hallazgos con los de Viecco *et al.*, se observa una coherencia en los rangos de cobertura vegetal más efectivos, es decir, entre el 25% y el 50%, donde ambos estudios registran altas reducciones de PM2.5 [1]. Esta tendencia puede explicarse por la proximidad de los edificios de menor altura a las fuentes de emisión de los contaminantes, mientras que, en los edificios más altos, las concentraciones de contaminantes comienzan a aumentar. Es probable que esto se deba a la distancia entre la vegetación y las fuentes de emisión de contaminantes, así como a la obstrucción del flujo de aire causada por los edificios altos, lo que conduce al estancamiento de los contaminantes.

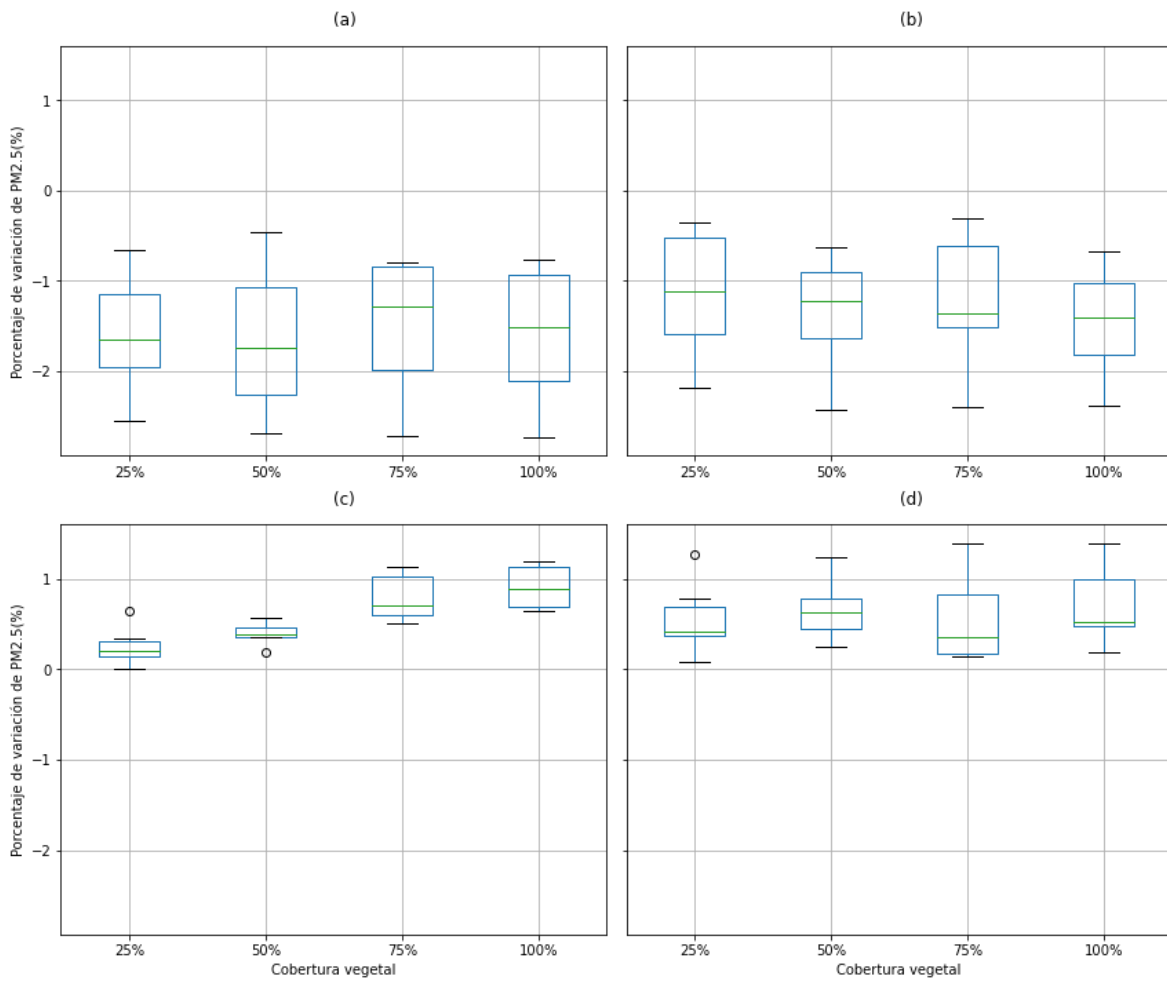


Figura 4.12: Variación de porcentaje de la concentración PM2.5 con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.1.3. Dióxido de Nitrógeno NO₂

La Figura 4.13 exhibe la variación porcentual de las concentraciones de NO₂ en diversas alturas y niveles de cobertura vegetal en techos verdes. Para las edificaciones de 5 metros de altura (a), se observa una reducción en la concentración de NO₂ a medida que aumenta la cobertura vegetal. Destaca que la máxima reducción se alcanza con una cobertura del 100%, indicando que una vegetación completa es altamente efectiva en estos entornos más bajos. Sin embargo, la diferencia en los resultados entre superficies con coberturas del 50% y 100% es de solo 0.14%, lo que sugiere la necesidad de analizar otras variables para determinar la óptima implementación en edificios de 5 metros. Por otro lado, los edificios de 10 metros (b) muestran que la presencia de vegetación sigue siendo beneficiosa, con reducciones máximas de hasta un 2.3% en la concentración de NO₂ en todos los niveles de cobertura vegetal.

Al observar los edificios de 20 metros (c), no existe una correlación predecible entre la cobertura vegetal y la disminución de NO₂. Aunque todavía hay una tendencia hacia la reducción de la contaminación con mayores coberturas vegetales, los resultados son más moderados, lo que podría ser indicativo de la influencia de los patrones de circulación del aire y de la dinámica de dispersión de contaminantes en esta altura. Finalmente, para los edificios de 30 metros (d), la relación se atenúa aún más, sugiriendo que el efecto purificador de la vegetación puede tener un límite práctico basado en la altura de la fuente. Finalmente, al comparar los hallazgos encontrados con los presentados por Currie & Bass, se puede afirmar que las variaciones encontradas en la reducción de NO₂ son significativas y alineadas con las tendencias observadas en investigaciones establecidas. En particular, los resultados presentados destacan una marcada disminución porcentual de NO₂ cuando se implementa una cobertura vegetal completa en los techos.

Finalmente, al comparar los hallazgos encontrados con los presentados por Currie & Bass, se puede afirmar que las variaciones encontradas en la reducción de NO₂ son significativas y alineadas con las tendencias observadas en investigaciones establecidas. En particular, los resultados presentados destacan una marcada disminución porcentual de NO₂ cuando se implementa una cobertura vegetal completa en los techos. Esto subraya la eficacia de los techos verdes intensivos, a pesar del alcance más limitado de nuestro estudio. De hecho, en la investigación de Currie & Bass se ha demostrado que los techos verdes intensivos pueden equipararse a más del 50% de los beneficios proporcionados por los árboles en entornos urbanos densamente poblados [23]. Así pues, este análisis respalda esta idea al mostrar que, incluso con una cobertura vegetal del 100%, se logra una alta reducción de contaminantes.

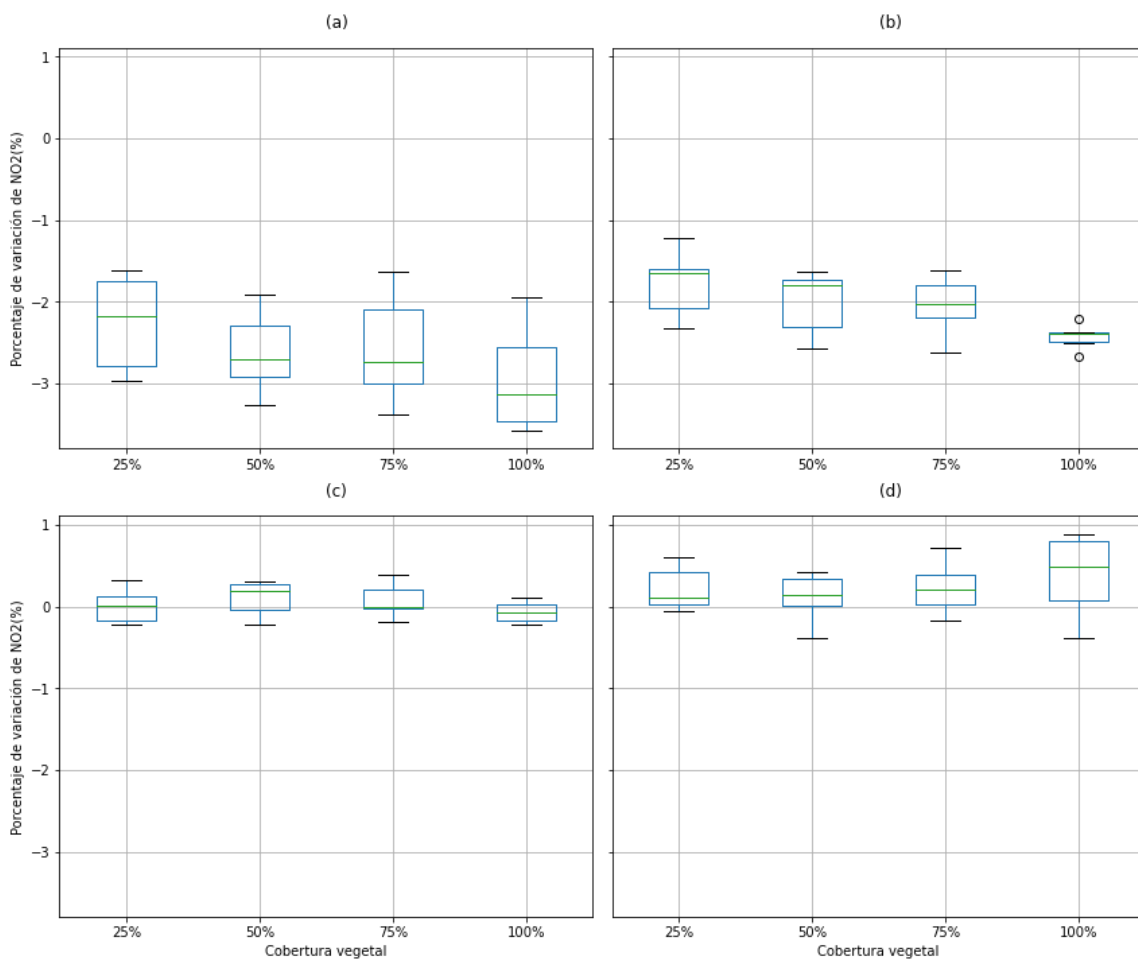


Figura 4.13: Variación de porcentaje de la concentración NO2 con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.1.4. Ozono Troposférico O₃

La Figura 4.14 muestra la variación porcentual de las concentraciones de O₃ en función de distintos niveles de cobertura vegetal en techos verdes, distribuidos por alturas de edificios. Para las estructuras más bajas de 5 metros (a), es evidente una reducción en las concentraciones de O₃ a medida que aumenta la cobertura vegetal, con la reducción más significativa observada en una cobertura del 100%. Este dato subraya la efectividad de una cobertura completa en ambientes de baja altura, aunque las diferencias entre coberturas del 50% y 100% son mínimas, lo que plantea la necesidad de considerar variables adicionales al planificar la implementación de techos verdes en estas estructuras.

En edificios de 10 metros de altura, la presencia de vegetación sigue demostrando beneficios. Al igual que en el caso de los edificios de 5 metros, las mayores reducciones en este contaminante se observan en las superficies de 50, 75 y 100, con pequeñas variaciones del 0.13%. Para las alturas de 20 metros (c), la correlación entre la cobertura vegetal y la reducción de O₃ es menos predecible. Aunque todavía existe una tendencia hacia la mejora de la calidad del aire con mayores coberturas vegetales, la magnitud de la reducción es moderada, sugiriendo que factores como los patrones de circulación del aire y la dinámica de dispersión del contaminante pueden jugar un papel crítico a esta altura. Finalmente, en los edificios más altos de 30 metros (d), la influencia de la vegetación en la reducción de O₃ se muestra aún más atenuada, lo que indica que el efecto purificador de los techos verdes podría tener un límite práctico que depende de la altura de la estructura, reforzando la idea de que la eficacia de estas soluciones verdes puede variar significativamente con la altitud.

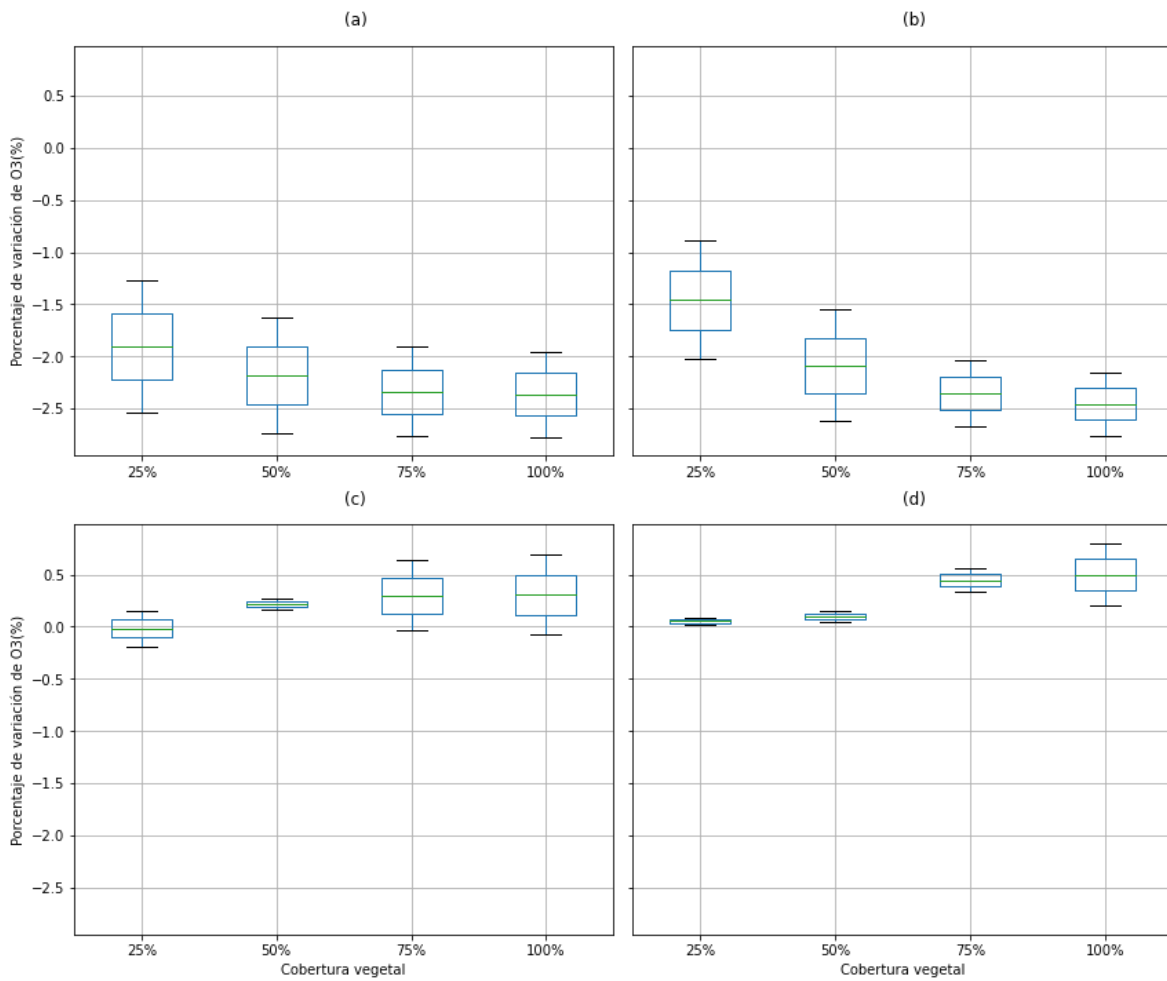


Figura 4.14: Variación de porcentaje de la concentración O3 con diferente cobertura vegetal en los techos de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.2. Fachadas verdes

4.2.2.1. Temperatura

La Figura 4.15 muestra la variación porcentual en la temperatura derivada de la implementación de fachadas verdes con distintas configuraciones de cobertura vegetal. Se observa una disminución notable de la temperatura en todos los escenarios evaluados, evidenciando que la incorporación de vegetación en las fachadas es crucial para la mitigación térmica en entornos urbanos. Notablemente, los edificios más altos, que cuentan con una mayor superficie de fachada verde, experimentan reducciones de temperatura más significativas en comparación con los edificios más bajos.

