



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS

INFLUENCIA DEL CAMBIO DE LA COBERTURA DE SUELO
URBANO EN LA METEOROLOGÍA DE LA CIUDAD DE
MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ANA CARLA FERNÁNDEZ VALDÉS

DR. ARON JAZCILEVICH
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

La Ciudad de México (CDMX) es la séptima ciudad más poblada del mundo y representó en el 2016 el mayor aporte económico al país con un PIB del 20 %. La urbanización en grandes ciudades, modifica el flujo atmosférico y en especial el balance de energía superficial. Estos cambios necesitan ser parametrizados para poder representar las condiciones meteorológicas urbanas de la CDMX. Con este objetivo, el sistema de modelación de Pronóstico e Investigación del Tiempo [Weather Research Forecasting (WRF)] acoplado a un modelo de dosel urbano (UCM) de multicapas (BEP) fue implementado en la CDMX. La Herramienta Portal de Acceso y Base de Datos Urbana Mundial (WUDAPT) que se basa en la clasificación de zonas climáticas locales fue utilizada para proveer los parámetros urbanos y el mapa de cobertura de suelo al modelo WRF/urbano, acorde con las características de la ciudad. Se realizaron dos tipos de simulaciones: una empleando la integración urbana (uWRF) y otra, en su forma tradicional (WRF), en el periodo seco y lluvioso del año 2016 sobre cuatro dominios anidados. De manera general, los resultados de este estudio concluyeron que uWRF captura con mayor exactitud la influencia de la ciudad sobre el comportamiento de la temperatura, viento y capa límite planetaria en comparación con WRF tradicional. Para ambos periodos se encontró que: debido al cambio de cobertura de suelo y la parametrización urbana empleada, el efecto de la isla de calor urbano diurna es representado con mayor intensidad por uWRF que por WRF. Además, las simulaciones de la velocidad del viento con uWRF presentaron un mejor ajuste a las observaciones, en especial en la noche, donde se registraron los valores extremos.

Abstract

Mexico City is currently the 7th most populated city in the world and contributes economically on almost 20% of the country's GDP. The modification on atmospheric fluxes and surface energy balance need to be parametrized in mesoscale urban studies. Aiming to characterize Mexico City's urban meteorological conditions, the Weather Research Forecasting (WRF) modelling system coupled with a multi-layer urban canopy model (BEP), was implemented. World Urban Data Access Portal Tool (WUDAPT) was used to provide urban parameters and land cover maps into the modeling scheme in accordance with the city landscape. Two types of simulations were done: with urban integration (uWRF) and the traditional way (WRF), during both dry and wet seasons of the year 2016 in four nested modelling domains. In general, results show that uWRF better captures the influence of the city on the behavior of temperature, wind and planetary boundary layer in comparison with the WRF simulations. Both, dry and wet seasons showed greater daytime urban heat island effect intensity with the uWRF simulations. Additionally, uWRF wind simulations were closer to experimental observations specially during night periods where the higher values for this variable were registered.

Tabla de contenido.

Resumen	2
Abstract	2
Índice de Figuras.	5
Índice de Tablas.	8
Introducción	9
1. Marco Teórico.	13
1.1. Influencia urbana en las propiedades atmosféricas. Descripción de las variables de interés. 15	
1.1.1. Temperatura	15
1.1.2. Viento	17
1.1.3. Capa limite planetaria (PBL).....	19
1.2. Generalidades de la modelación urbana en los modelos de mesoescala.	23
1.2.1. Modelos de Dosel Urbano (UCMs).....	26
1.3. Antecedentes. Estado del arte.....	29
2. Área de Estudio y Materiales utilizados.....	33
2.1. Características geográficas, climáticas y urbanas de CDMX.....	33
2.2. WRF/Urbano. BEP.....	35
2.2.1. Consideraciones teóricas del BEP.....	38
2.3. WUDAPT. Características Principales.....	40
3. Metodología y configuración del modelo.	44
3.1. Adaptación del uWRF al formato de archivos WUDAPT.	44
3.2. Configuración del Modelo.	45
3.3. Esquema de Evaluación.	48
4. Resultados y discusión	51
4.1. Comportamiento promedio de la temperatura potencial, viento a 10m y la altura de la PBL. 51	
4.1.1. Temperatura potencial.....	51
4.1.2. Viento a 10m.	55
4.1.3. Altura de la PBL (PBLH).....	59
4.1.4. Corte transversal de la velocidad del viento.....	61
4.2. Comparación de los resultados de la modelación con las observaciones.....	68
4.2.1. Temperatura.	68
4.2.2. Velocidad del viento a 10m.....	69
4.2.3. PBLH.....	70
4.3. Comparación estadística de la simulación y las observaciones.....	72
4.3.1. Temperatura.	72

4.3.2. Velocidad del viento a 10 m.....	76
5. Conclusiones.....	80
6. Recomendaciones.....	83
7. Bibliografía.....	84
8. Anexos.....	96
Anexo A.....	96
Anexo B.....	97

Índice de Figuras.