En edificios de menor altura, específicamente de 5 y 10 metros, se registra una reducción máxima de la temperatura de aproximadamente 1.23% y 1.37%, respectivamente, cuando la cobertura vegetal es del 100%. En contraste, para edificaciones de 20 y 30 metros, la disminución en la temperatura alcanza hasta el 1.41% y 2%, respectivamente. Estos hallazgos son consistentes con la investigación de Oquendo-Di Casola, quien también observó que la implementación de vegetación en fachadas conduce a una mayor reducción de la temperatura proporcional al grado de cobertura vegetal [42]. En sus estudios, la temperatura se redujo hasta un 1.95% en edificios de 25 metros, lo cual respalda y complementa los resultados obtenidos en esta investigación.

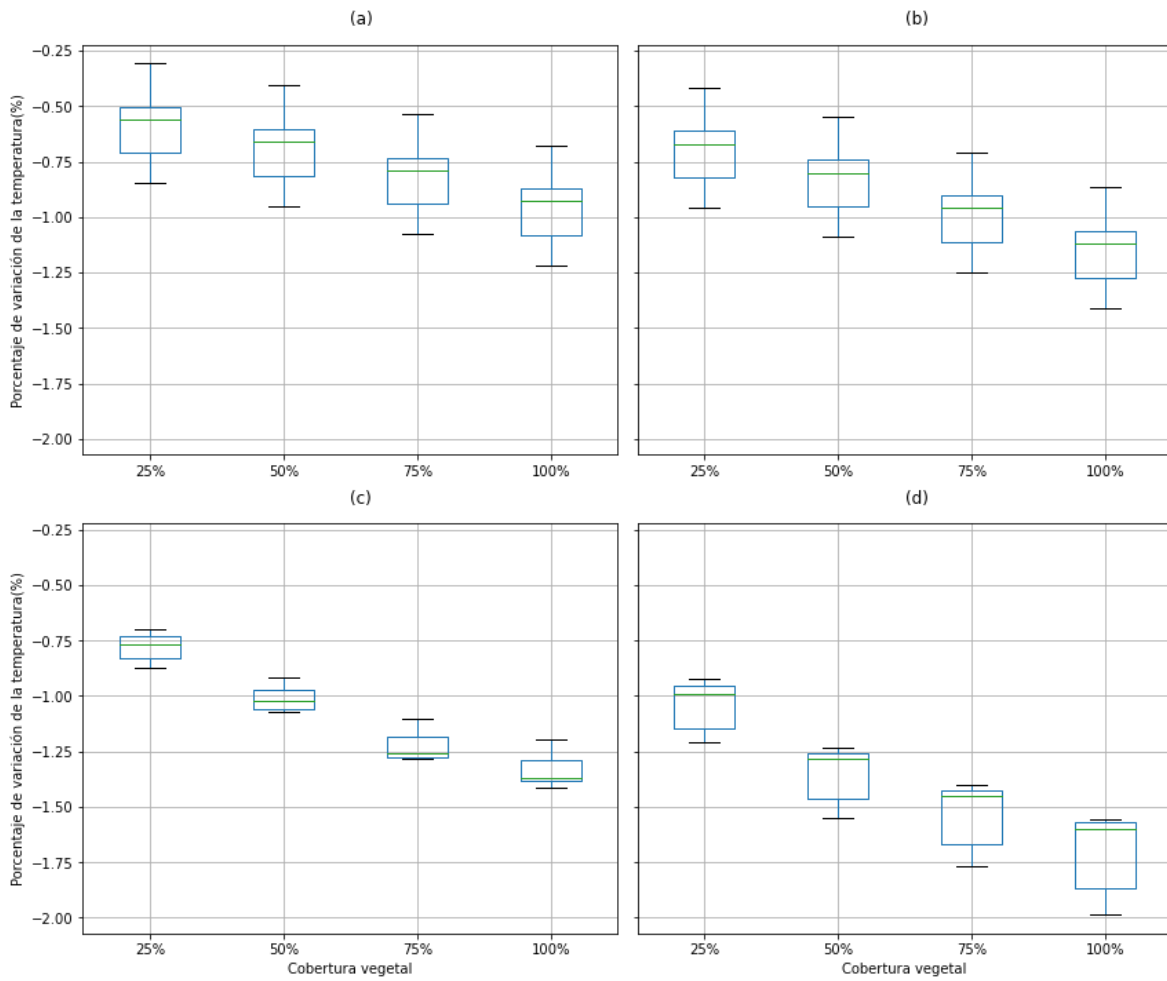


Figura 4.15: Variación de porcentaje de temperatura con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b) 10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.2.2. Material Particulado PM2.5

La Figura 4.16 muestra la variación porcentual de PM2.5 resultante de la implementación de fachadas verdes en comparación con los edificios del caso base. El análisis revela que los edificios más altos tienen una mayor reducción de PM2.5 que los edificios más bajos, debido a la extensiva cobertura vegetal que poseen. Para los edificios de menor altura, las variaciones máximas en la reducción de PM2.5 se observan con la mayor cobertura vegetal, alcanzando valores de 12.5% y 13%. Sin embargo, entre las coberturas del 75% y 100%, la diferencia en la reducción de PM2.5 no supera el 0.5%. Curiosamente, en los edificios de mayor altura, las mayores reducciones de contaminantes ocurren con una cobertura del 25%, y la eficacia de esta disminución se reduce hasta un 0.8%. Este análisis sugiere que un área verde más extensa en las fachadas está asociada con una captura más eficaz de contaminantes, aunque no es necesario cubrir completamente el edificio con vegetación; tener suficiente cobertura cerca de las fuentes de emisión es clave para una remoción efectiva.

Estos hallazgos están en línea con los resultados del estudio de Viecco, que observó reducciones de hasta el 11% en edificios bajos [1]. En contraste, en edificios de 20 metros, Viecco encontró que con una cobertura del 25%, la reducción de contaminantes alcanzaba hasta el 14.5%. De manera similar, en edificios de 30 metros, este estudio determinó que una cobertura del 25% podría reducir el PM2.5 en hasta un 4%. Las variaciones entre esta investigación y los resultados de Viecco se pueden deber a las variaciones meteorológicas de ambos estudios como la temperatura y la velocidad del viento [1].

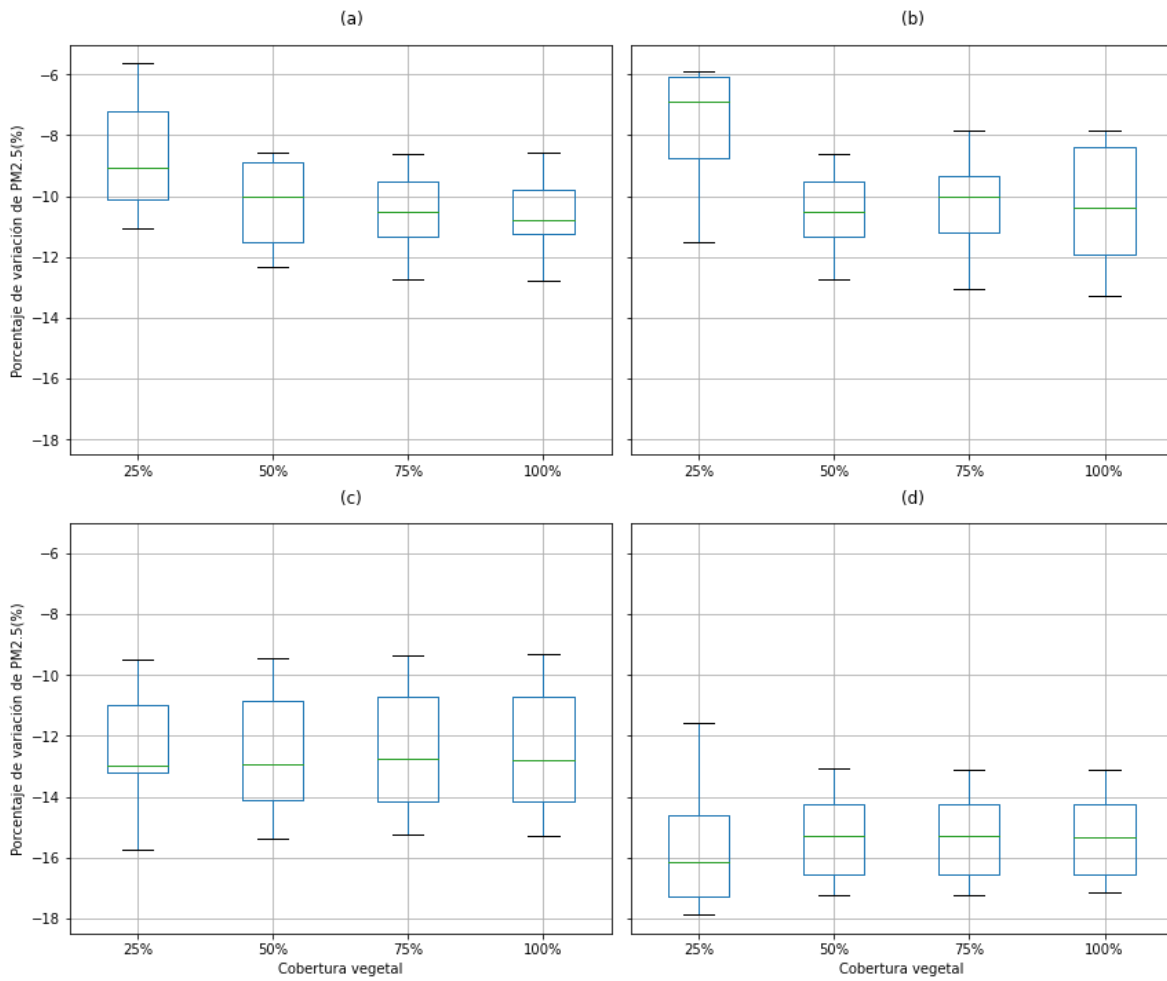


Figura 4.16: Variación de porcentaje de la concentración PM2.5 con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.2.3. Dióxido de Nitrógeno NO₂

La Figura 4.17 muestra la variación porcentual de NO₂ tras la implementación de fachadas verdes en comparación con los edificios del caso base. Similar a lo observado en la Figura 4.16, el efecto reductor del NO₂ disminuye conforme aumenta la altura de los edificios, probablemente debido a la mayor superficie de contacto entre la vegetación y los gases. Para los edificios de menor altura, especialmente aquellos de 5 metros, se registra una reducción máxima de NO₂ del 14.5%, con una mínima variación de solo 0.1% entre las coberturas vegetales del 75% y el 100%. En edificios de 10 metros, la reducción puede alcanzar hasta un 22%, sin diferencias significativas entre las coberturas del 75% y el 100%. Por otro lado, en los edificios de 20 y 30 metros, las variaciones entre ambas alturas no son significativas, observándose una máxima reducción de NO₂ para el caso de una cobertura vegetal del 25% en ambos casos, alcanzando hasta un 27.5% de reducción de este gas.

Al comparar estos resultados con los hallazgos de Currie & Bass, quienes determinaron que la vegetación puede remover hasta un 40% de contaminantes bajo condiciones específicas [23], este estudio alcanzó una reducción de hasta el 27.5%. Aunque estos valores son inferiores a los obtenidos por estos investigadores es importante destacar que su investigación se realizó en un laboratorio con parámetros controlados. A pesar de esta diferencia en el entorno de estudio y la menor reducción observada aquí, la relevancia y significancia de los resultados de esta investigación son considerables.

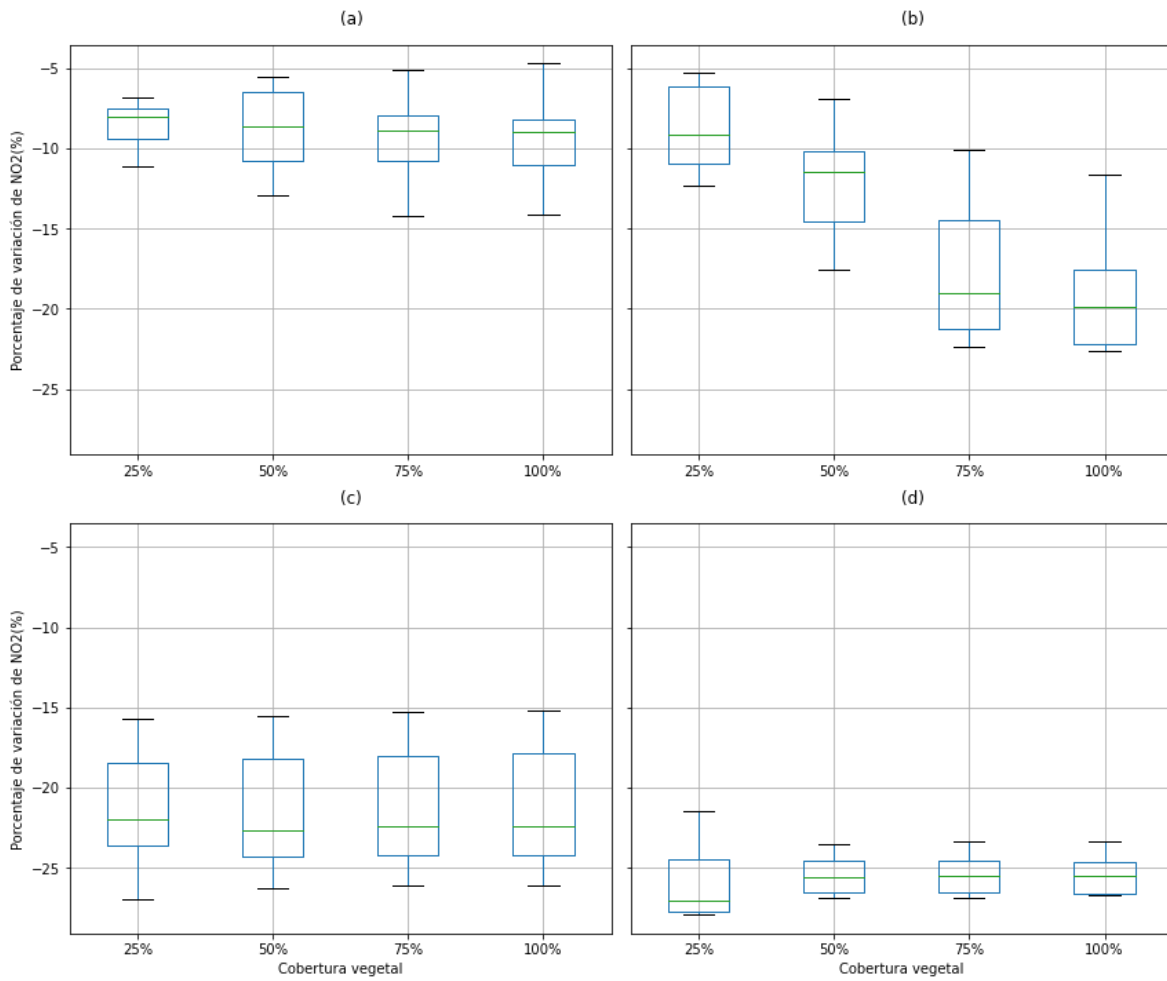


Figura 4.17: Variación de porcentaje de la concentración NO₂ con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.