Figura 1.1. Escalas espaciales en un área urbana y sus respectivas capas atmosféricas. Fuente: C. S. B. Grimmond, 2006, p. 13.....	14
Figura 1.2. Flujos básicos de una atmósfera urbana en un terreno complejo. El panel de la izquierda muestra las condiciones nocturnas y el de la derecha las diurnas. Fuente: Fernando (2010).	19
Figura 1.3. Zonas de la capa de límite urbano. La forma logarítmica se refiere a la velocidad del viento donde z_0 y z_{ou} son la altura de desplazamiento y de rugosidad respectivamente y la forma exponencial se refiere a la velocidad promedio en el dosel. Donde a es el coeficiente de atenuación y u_h es la velocidad promedio del dosel de altura h_B . Fuente: Fernando (2010).....	21
Figura 1.4. Vista del esquema de superficie urbano de una sola capa, todas las superficies interactúan con el mismo nivel atmosférico (líneas punteadas). Fuente: V. Masson (2006).	28
Figura 1.5. Vista del esquema de superficie urbana de multicapas: las interacciones entre el esquema y la atmósfera están representadas por líneas gruesas discontinuas. Cada variable forzante se selecciona en el correspondiente nivel atmosférico. Fuente: V. Masson (2006).	29
Figura 2.1. Crecimiento urbano de la CDMX desde 1950 hasta 2010. Fuente: PUEC-UNAM con base en el marco geo-estadístico municipal 2005, versión 1; 2009, versión 4.1; 2010, versión 5. México: IG, UNAM & INEGI.....	33
Figura 2.2. Visión general del sistema de modelación integrado WRF/urbano, incluye un conjunto de herramientas de modelación urbana en la física base del WRF V3.1 y sus aplicaciones. Fuente: (Chen et al., 2011).	37
Figura 2.3. Esquemas de los modelos SLUCM (lado izquierdo) y multicapas BEP (lado derecho). Fuente: Fei Chen et al. (2011).	40
Figura 2.4. Mapa de LCZ sobre CDMX usando la clasificación aleatoria de bosques.	43
Figura 3.1. Diagrama de Flujo para usar WUDAPT en el uWRF/BEP, tomado de “Urbanized-WRF-modeling-using-WUDAPT-web-version-March2016.pdf”	45
Figura 3.2. Dominios anidados.	46
Figura 3.3. Uso del Suelo, 40 Clases (31-40: urbanas), las líneas rojas representan la ubicación de los cortes transversales.....	47
Figura 3.4. Representación de las clases urbanas sobre el dominio cuatro.....	47
Figura 3.5. Ubicación de las estaciones meteorológicas usadas para la evaluación.....	50
Figura 4.1. Comportamiento promedio horario diurno de la temperatura potencial (°C) durante el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF -WRF.....	52
Figura 4.2. Comportamiento promedio horario nocturno de la temperatura potencial (°C) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF tradicional, c) uWRF - WRF.....	53
Figura 4.3. Comportamiento promedio horario diurno de la temperatura potencial (°C) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF – WRF.....	54
Figura 4.4. Comportamiento promedio horario nocturno de la temperatura potencial (°C) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF – WRF.....	55
Figura 4.5. Comportamiento promedio horario diurno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.....	56

Figura 4.6. Comportamiento promedio horario nocturno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.	57
Figura 4.7. Comportamiento promedio horario diurno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF tradicional, c) uWRF - WRF.	58
Figura 4.8. Comportamiento promedio horario nocturno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.	58
Figura 4.9. Comportamiento promedio horario diurno de la PBLH (m) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.	59
Figura 4.10. Comportamiento promedio horario nocturno de la PBLH (m) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.	60
Figura 4.11. Comportamiento promedio horario diurno de la PBLH (m) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.	61
Figura 4.12. Comportamiento promedio horario nocturno de la PBLH (m) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.	62
Figura 4.13. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 21 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.	63
Figura 4.14. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00 h del 22 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.	64
Figura 4.15. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 14 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.	64
Figura 4.16. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00 h del 15 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.	65
Figura 4.17. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 21 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.	66
Figura 4.18. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 14 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.	66
Figura 4.19. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00h del 22 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.	67
Figura 4.20. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00h del 15 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.	67
Figura 4.21. Ciclo temporal de la Temperatura (K) en el periodo seco, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).	68
Figura 4.22. Ciclo temporal de la Temperatura (K) en el periodo lluvioso, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).	69
Figura 4.23. Ciclo temporal de la velocidad del viento en el periodo seco, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).	70

Figura 4.24. Ciclo temporal de la velocidad del viento en el periodo lluvioso, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).	70
Figura 4.25. Evolución de la PBLH periodo seco, observaciones (triángulos verdes), uWRF (línea roja), WRF (línea azul).	71
Figura 4.26. Evolución de la PBLH periodo seco, observaciones (triángulos verdes), uWRF (línea roja), WRF (línea azul).	72
Figura 4.27. Resumen estadígrafo de las simulaciones de la temperatura para el periodo seco.....	74
Figura 4.28. Resumen de los estadígrafos de las simulaciones de la temperatura para el periodo lluvioso.	75
Figura 4.29. Resumen de los estadígrafos de las simulaciones de la velocidad del viento para el periodo seco.....	77
Figura 4.30. Resumen de los estadígrafos de las simulaciones de la velocidad del viento para el periodo lluvioso.	79

Índice de Tablas.