4.2.2.4. Ozono Troposférico O₃

La Figura 4.18 ilustra la variación porcentual de O₃ tras implementar fachadas verdes frente a los edificios del caso base. Al igual que con otros contaminantes, se observa que la reducción de este gas es más pronunciada en edificios de mayor altura, gracias a su amplia cobertura verde. Para los edificios de menor altura, específicamente los de 5 metros, la reducción máxima del O₃, que alcanza el 5.7%, se logra con una cobertura vegetal del 100%, mostrando un incremento ligero de 0.1% en comparación con la cobertura del 75%. En los edificios de 10 metros, la máxima reducción de 6.85% se observa tanto en las coberturas del 75% como del 100%. Por otro lado, en los edificios de 20 y 30 metros de altura, las variaciones no son significativas, destacando que una cobertura del 25% resulta ser la superficie óptima para la reducción de este gas, también con un valor de 6.85%

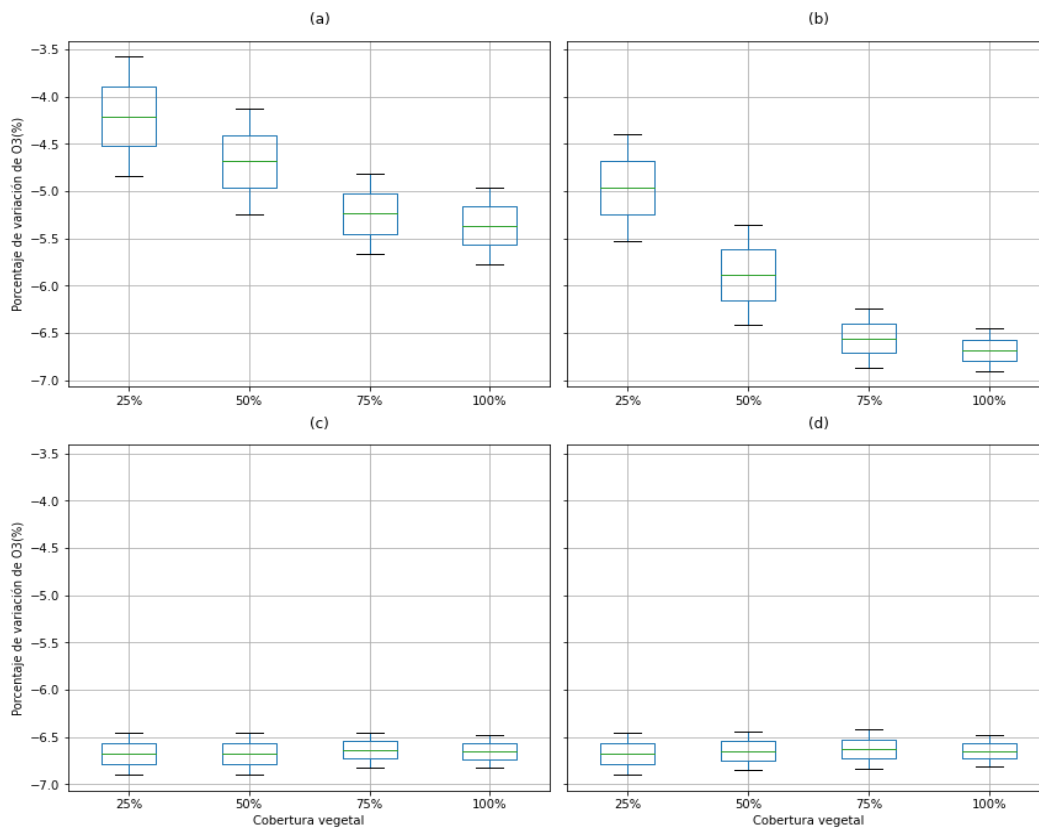


Figura 4.18: Variación de porcentaje de la concentración O₃ con diferente cobertura vegetal en las fachadas de edificios con alturas: a) 5m, b)10m, c) 20m y d) 30m.

Este estudio examinó la eficacia de distintas coberturas vegetales en techos y fachadas de edificios urbanos para la reducción de contaminantes. Los hallazgos indican que un incremento del 25% en la cobertura vegetal no produce variaciones significativas en la reducción de contaminantes, observándose un cambio promedio de apenas un 0.2%. Basándose en un análisis de costo-beneficio, se sugiere que, para techos verdes en edificios de baja altura, el porcentaje óptimo de cobertura es del 50%. Sin embargo, en edificios más altos, la implementación de techos verdes no se recomienda, ya que no contribuyen a la disminución de contaminantes debido a su limitada interacción con las fuentes de emisión vehicular.

En cuanto a las fachadas verdes, los resultados son positivos en todos los casos. No obstante, para los edificios más bajos, las diferencias entre coberturas del 75% y del 100% no son significativas, lo que establece al 75% como la cobertura óptima. Por otro lado, para edificios más altos, el porcentaje óptimo es del 25%, ya que no se observaron diferencias significativas con coberturas vegetales mayores. Este patrón sugiere que una estrategia de cobertura adaptada a la altura y ubicación específica de los edificios podría maximizar la eficiencia en la reducción de contaminantes y el rendimiento coste-efectivo de las intervenciones verdes en entornos urbanos.

El cuadro 4.19 presenta de manera detallada los porcentajes óptimos recomendados para la implementación de techos y fachadas verdes, los cuales se determinaron en función de la altura previamente calculada. Estos valores desempeñan un papel crucial en la formulación del último modelo a escala local, que abarca 16 cuadras en las proximidades de la estación de San Juan de Lurigancho (S JL). Este modelo se diseñó con el propósito de contrastar las condiciones del distrito en su estado base con aquellas generadas mediante un corredor verde, incorporando los porcentajes óptimos de cobertura vegetal recomendados para los edificios de la zona.

Altura del edificio	Techos verdes (%)	Fachadas verdes (%)
5	50	75
10	50	75
20	0	25
30	0	25

Tabla 4.8: Porcentaje óptimo de techos y fachadas verdes de acuerdo al tamaño del edificio

4.3 Comparación del Caso Base de SJL y el Caso Verde CV con los porcentajes óptimos de vegetación

En esta sección del estudio, se configuró el modelo base utilizando ENVI-met, tomando como referencia el área de análisis mostrada en la figura 4.19. A este modelo base, denominado Caso Base (CB), se le incorporaron estructuras de techos y fachadas verdes según los porcentajes óptimos previamente determinados (véase la tabla 4.9), configuración a la que se refiere como Caso Verde (CV). Posteriormente, se realizó una comparación detallada entre ambos escenarios, evaluando la concentración y la deposición de contaminantes durante el horario de validación, de 4:00 p.m. a 9:00 p.m., a una altura de 1.5 metros sobre el nivel del suelo, correspondiente a la altura promedio de un peatón. Específicamente para el contaminante O₃, a diferencia de los otros contaminantes, esta comparación se limitó solo a las horas de 4 a 5 p.m. debido a la naturaleza del ozono, que se produce por la radiación solar. Por tanto, en las horas subsiguientes, las variaciones en la concentración de O₃ fueron nulas.

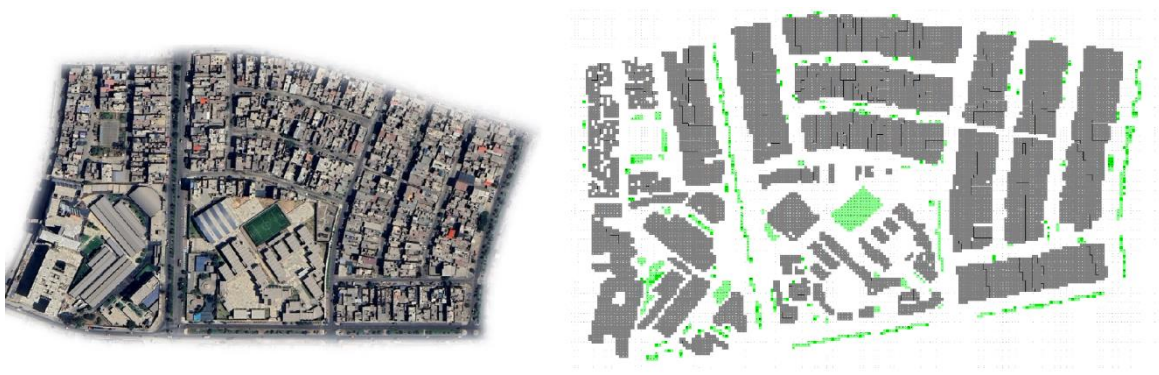


Figura 4.19: Área de análisis y el Caso Base (CB)

La Figura 4.20 presenta los escenarios del Caso Base y el Caso Verde. En estos modelos, se llevaron a cabo simulaciones que reflejan las condiciones específicas del distrito, incluyendo temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, así como las fuentes vehiculares y la vegetación existente. Estos elementos se integraron para asegurar que las simulaciones proporcionan una representación precisa y relevante del impacto de la vegetación ambiental en la calidad del aire.

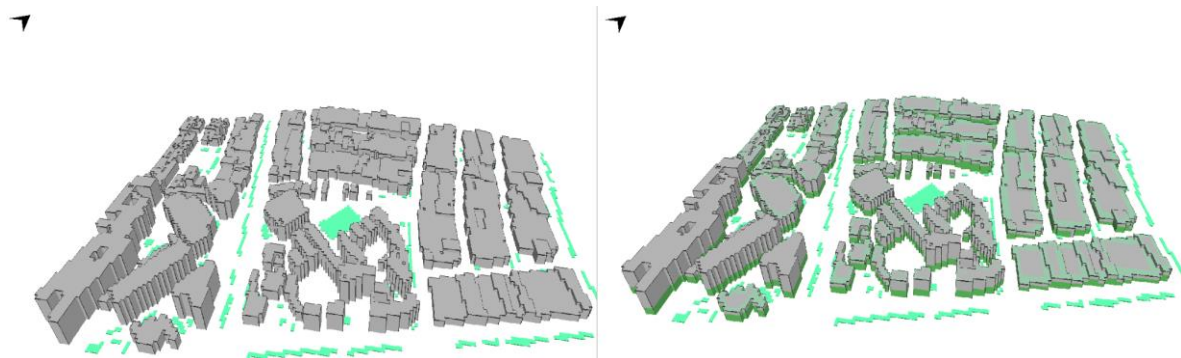


Figura 4.20: La subdivisión del corredor verde (CV) y el corredor base (CB) en secciones A y B para cada uno.

La mayoría del área correspondiente al Caso Base fue dotada de fachadas y techos verdes durante la creación del Caso Verde (CV). No obstante, en aquellos edificios con alturas de 20 metros, se determinó que la implementación de techos verdes no era necesaria, ya que no tenía un efecto importante en la calidad del aire local (ver figuras 4.12,4.13,4.14,4.16,4.17 y 4.18).

Finalmente, para llevar a cabo un análisis integral, se optó por dividir tanto el Caso Base (CB) como el Caso Verde (CV) en dos secciones distintas: A y B (ver figura 4.21). La sección A comprende los edificios ubicados en la dirección del barlovento, mientras que la sección B abarca aquellos en la dirección del sotavento. En estas secciones, se llevó a cabo un análisis, tanto cualitativo como cuantitativo, en relación con la concentración y a la cantidad total de masa depositada de los contaminantes.



Figura 4.21: La subdivisión del corredor verde (CV) y el corredor base (CB) en secciones A y B para cada uno.

4.3.1 Caracterización de las secciones A y B

La Sección A se caracteriza por tener una cobertura vegetal más extensa, incluyendo parques y jardines, en comparación con la Sección B. Además, la disposición de sus edificios crea cañones urbanos profundos, donde la altura promedio de las estructuras supera los 12 metros, dando lugar a una morfología urbana definida por su verticalidad y densidad. En contraste, la Sección B se compone de cañones urbanos menos profundos, con edificaciones que alcanzan una altura media de aproximadamente 7 metros, reflejando una escala y densidad urbanística más baja.

4.3.2 Concentración de los contaminantes

Para el análisis de la concentración de los contaminantes, se adoptó un enfoque tanto cualitativo como cuantitativo. Desde la perspectiva cualitativa, se focalizó específicamente en el horario de las 5 pm, momento en el cual la concentración de los contaminantes alcanza su máximo, correlacionándose estrechamente con el pico del flujo vehicular (ver figura 4.2). Sin embargo, los resultados detallados de las simulaciones de las concentraciones se incluyen en los anexos para una consulta más detallada. En cuanto al enfoque cuantitativo, se realizó un análisis exhaustivo a lo largo de todo el horario de validación establecido. Durante este periodo, se promediaron los valores de concentración de cada sección, y luego se compararon entre el Caso Base (CB) y el Caso Verde (CV), permitiendo evaluar de manera efectiva el impacto de las intervenciones de infraestructura verde sobre la calidad del aire urbano.

4.3.2.1. PM2.5

La Figura 4.22 presenta una comparación entre las concentraciones del PM2.5 entre el Caso Base (CB) y el Caso Verde (CV) a las 5 p.m. En otras palabras, muestra la diferencia entre las concentraciones de PM2.5 entre el CB y el CV. En este contexto, los tonos azules indican diferencias de concentración más elevadas, mientras que los tonos rojos representan diferencias de concentración más bajas. Estos resultados específicos, así como las demás simulaciones durante el horario de validación se encuentran detallados en el Anexo 1. Es importante destacar que estas simulaciones adicionales muestran una tendencia similar a la presentada en la Figura 4.22.

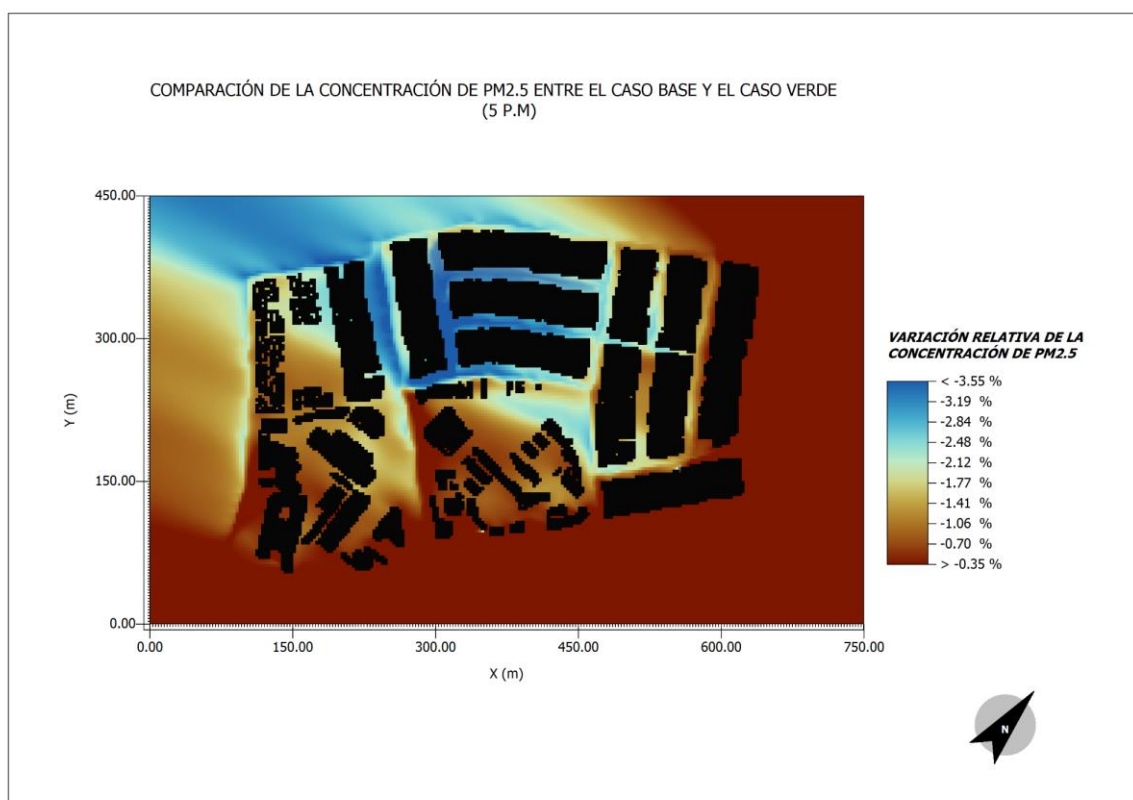


Figura 4.22: Comparación de la concentración de PM2.5 entre el CB y el CV a las 5p.m

En este análisis, se evidencia que, tanto en la Sección A como en la B, las concentraciones de pm2.5 en el Caso Verde (CV) superan a los valores del Caso Base (CB) en un 0.5%. Esta tendencia se mantiene constante a lo largo de diversas horas de evaluación, como se detalla en la Figura 4.23, la cual amplía la investigación a distintos momentos del día, específicamente de 4 a 9 p.m.

Cada punto en este gráfico representa el promedio de la variación relativa de la concentración en las secciones A y B en una hora determinada. Se destaca que la variación en ambos casos es más pronunciada alrededor de las 5 de la tarde. No obstante, a medida que avanza la noche, se observa una disminución considerable en la variación, fenómeno que guarda relación con la reducción de la cantidad de vehículos circulando durante esas horas nocturnas (ver figura 4.2).

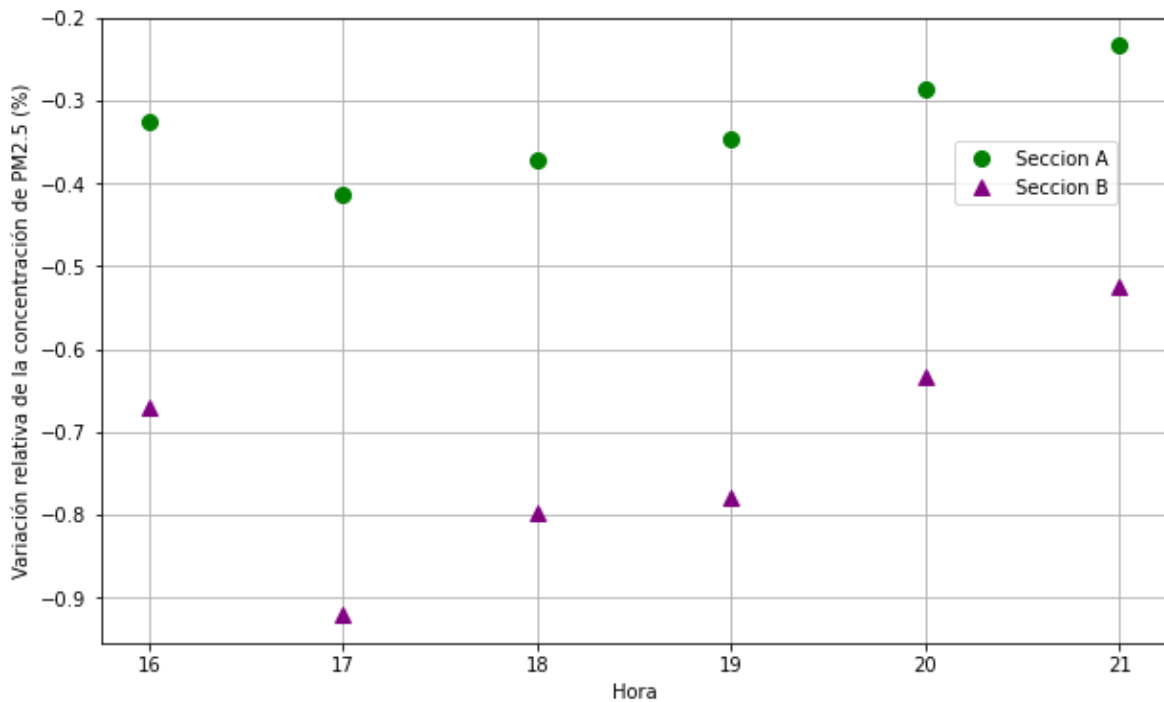


Figura 4.23: Comparación de la concentración de PM2.5 entre el CB y el CV en las horas de análisis

4.3.2.2. NO2

La Figura 4.24 muestra una tendencia similar a la presentada en la Figura 4.22, evidenciando mayores variaciones de concentración de NO2 en la Sección B (lado del sotavento) y menores variaciones en la Sección A. Estos resultados específicos, junto con las demás simulaciones realizadas durante el horario de validación, se detallan en el Anexo 2

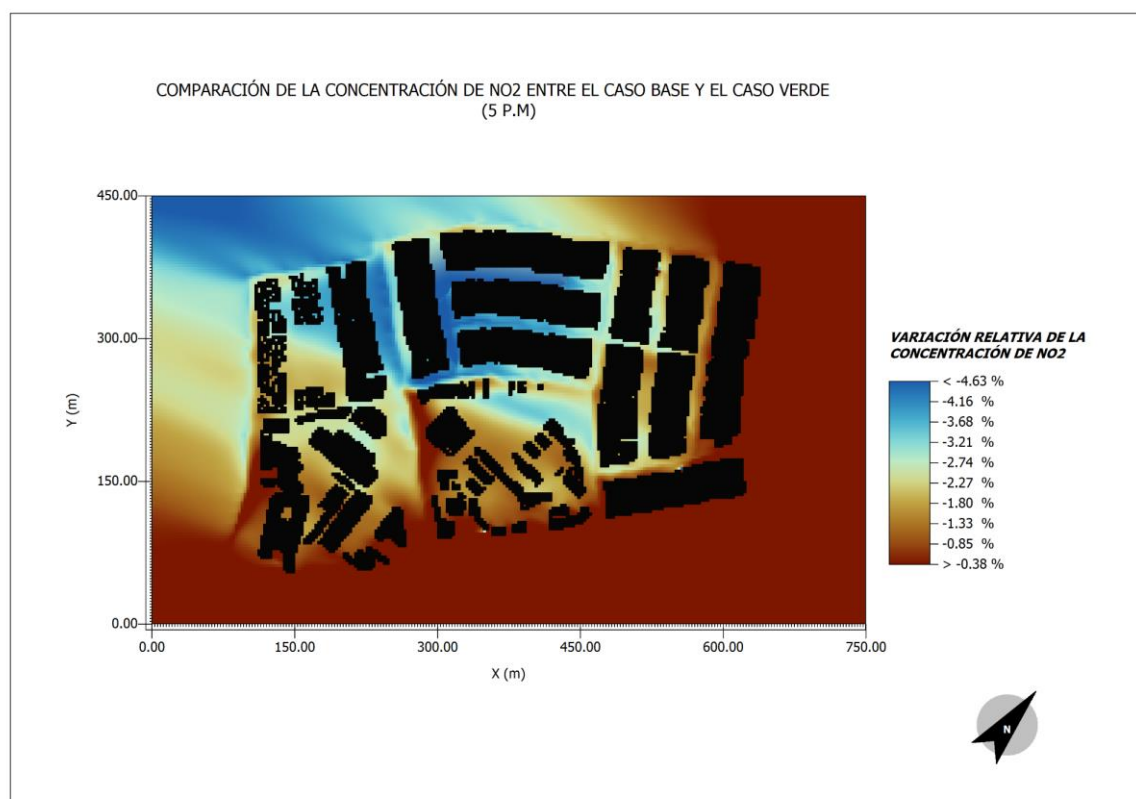


Figura 4.24: Comparación de la concentración de NO2 entre el CB y el CV a las 5p.m

La Figura 4.24 muestra una variación significativa en comparación con la Figura 4.22, con un cambio del 0.62%, pero sigue el mismo patrón observado anteriormente. Esta variación alcanza su punto máximo alrededor de las 5 p.m. y luego disminuye gradualmente a medida que avanza la noche.

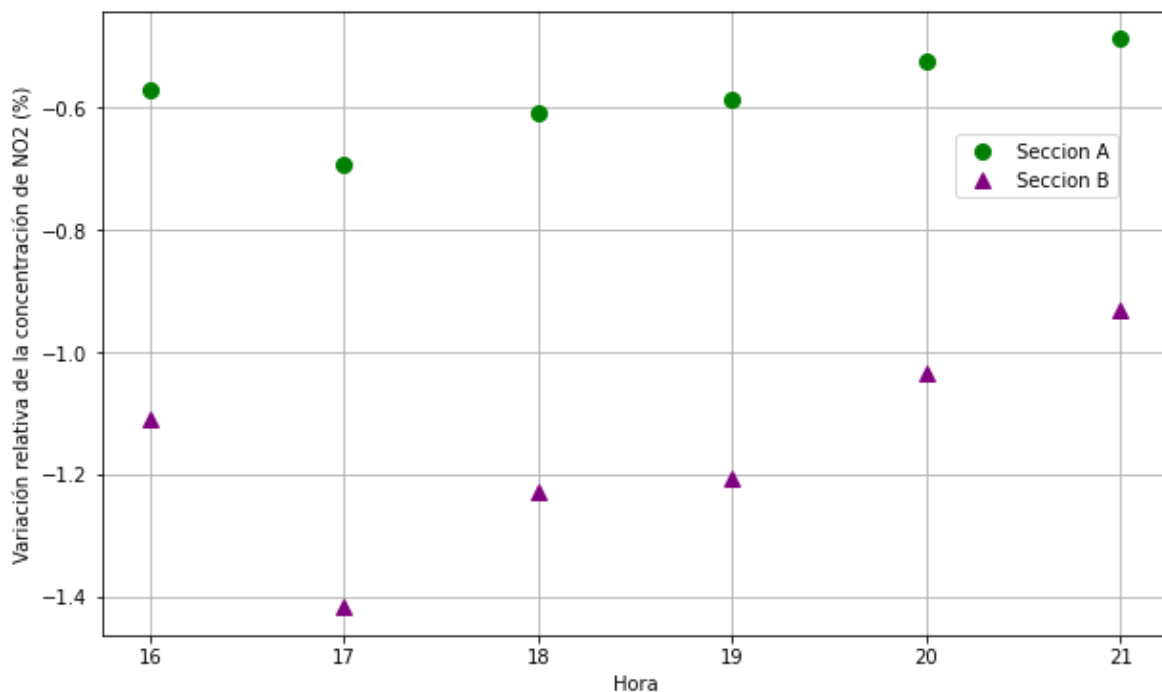


Figura 4.25: Comparación de la concentración de NO₂ entre el CB y el CV en las horas de análisis.

4.3.2.2. O₃

La Figura 4.26 muestra la comparación de la concentración de O₃ entre el Caso Base (CB) y el Caso Verde (CV) a las 5 p.m. Esta ilustración revela una tendencia similar a la observada con otros contaminantes, destacando que la Sección B registra una mayor concentración de O₃ en comparación con la Sección A. Este incremento podría atribuirse a la emisión más elevada de compuestos orgánicos volátiles en esta área. Además, esta tendencia se mantiene constante en todas las simulaciones realizadas durante el horario de validación (ver resto de salidas en el anexo 3), evidenciando diferencias significativas en la calidad del aire entre ambas secciones.

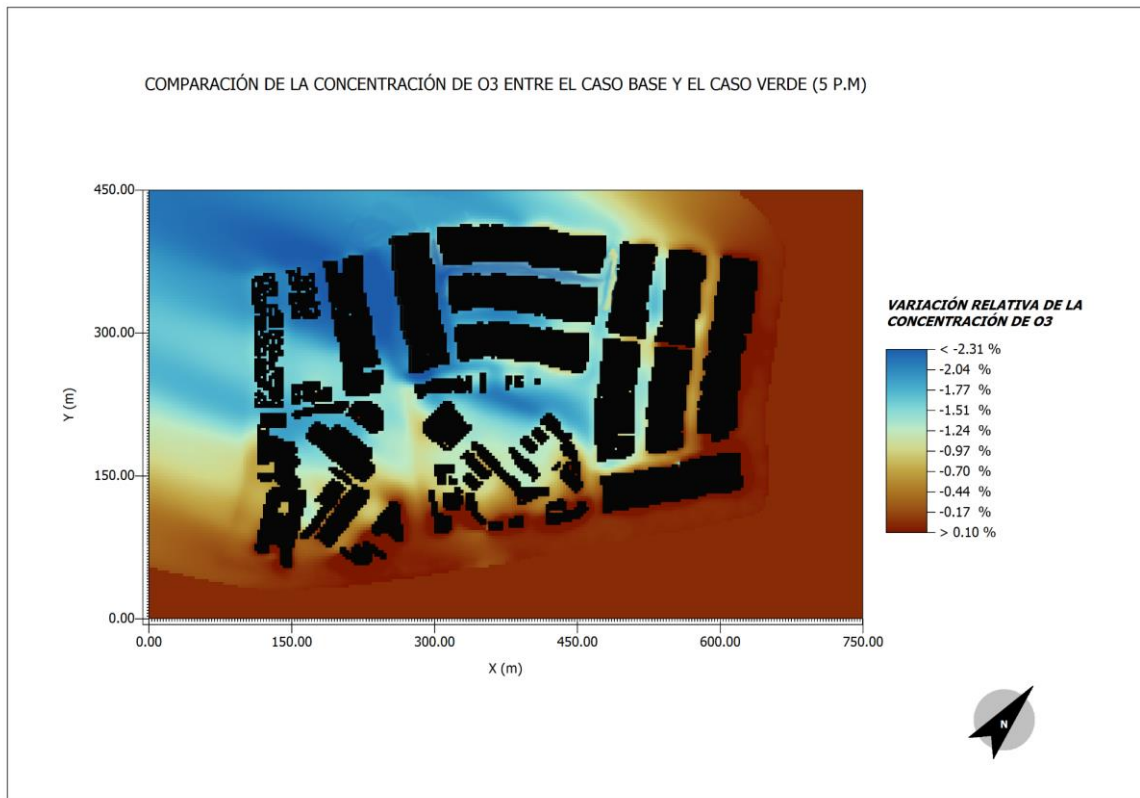


Figura 4.26: Comparación de la deposición de NO₂ entre el CB y el CV a las 5 p.m.

La figura 4.27 ilustra la variación relativa de la concentración de O₃ entre las secciones A y B, mostrando un patrón similar al observado con otros contaminantes. En promedio, la Sección B registra un incremento del 0.5% en la concentración de O₃ comparado con la Sección A. Adicionalmente, se observa que las concentraciones de este contaminante tienden a incrementarse a medida que avanza el tiempo. Sin embargo, los datos se limitan principalmente a estas dos horas iniciales, ya que posteriormente la ausencia de luz solar, un factor crucial para la generación de ozono troposférico, reduce significativamente la formación de este contaminante.

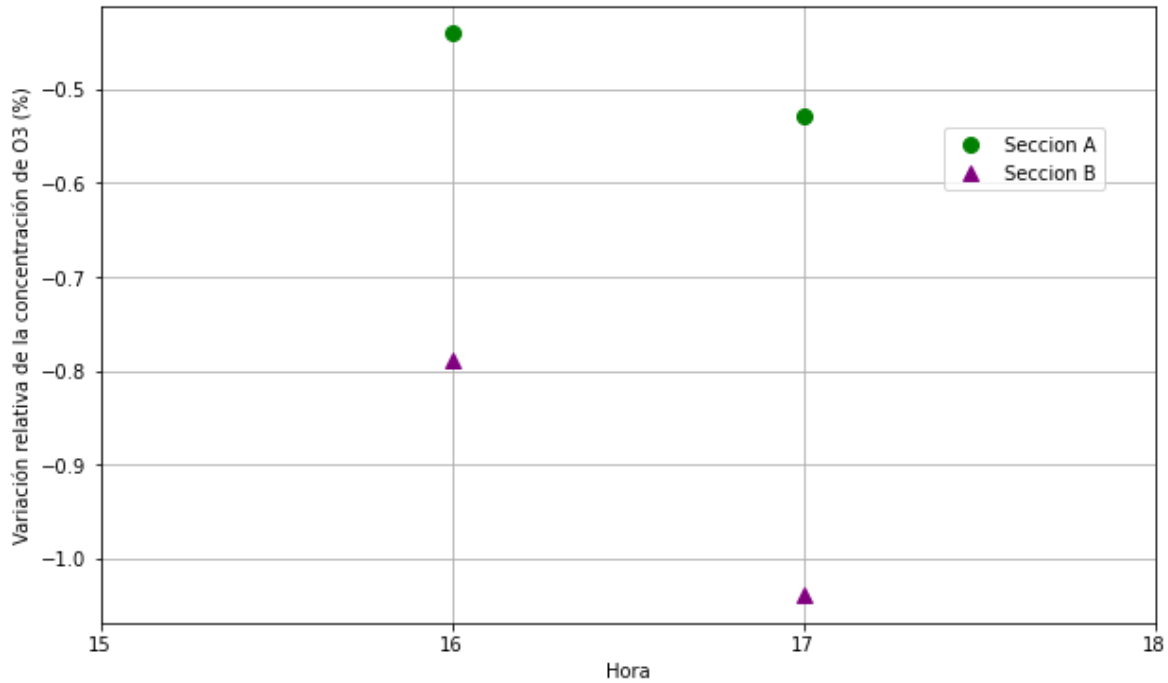


Figura 4.27: Comparación de la concentración de O₃ entre el CB y el CV en las horas de análisis

En resumen, las Figuras 4.23, 4.25 y 4.27 destacan que el Caso Verde (CV) exhibe mayores concentraciones de contaminantes en comparación con el Caso Base (CB). Este aumento se corresponde con los hallazgos de Viecco y Mircea, quienes argumentan que la vegetación en entornos con numerosos cañones urbanos puede impedir el transporte de contaminantes al reducir la energía del viento. Este fenómeno se debe principalmente a la capacidad de la vegetación para bajar la temperatura ambiental, aumentando así la densidad del aire. En la Sección B, que cuenta con una densa cobertura vegetal en las edificaciones, se observa una reducción notable de la temperatura, lo que contribuye a la menor dispersión de los contaminantes. En la sección B, en promedio, la concentración de PM_{2.5} aumenta hasta un 0.8%, mientras que en la Sección A, en el lado de barlovento, el aumento es de sólo 0.35%.

Adicionalmente, los resultados de Mircea *et al.* apuntan a una situación más compleja, donde la vegetación, aunque generalmente beneficiosa, puede en ciertas configuraciones urbanas aumentar la concentración de contaminantes. Mircea *et al.* encontraron que la implementación de infraestructura verde puede resultar en incrementos de PM2.5 que varían significativamente dependiendo de la orientación y la estructura urbana. En su estudio, las áreas de barlovento, similares a nuestra Sección A, mostraron un aumento del 3.45% en la concentración de PM2.5, mientras que, en el lado de sotavento, comparable a la Sección B, el incremento fue aún mayor, alcanzando un 4.24%. Esto subraya la importancia de considerar la ubicación y las características específicas del entorno al diseñar e implementar soluciones de infraestructura verde, ya que los cañones urbanos en la Sección B reducen la energía del viento y complican la dispersión de los contaminantes, tal como se evidencia en los incrementos más significativos de PM2.5.

Finalmente, estos hallazgos en el aumento de las concentraciones de los contaminantes se pueden comprobar observando la figura de la variación de la temperatura entre el caso A y B (ver anexo 7), En estas, se observa que, en la Sección B, donde hay un mayor número de edificaciones con vegetación, se registra una mayor variación de temperatura, indicando que la vegetación está enfriando de manera más efectiva estos espacios en comparación con la sección B.

4.3.3. Deposición de los contaminantes

Al igual que en la sección 'análisis de la concentración de los contaminantes', se adoptó un enfoque tanto cualitativo como cuantitativo. En esta sección, se abordó la comparación de la masa total depositada de los contaminantes, buscando determinar en qué escenarios la incorporación de infraestructura verde (IV) favorece a una mayor deposición de estos contaminantes. Este análisis permite evaluar cómo la presencia de vegetación en los entornos urbanos puede influir en la captación y acumulación de los contaminantes.

4.3.3.1. PM2.5

La figura 4.28 muestra una comparativa de la deposición de PM2.5 entre el Caso Base (CB) y el Caso Verde (CV) a las 5 p.m. El análisis gráfico indica que, en el CV, la masa depositada de PM2.5 es mayor en comparación con el CB, reflejando la eficacia de la infraestructura verde en la captura de partículas finas. Notablemente, la Sección B muestra una deposición más elevada que la Sección A, sugiriendo una mejor captación de contaminantes en áreas con densidad vegetal más alta. Estos resultados ilustran el impacto de las intervenciones verdes sobre la calidad del aire urbano. El resto de simulaciones se encuentran en el Anexo 4.

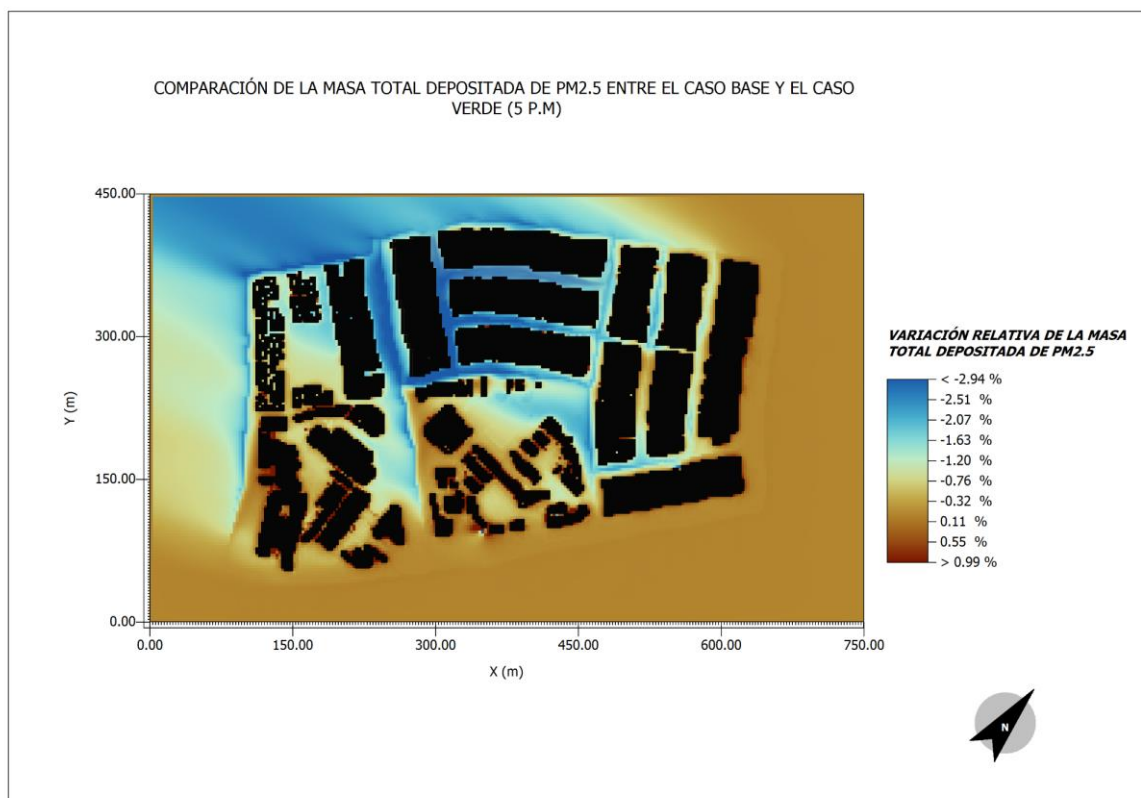


Figura 4.28: Comparación de la deposición de PM2.5 entre el CB y el CV a las 5 p.m.

Además, la Figura 4.29 representa los valores promedio de cada sección mediante puntos individuales. Se observa que el CV presenta una deposición de PM2.5 superior en ambas secciones, con un promedio de 0.11%.

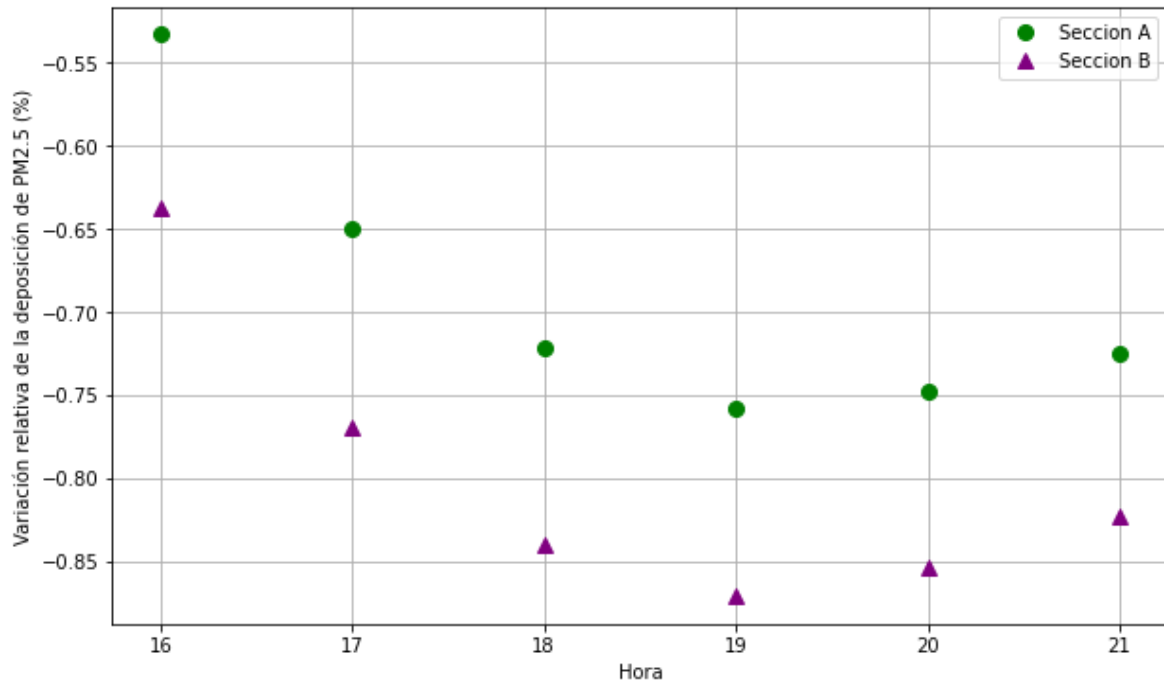


Figura 4.29: Comparación de la deposición de PM2.5 entre el CB y el CV en el horario de validación

4.3.3.1. NO2

La Figura 4.29 presenta una comparativa de la deposición de NO2 entre el Caso Base (CB) y el Caso Verde (CV) a las 5 p.m., ilustrando las diferencias significativas en la captura de este contaminante en ambos escenarios. Se observa que, en el CV, donde existen mayores edificios con coberturas verdes, la variación relativa de la masa total depositada de NO2 muestra una reducción más pronunciada en comparación con el CB. La gama de variaciones va desde disminuciones significativas de hasta un -3.90% en áreas con densa cobertura vegetal.

Este patrón enfatiza cómo las áreas con mayor cobertura vegetal pueden influir positivamente en la reducción de NO₂, especialmente en entornos urbanos donde los cañones urbanos y la estructura de los edificios pueden limitar la dispersión de los contaminantes, en donde el promedio en la variación de este contaminante en la sección B.

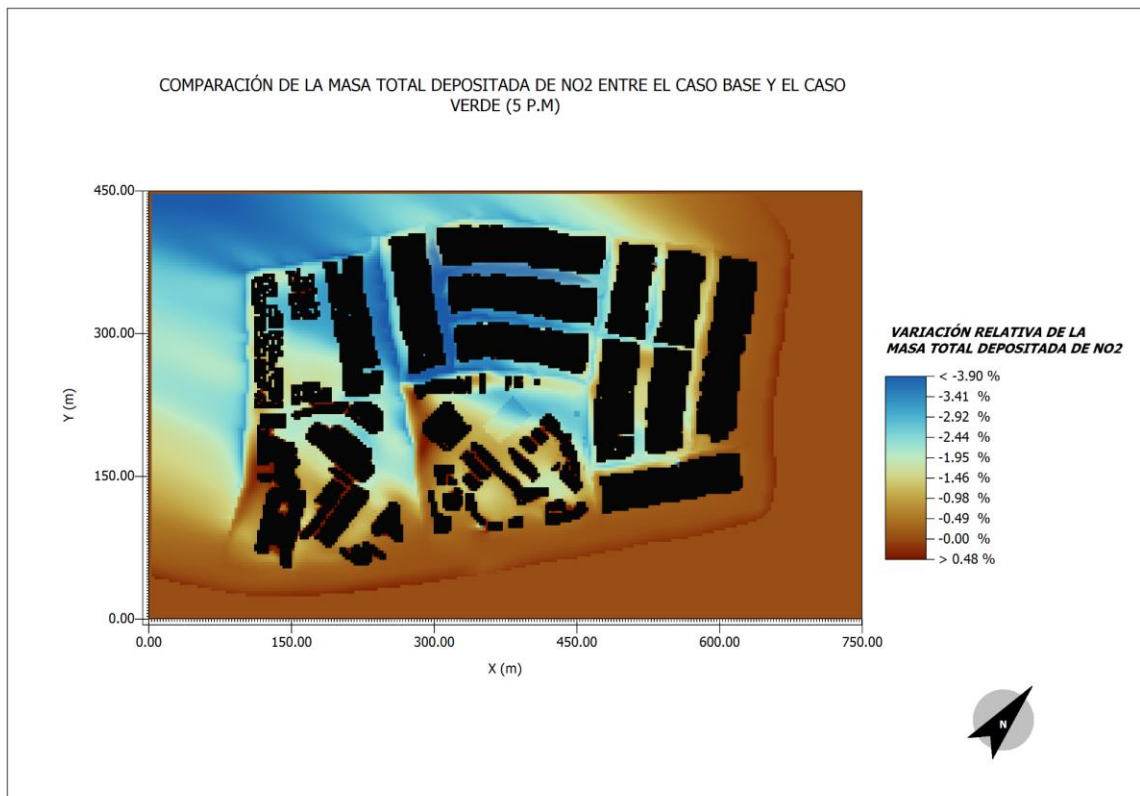


Figura 4.30: Comparación de la deposición de NO₂ entre el CB y el CV a las 5 p.m.

Por último, la Figura 4.31 presenta el promedio de las variaciones relativas entre el Caso A y el Caso B durante las distintas horas de análisis (4-9 p.m.). Como en los gráficos anteriores, se observa que la Sección B registra una deposición de masa de NO₂ superior a la del Caso A, especialmente durante las horas nocturnas. Esta variación promedio es del 0.65% (ver el resto de salidas en el anexo 5).

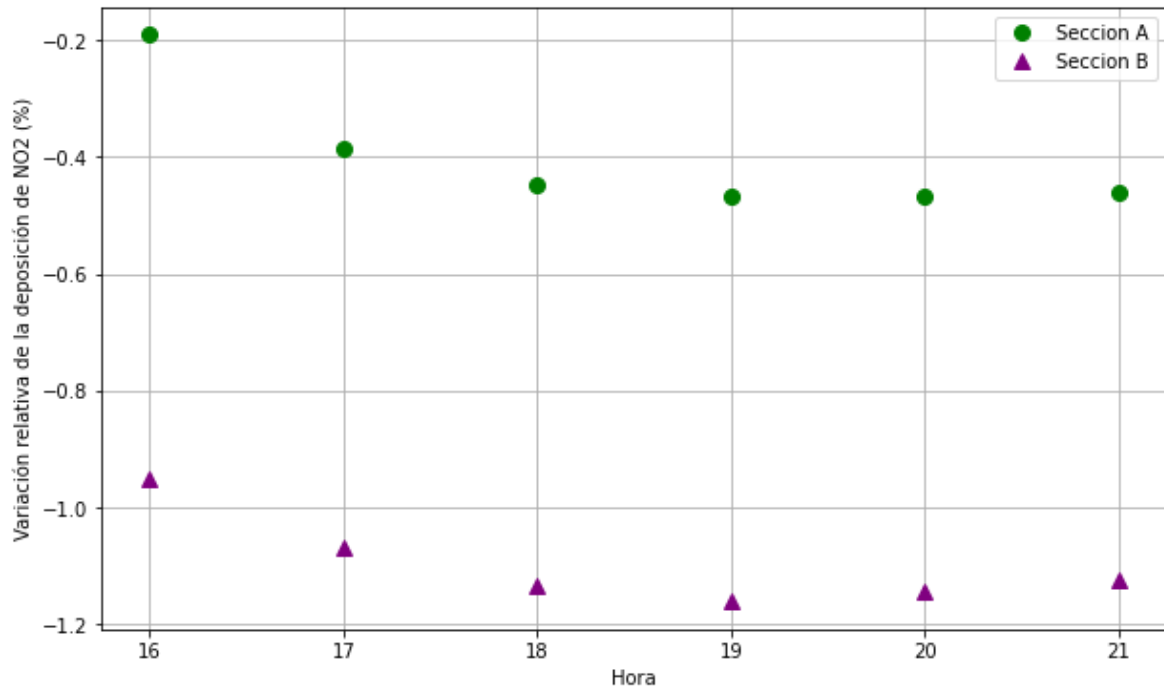


Figura 4.31: Comparación de la deposición de NO₂ entre el CB y el CV en el horario de validación.

4.3.3.1. O₃

La figura 4.32 ilustra la comparación de la deposición de O₃ entre el Caso Base (CB) y el Caso Verde (CV). Los datos muestran que hay una mayor cantidad de O₃ depositado en la Sección B, con un incremento del 0.69% en comparación con la Sección A. Estos resultados son coherentes con otros hallazgos del estudio, los cuales indican que, en presencia de una mayor concentración de contaminantes en el aire, la vegetación es capaz de capturar un porcentaje más elevado de estos contaminantes en el aire, la vegetación llega a capturar mayor porcentaje de estos.

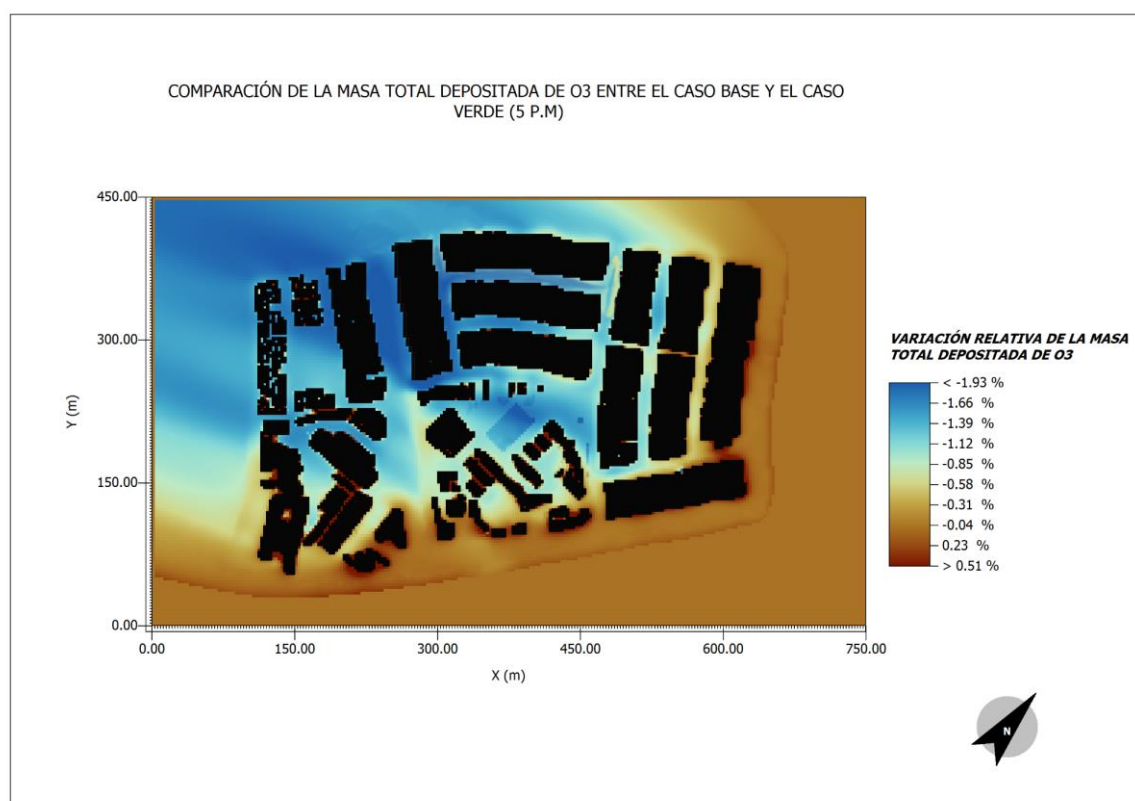


Figura 4.32: Comparación de la deposición de O₃ entre el CB y el CV a las 5 p.m

La figura 4.33 ilustra la comparación de la captura de contaminantes entre las secciones A y B, mostrando que la Sección B logra una mayor retención durante las dos horas de validación analizadas (ver resto de salidas anexo 6). En promedio, la diferencia entre ambas secciones es del 0.55%, evidenciando que la Sección B, con mayor cobertura vegetal, es más efectiva en la reducción de contaminantes en el ambiente.

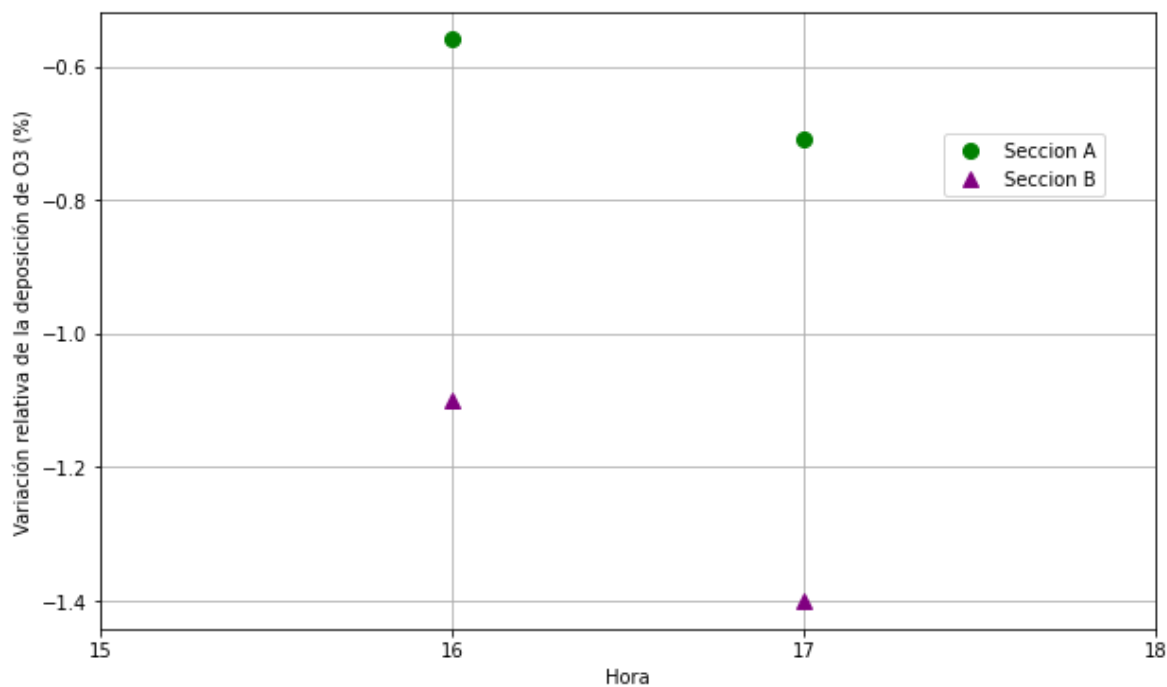


Figura 4.33: Comparación de la deposición del O3 entre el CB y el CV en el horario de validación

Los resultados obtenidos muestran que la implementación de techos y fachadas verdes en los edificios de la zona analizada en SJL está vinculada a un incremento en la concentración de contaminantes, aunque también se destaca una dicotomía en los hallazgos. Por un lado, la sección B presenta un incremento en la masa depositada de PM2.5, NO2, y O3 de 0.11%, 0.65% y 0.55%, respectivamente, en comparación con la sección A, lo que indica una mayor captura de estos contaminantes. No obstante, simultáneamente, las concentraciones de estos contaminantes también aumentan, especialmente en la sección B, donde el PM2.5, NO2 y O3 muestran incrementos de 0.3%, 0.57% y 0.5%, respectivamente.

Este fenómeno podría explicarse a través del análisis de Stull sobre el comportamiento del aire como agente principal en el transporte y dilución de contaminantes. Las mediciones de concentración (PM2.5, NO2, O3) demuestran que la sección B, caracterizada por cañones urbanos menos profundos, presenta mayores concentraciones de contaminantes en comparación con la sección A, que contiene cañones urbanos más profundos. Estos últimos obstaculizan más eficazmente el flujo del aire, reduciendo su energía cinética y haciendo que los vientos más débiles alcancen la sección B. Esto sugiere que, aunque la vegetación contribuye a capturar contaminantes, la configuración de los cañones urbanos juega un papel crucial en la eficacia con la que estos contaminantes son transportados y dispersados, resaltando la complejidad de diseñar estrategias efectivas de vegetación urbana para mejorar la calidad del aire.

Adicionalmente, la incorporación de techos y fachadas verdes provoca modificaciones en los parámetros meteorológicos, reduciendo la temperatura y aumentando la humedad relativa. Estas condiciones propician vientos más densos que se hunden, es decir, el aire se vuelve débil para transportar los contaminantes. Este efecto, sumado a lo mencionado anteriormente, favorece que la concentración tienda a aumentar aún más en la sección B.

Los resultados de esta investigación sobre la implementación de techos y fachadas verdes en edificios de SJL indican un aumento en la concentración de contaminantes, aunque también destacan un efecto significativo de captura de contaminantes por parte de la vegetación, que llega hasta un 1% más en comparación con el Caso Base (CB). Este estudio revela que la Sección B presenta concentraciones más altas, atribuidas a la obstrucción del flujo del viento por los edificios altos de la Sección A. A pesar de esto, la vegetación en la Sección B actúa como una barrera eficaz, reforzando resultados previos que demuestran la capacidad de la vegetación para mejorar la deposición de contaminantes cerca de las fuentes de emisión.

Este análisis pone de relieve la necesidad de evaluar cuidadosamente la viabilidad de implementar infraestructura verde en SJL, dependiendo de los objetivos específicos de mejora ambiental. Aunque la vegetación favorece la recirculación y el aumento de los contaminantes en los cañones urbanos del distrito, también desempeña un papel crucial en su captura y contribuye a la reducción de la temperatura ambiente. Si el objetivo es reducir la temperatura, la vegetación resulta beneficiosa bajo cualquier escenario de cobertura. Sin embargo, en cuanto a la concentración de contaminantes, es esencial realizar un análisis detallado, ya que la configuración de los cañones urbanos puede complicar la dispersión del aire contaminado.

Además, se debe considerar el análisis de costo-beneficio, puesto que la instalación y mantenimiento de techos y fachadas verdes implican inversiones significativas. A pesar de los costos, los beneficios múltiples como la reducción del estrés, disminución de ruido, control de la escorrentía pluvial, mejora del confort térmico y embellecimiento paisajístico justifican la inversión en infraestructura verde, apoyando la visión de autores como Viecco y Mircea sobre los efectos positivos de la vegetación en el entorno urbano.

CONCLUSIONES

Esta tesis investigó el impacto de la implementación de techos y fachadas verdes en San Juan de Lurigancho mediante simulaciones con ENVI-met, con el fin de mejorar la calidad del aire local. Los resultados indican que, en este distrito específico, la introducción de vegetación en los edificios puede aumentar en promedio el 0.5% la concentración de contaminantes atmosféricos. No obstante, también se observó que los edificios con elementos vegetales capturan hasta un 1% más de la masa total de contaminantes comparados con áreas sin vegetación. Esto sugiere un equilibrio entre el aumento de contaminantes y su captura. Estos hallazgos subrayan la viabilidad y la relevancia de integrar estrategias de infraestructura verde como soluciones clave para mejorar la calidad ambiental en áreas urbanas afectadas por la contaminación del aire. En este contexto, las conclusiones clave derivadas de este estudio de investigación son:

1. ENVI-met demuestra una adaptación bastante favorable a las condiciones de San Juan de Lurigancho para la creación de modelos micrometeorológicos, aunque esta adaptación se considera relativa. La eficacia de la adaptación es particularmente destacada durante un rango específico de horas, comprendido entre las 4:00 p. m. y las 9:00 p. m. En el desarrollo de los demás modelos, se optó por un tamaño de celda de 3 metros, ya que en ese intervalo horario presentaba un porcentaje de error del 5.15%, en comparación con los datos registrados por la estación meteorológica.
2. Las fachadas verdes resaltan por su impacto en la reducción de los contaminantes, en contraste con los techos verdes, debido a su proximidad a las fuentes de emisión. Se ha concluido que no es imprescindible cubrir la totalidad de los edificios con techos y fachadas verdes para lograr una disminución significativa en la concentración de

contaminantes. El porcentaje óptimo dependerá en gran medida de la morfología urbana y la altura de los edificios. Para edificaciones de menor altura (5 y 10 metros), se sugiere una cobertura verde en los techos del 50% y 50%, respectivamente. Sin embargo, en el caso de edificios de mayor altura (20 y 30 metros), no se recomienda la implementación de techos verdes, ya que la vegetación podría no interactuar de manera efectiva con los contaminantes. Respecto a las fachadas verdes, es beneficioso vegetar las fachadas con vegetación en todos los casos. Tal es así que se aconseja vegetar los edificios de 5 y 10 metros con una cobertura de 75% y un 25% para los edificios de 20 y 30 metros.

3. La implementación de techos y fachadas verdes en el área urbana estudiada llevó a un incremento en la concentración de contaminantes tanto en la sección A, ubicada al lado del barlovento, como en la sección B, situada en el lado de sotavento. Se observó que la concentración de contaminantes era menor en la sección A en comparación con la B. Este efecto se atribuye a que la sección A, con sus edificios altos, actuaba como una barrera que alteraba la dirección y fuerza del viento. La presencia de un flujo de aire más débil en la sección A impedía la dispersión eficaz de los contaminantes hacia la sección B. Adicionalmente, la vegetación en la sección B enfriaba la temperatura más que en la A, generando vientos más pesados y lentos, lo cual complicaba el transporte de contaminantes. No obstante, estos resultados no son totalmente negativos, pues se determinó que la sección B mostraba una mayor deposición de contaminantes en comparación con la sección A, indicando que, a pesar de las diferencias en la intensidad del viento, la vegetación en la sección B lograba capturar hasta un 1% de los contaminantes.

RECOMENDACIONES

Basado en la investigación realizada sobre la implementación de techos y fachadas verdes sobre los edificios de San Juan de Lurigancho para mitigar y reducir los efectos de una mala calidad del aire se recomienda lo siguiente:

1. Se sugiere considerar la implementación de techos verdes específicamente en edificios que tengan una altura inferior a los 10 metros. Esta recomendación se basa en la observación de que, en alturas más bajas, la vegetación puede interactuar de manera más efectiva con los contaminantes provenientes de fuentes cercanas. Por otro lado, en el caso de las fachadas verdes, se concluye que su implementación puede ser beneficiosa en todos los casos, independientemente de la altura del edificio. Estas consideraciones pueden servir como pautas para optimizar la efectividad de las medidas de infraestructura verde en la mejora de la calidad del aire.
2. Es crucial destacar que no se debe aplicar una estandarización de los porcentajes óptimos hallados en San Juan de Lurigancho (SJL) a otros distritos, dada la variabilidad inherente en la morfología urbana, el nivel de vegetación, los parámetros meteorológicos y la cantidad de tráfico vehicular. Cada área urbana presenta características únicas que influyen significativamente en la efectividad de intervenciones específicas. Por lo tanto, es esencial realizar evaluaciones detalladas y adaptar las estrategias a las condiciones específicas de cada localidad antes de considerar la implementación de medidas similares en otros distritos.
3. Para futuras investigaciones en este distrito, se sugiere emplear técnicas de laboratorio, como túneles de viento, para corroborar los resultados encontrados en la simulación. Además, se recomienda considerar la posibilidad de realizar una implementación real de techos y fachadas verdes en áreas seleccionadas del distrito. Estas acciones proporcionarán una validación más robusta de los efectos de estas

intervenciones y permitirán obtener datos empíricos para respaldar los hallazgos de la simulación computacional.

4. En última instancia, se sugiere a los responsables de tomar decisiones en San Juan de Lurigancho que, ante la limitada presencia de áreas verdes, consideren la implementación de medidas que fomenten la vegetación en los edificios. Esto podría incluir campañas para incentivar a los residentes del distrito sobre los beneficios de incorporar vegetación en sus entornos inmediatos. Además, se propone llevar a cabo un análisis más detallado en laboratorio o experimentos a escala local para comprender mejor el impacto de estas intervenciones y ajustar estrategias en consecuencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Viecco, H. Jorquera, A. Sharma, W. Bustamante, H. Fernando, and S. Vera, "Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter," *Building and Environment*, vol. 204, Jul. 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120
- [2] B. Gurjar and A. Nagpure, "Indian megacities as localities of environmental vulnerability from air quality perspective," *Journal of Smart Cities*, vol. 1, pp. 15-30, Sep. 2015. DOI: 10.18063/JSC.2015.01.003
- [3] K. Abhijith, P. Kumar, J. Gallagher, A. McNabola, J. Gallagher, R. Baldauf, R. Pilla, B. Broderick, S. Di Sabatino, and B. Pulvirenti, "Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments e A review," *Atmospheric Environment*, vol. 162, no. 10, pp. 71-86, May 2017. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014
- [4] ONU, "AIR POLLUTION AND CHILD HEALTH," 2018. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1157950/retrieve> . Accessed on: Jun. 19, 2023.
- [5] R. Dimitrova, N. Lurpongkukana, H. Fernando, G. Runger, P. Hyde, B. Hedquist, J. Anderson, W. Bannister, and W. Johnson, "Relationship between Particulate Matter and Childhood Asthma - Basis of a future warning system for Central Phoenix," *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, vol. 11, no. 10, pp. 28627-28661, Oct. 2011. DOI: 10.5194/acpd-11-28627-2011
- [6] Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, "Efectos del SO₂ en la salud de las personas," 2015. [Online]. Available:

[https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/VI Efectos del SO2 en la salud de las personas.pdf](https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/VI_Efectos_del_SO2_en_la_salud_de_las_personas.pdf). Accessed on: Jan. 14, 2024.

[7] C. Ebi and G. McGregor, "Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts," *Environmental Health Perspectives*, vol. 116, no. 11, pp. 1449-1455, 2008. DOI: 10.1289/ehp.11463

[8] R. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, London: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2003.

[9] W. Chen, L. Yan, and H. Zhao, "Seasonal Variations of Atmospheric Pollution and Air Quality in Beijing," *Atmosphere*, vol. 6, pp. 1753-1770, 2015. DOI: 10.3390/atmos6111753

[10] C. Gromke, R. Buccolieri, S. Di Sabatino, and B. Ruck, "A dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data," *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 13, pp. 8640–8650, Aug. 2008. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.019

[11] T. Liberalesso, C. Oliveira Cruz, C. M. Silva, and M. Manso, "Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives," *Land Use Policy*, vol. 96, pp. 104693, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104693

[12] D. Wuebbles, A. Sharma, A. Ando, L. Zhao, and C. Rigsbee, "Converging on Solutions to Plan Sustainable Cities," *Eos*, vol. 101, no. 10, Oct. 2020. DOI: 10.1029/2020EO150149

[13] A. Jeanjean, R. Buccolieri, J. Eddy, P. Monks, and R. Leigh, "Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 22, Jan. 2017. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.01.009

[14] A. Wania, M. Bruse, N. Blond, and C. Weber, "Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations," *Journal of*

environmental management, vol. 94, no. 9, pp. 91-101, Sep. 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.036

[15] P. Vos, B. Maiheu, J. Vankerkom, and S. Janssen, "Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?" *Environmental Pollution*, vol. 183, no. 19, pp. 113-122, Oct. 2012. DOI: 10.1016/j.envpol.2012.10.021

[16] SENAHMI, "VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – MARZO 2019," *BOLETÍN MENSUAL Vigilancia de la Calidad del Aire Lima Metropolitana*, vol. 19, no. 03, pp. 1-13, 2019.

[17] MINAM, "Indicador: Superficie de área verde urbana por habitante en Lima Metropolitana," Accessed: Jun. 19, 2018. [Online]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/998>

[18] MINSA, "Análisis de Situación de Salud del Distrito de San Juan de Lurigancho 2019," 2019, pp. 1-13.

[19] R. A. Garay Saravia, F. R. Urdanivia Lermo, and E. A. Medina Dionicio, "Vigilancia de la calidad del aire área metropolitana de Lima y Callao (noviembre 2021)," 2021.

[20] ENVI-met: Environmental Meteorology Software, [Online]. Available: <https://www.envi-met.com/>. Accessed on January 14, 2024.

[21] E. Palazzola, J. Bradtke, y R. J. Burnham, "Hedera helix - CLIMBERS," Jul. 29, 2013. [Online]. Available: <https://climbers.lsa.umich.edu/hedera-helix/>. Accessed on January 14, 2024.

- [22] N. Tomson, R. Michael, and I. Agranovski, "Removal of particular air pollutants by Australian vegetation potentially used for green barriers," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 12, no. 05, pp. 101070, May 2021. DOI: 10.1016/j.apr.2021.101070
- [23] B. A. Currie and B. Bass, "Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model," *Urban Ecosyst*, vol. 11, pp. 409-422, 2008. DOI: 10.1007/s11252-008-0054-y
- [24] M. Taleghani, A. Clark, W. Swan, y A. Mohegh, "Air pollution in a microclimate; the impact of different green barriers on the dispersion," *Science of the Total Environment*, vol. 134649, Sep. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134649
- [25] T. Morakinyo, Y. F. Lam, and S. Hao, "Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement," *Journal of Environmental Management*, vol. 182, pp. 595–605, 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077
- [26] K.-M. Wai, T. Z. Tan, T. E. Morakinyo, T.-C. Chan, and A. Lai, "Reduced effectiveness of tree planting on micro-climate cooling due to ozone pollution—A modeling study," *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, pp. 101803, 2020. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101803
- [27] M. Mircea et al., "The Role of Vegetation on Urban Atmosphere of Three European Cities. Part 2: Evaluation of Vegetation Impact on Air Pollutant Concentrations and Depositions," *Forests*, vol. 14, p. 1255, 2023. DOI: 10.3390/f14061255
- [28] S. Ancapichún and J. Garcés-Vargas, "Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile," *Ciencias Marinas*, vol. 41, no. 1, pp. 1-20, 2015. DOI: 10.7773/cm.v41i1.2338
- [29] S. Schneiderbauer y M. Krieger, "What do the Navier-Stokes equations mean?" *European Journal of Physics*, vol. 35, p. 015020, Jan. 2014. DOI: 10.1088/0143-0807/35/1/015020

[30] Dr. Mahendra Choudhary y Vaibhaw Garg, "Causes, Consequences and Control of Air Pollution," presentado en International Conference on Advances in Engineering & Technology, Aug. 2013.

[31] OMS, "Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado," [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. Accessed: Jun. 19, 2023.

[32] MIT, "Urban Street Canyons," [Online]. Available: http://web.mit.edu/nature/archive/student_projects/2009/jcalamia/Frame/05_canyonwind.html. Accessed: Jun. 20, 2023.

[33] M. Ottelé, H. Bohemen, and A. Fraaij, "Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls," *Ecological Engineering - ECOL ENG*, vol. 36, no. 02, pp. 154-162, Feb. 2010. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.02.007

[34] Green Roof for a Healthy Cities-North America Inc., "About Green Walls and Green Roofs," [Online]. Available: <https://greenroofs.org/about-green-walls>. Accessed: Jun. 20, 2023.

[35] M. Bruse and H. Fleer, "Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model," *Environmental Modelling & Software*, vol. 13, no. 3-4, pp. 373-384, 1998. DOI: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5

[36] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, Ciudad de México: McGraw-Hill Education, 2014.

[37] M. Collazo-Ortega, U. Rosas y J. Reyes-Santiago, "Towards Providing Solutions to the Air Quality Crisis in the Mexico City Metropolitan Area: Carbon Sequestration by Succulent

Species in Green Roofs," PLoS Curr, vol. 9, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/currents.dis.bb66ae4f4f3c6eb118a019a29a9ce80f>.

[38] T. Sternberg, H. Viles, A. Cathersides y M. Edwards, "Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L) on historic walls in urban environments," *Sci Total Environ*, vol. 409, no. 1, pp. 162-168, 2010. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.09.022.

[39] Informe Movilidad - Sexto Informe de Resultados sobre Calidad de Vida. (2015). Lima Cómo Vamos. Recuperado de <https://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2016/09/InformeMovilidad2015-1.pdf>

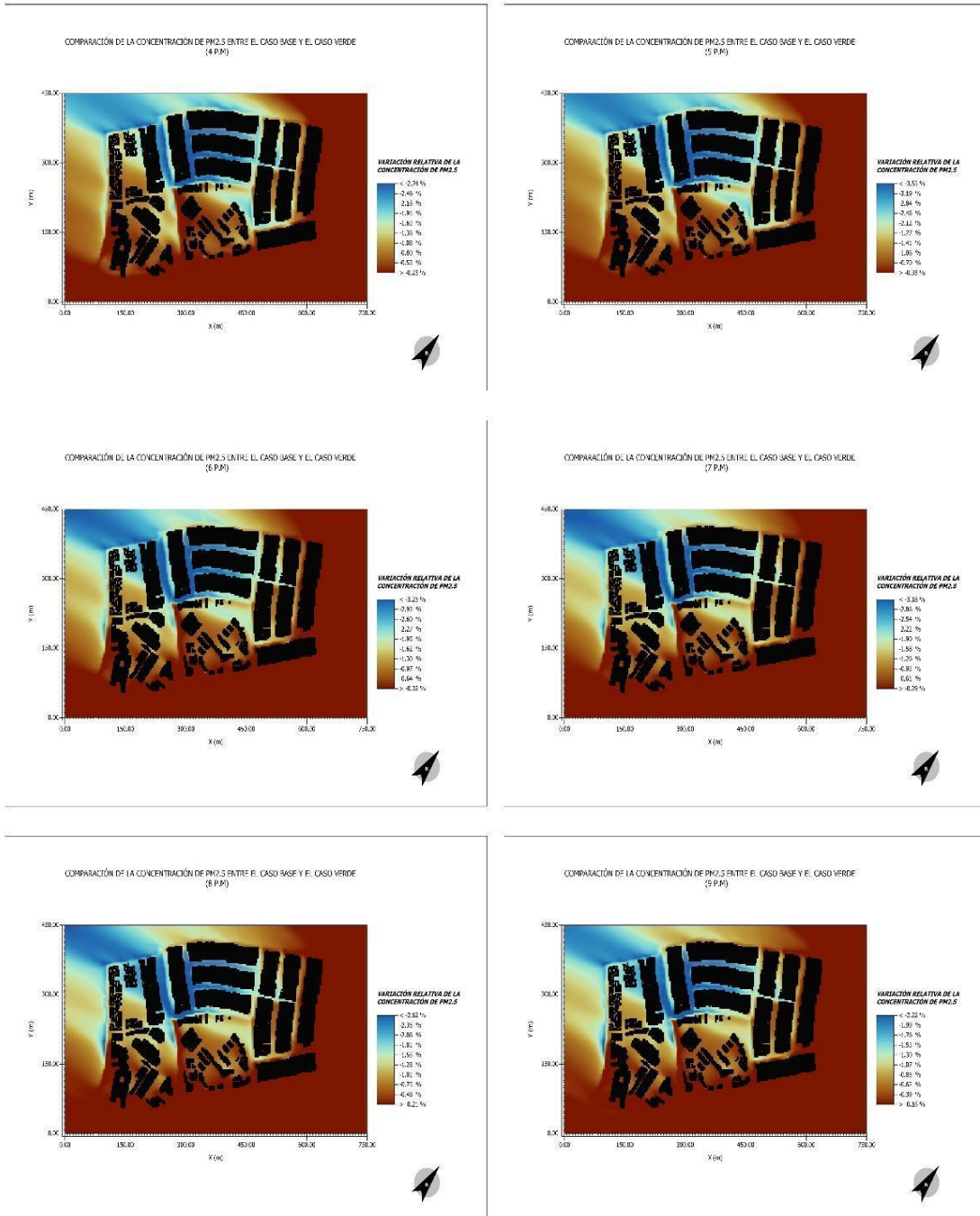
[40] S. Y. Park, H. J. S. Fernando, and S. C. Yoon, "Simulation of flow and turbulence in the Phoenix area using a modified urbanized mesoscale model," *Meteorological Applications*, vol. 21, pp. 948-962, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/met.1442>

[41] H. Simon, J. Lindén, D. Hoffmann, P. Braun, M. Bruse y J. Esper, "Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees--a case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data," *Landscape and Urban Planning*, vol. 174, pp. 33-40, 2018.

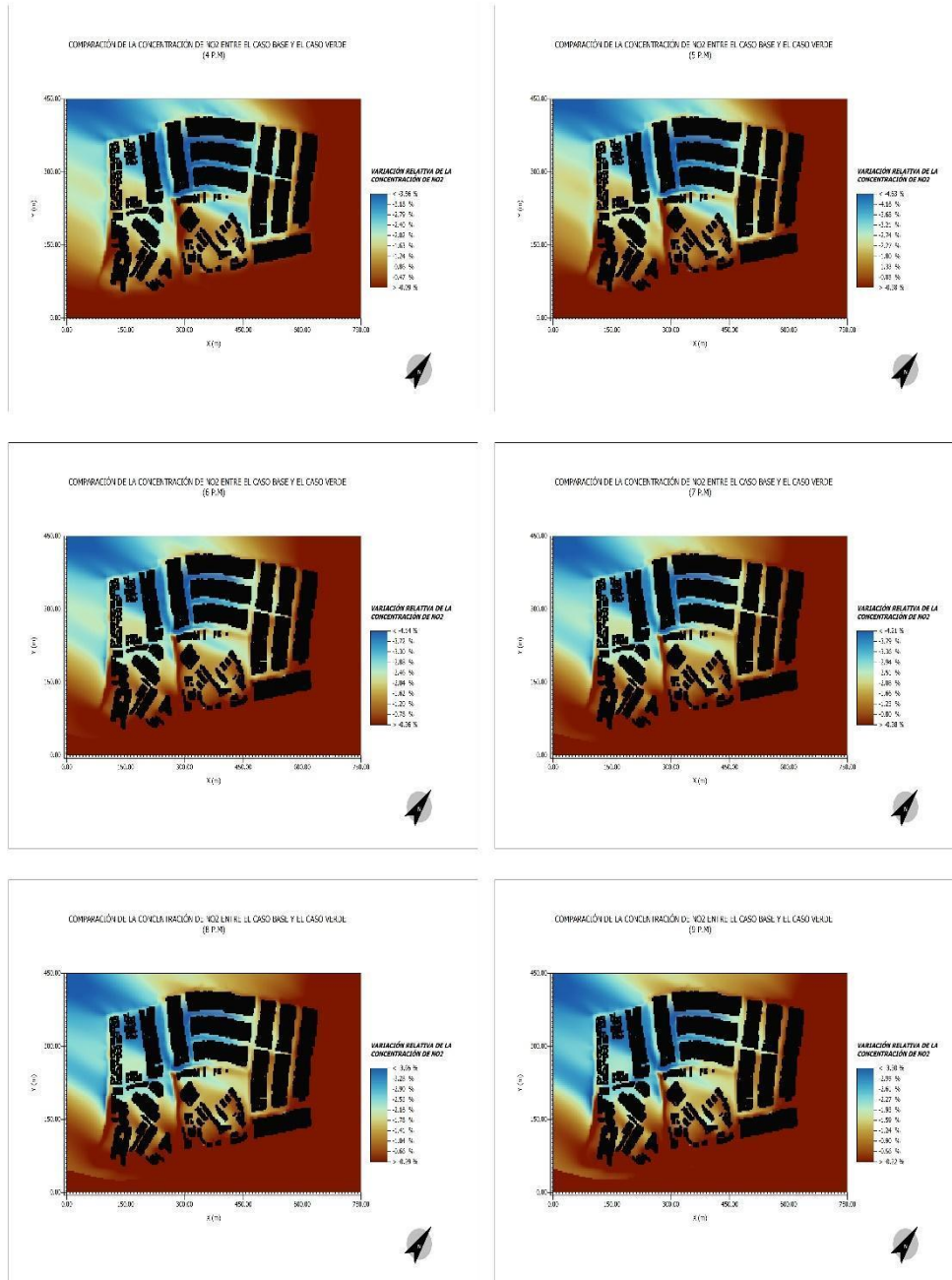
[42] S. Oquendo-Di Cosola, F. Olivieri, L. Ruiz-Garcia, and J. Bacenetti, "An environmental Life Cycle Assessment of Living Wall Systems," *Journal of environmental management*, vol. 254, no. 11, pp. 109743, Nov. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109743

ANEXOS

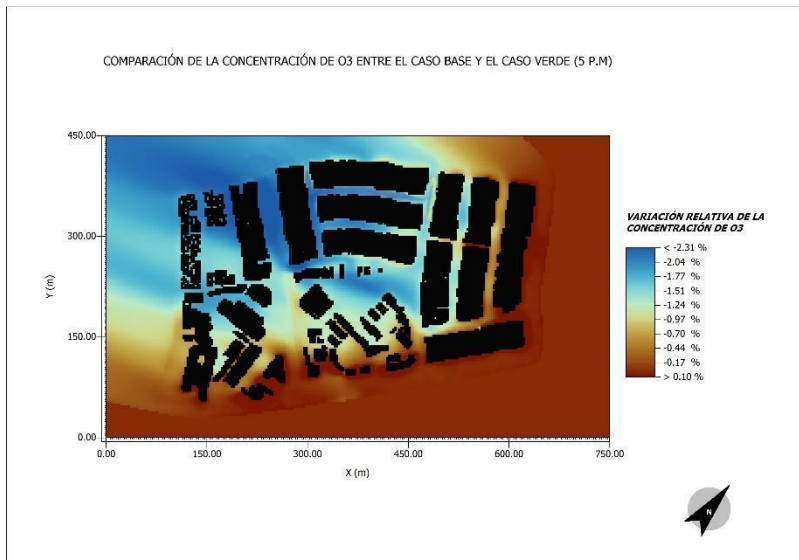
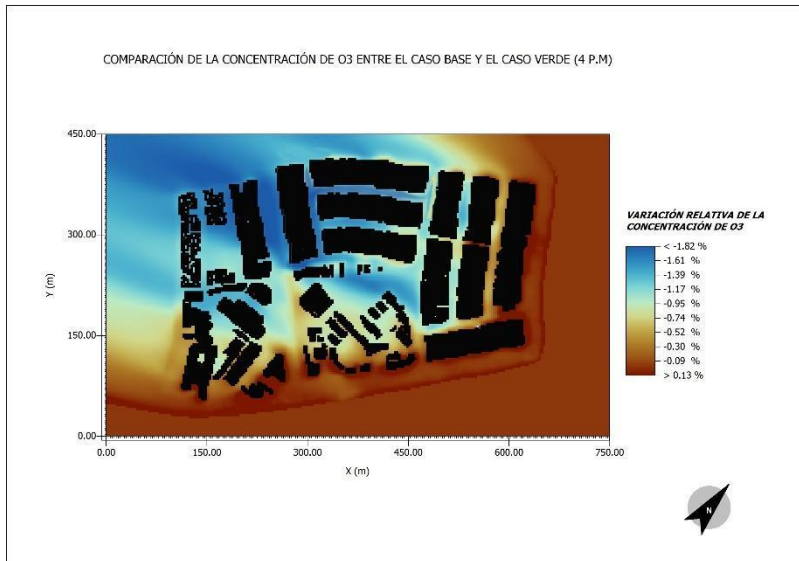
ANEXO 1: Resultados de las simulaciones de la concentración del PM2.5 en el horario de análisis



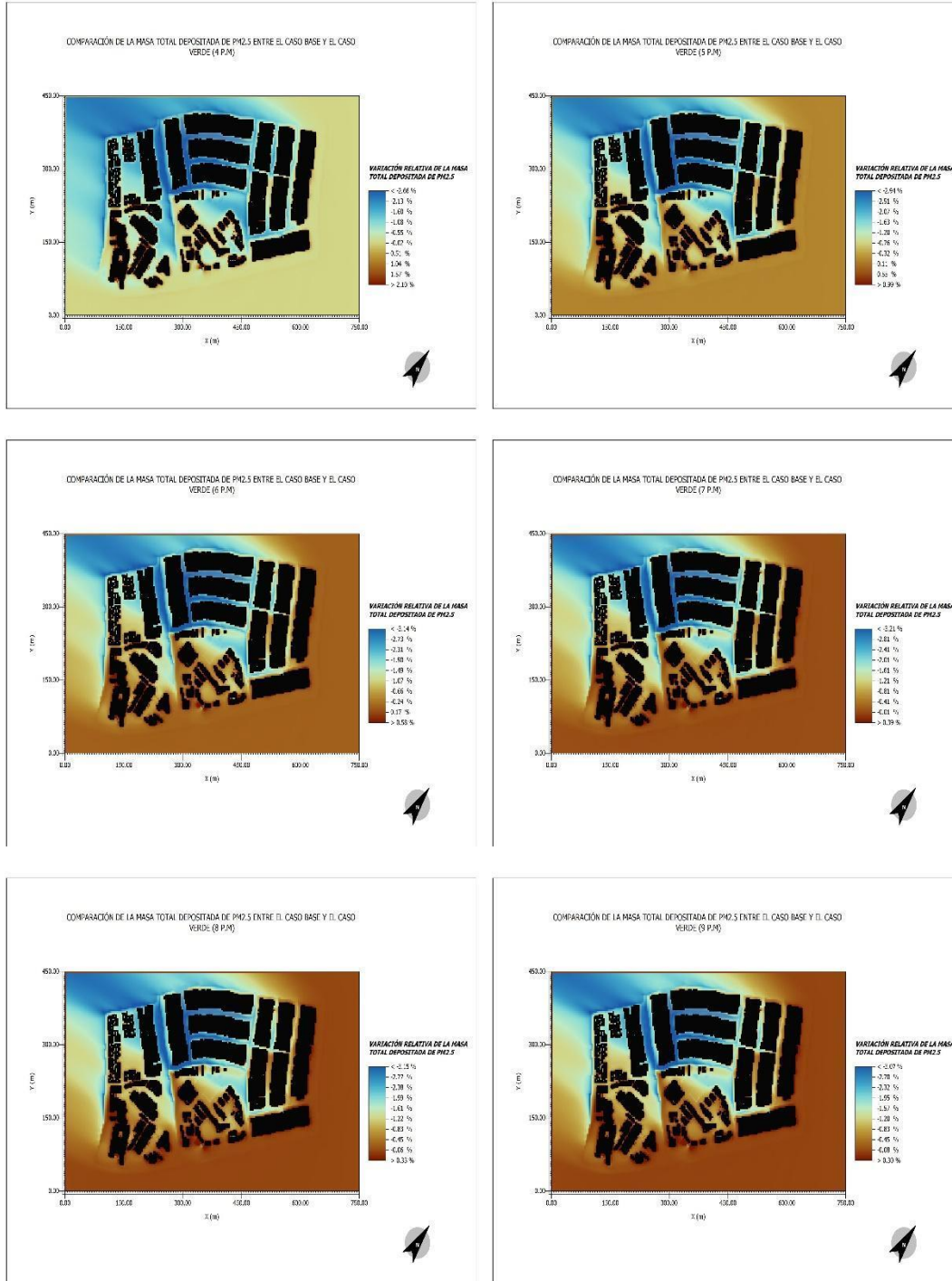
ANEXO 2: Resultados de las simulaciones de la concentración del NO₂ en el horario de análisis



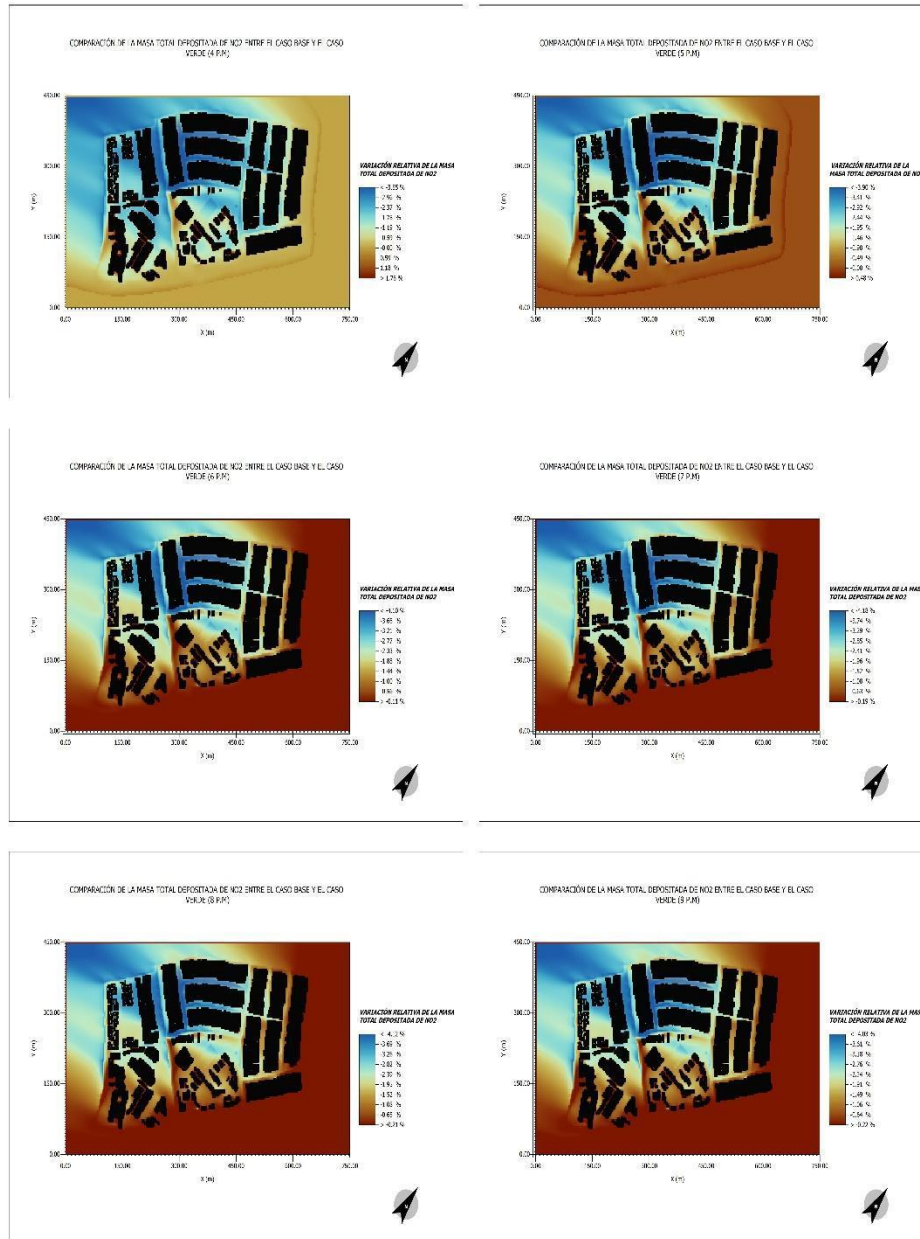
ANEXO 3: Resultados de las simulaciones de la concentración del O3 en el horario de análisis



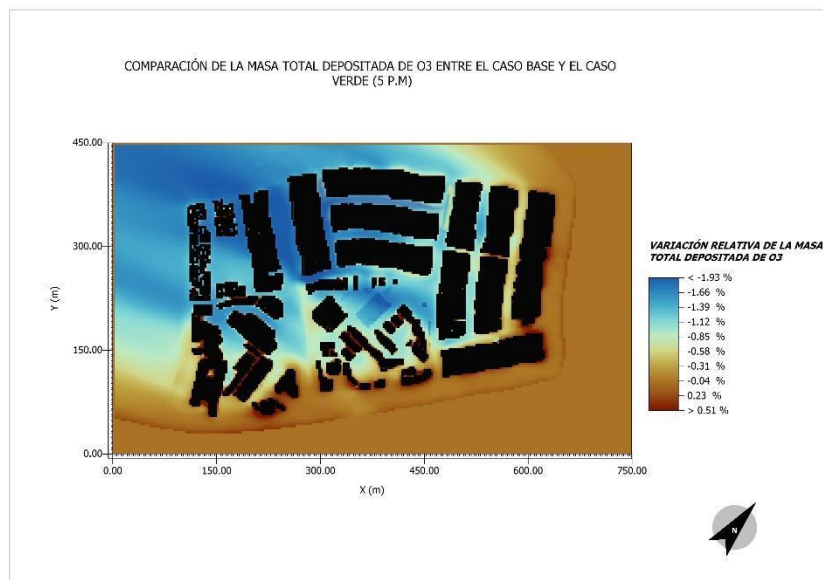
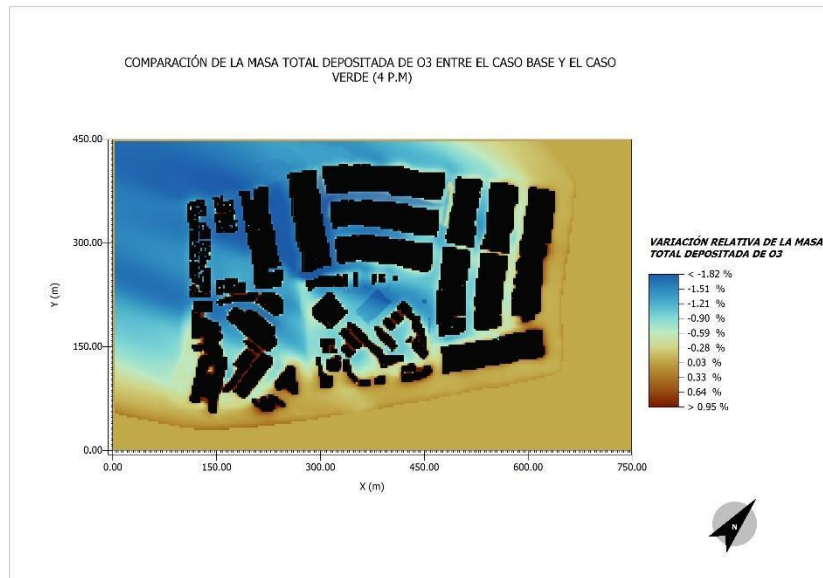
ANEXO 4: Resultados de las simulaciones de la deposición del PM2.5 en el horario de análisis



ANEXO 5: Resultados de las simulaciones de la deposición del NO2 en el horario de análisis



ANEXO 6: Resultados de las simulaciones de la deposición del O₃ en el horario de análisis



ANEXO 7: Variación de la temperatura