Tabla 3.1. Estaciones Meteorológicas con su clase urbana correspondiente, coordenadas y elevación sobre el nivel del mar.	49
Tabla 4.1. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la temperatura (K) para cada estación analizada durante el periodo seco.	73
Tabla 4.2. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la temperatura (K) para cada estación analizada durante el periodo lluvioso.	74
Tabla 4.3. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la velocidad del viento (m/s) para cada estación analizada durante el periodo seco.	76
Tabla 4.4. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la velocidad del viento (m/s) para cada estación analizada durante el periodo lluvioso.	78

Introducción

Según un informe de Naciones Unidas, en el año 2016 la población urbana representó el 54.5% de la población mundial. Casi un cuarto de esta (23.9%) vive en áreas urbanas con una población mayor o igual de 1 millón de habitantes (Cox, 2015). Se espera que la actual tendencia en el incremento de la población y la expansión urbana mundial continúe durante este siglo, según un informe del 2014 sobre el crecimiento de las poblaciones urbanas de la División de Población de las Naciones Unidas señala que para el 2050 se espera que este incremento sea del 66%.

El área metropolitana de la Ciudad de México (CDMX)¹, como lo muestra un estudio realizado en el 2016 sobre las principales urbes del mundo de la División de Población de las Naciones Unidas, es la séptima ciudad más poblada del mundo con un total de 21.157 millones habitantes y es, además, la segunda más poblada de todo el continente americano antecedida de Sao Paulo, Brasil. Según los datos proporcionados por este mismo informe, se espera que para el 2030 la ciudad descienda a la décima posición de la lista con una población total de 23.865 millones habitantes, teniendo en cuenta que la tasa promedio anual de crecimiento se mantenga constante en un valor de 0.9%. Según las estadísticas del INEGI², hoy la población existente en la ciudad representa el 21% de la población urbana total del país, además la CDMX es considerada una de las ciudades más importantes del país, pues la misma, representó en el 2016 el mayor aporte económico al país con PIB con casi del 20 %.

La urbanización da lugar a una serie de interacciones complejas en la atmósfera terrestre que modifica los procesos termodinámicos, radiativos, dinámicos e hidrometeorológicos dentro del área urbana y su huella regional que la rodea (Council et al., 2012). Desde el punto de vista de la física atmosférica, se modifica el balance de energía superficial en las ciudades, las propiedades atmosféricas locales y regionales como la capa límite planetaria (PBL) incluyendo los campos de viento, la estabilidad atmosférica y la turbulencia. (Chen et al., 2011). El efecto combinado del cambio climático y el rápido crecimiento urbano, acompañado del desarrollo económico e industrial, hará que las personas que viven en las ciudades sean más vulnerables a un gran número de problemas medioambientales urbanos (Chen et al., 2011, 2012).

En general en las áreas urbanas, su morfología tiende a reducir la velocidad del viento conduciendo a una menor ventilación. Además, el flujo de calor latente es menor que sus alrededores. Por tanto, la intensidad del flujo de calor sensible y la capacidad de almacenamiento de calor de las superficies urbanas son las principales fuentes de calor que

¹ Esta área incluye 76 municipalidades.

² INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

conducen al aumento de las temperaturas en estas áreas en comparación con sus alrededores resultando en el efecto isla de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés).

Los efectos físicos antes mencionados, tienen que ser incluidos y representados como flujos promedio en las simulaciones atmosféricas de una ciudad. En los modelos atmosféricos de mesoescala, los elementos individuales urbanos no son resueltos por lo que el desafío es parametrizar su efecto agregado. Los sistemas de modelación atmosférica de escalas múltiples que consideran la morfología de los elementos individuales son una valiosa herramienta que incluyen los aspectos mencionados. Estos son capaces de predecir y simular las condiciones meteorológicas desde la escala regional hasta la de edificios. Esta investigación se enmarca en el desarrollo e implementación de modelos dinámicos de avanzada que consideran el efecto de la urbanización.

En los últimos años se han dado importantes avances en el pronóstico meteorológico urbano como lo es el desarrollo de los modelos de balance de energía superficial urbana y en particular los de dosel urbano. Éstos pueden ser acoplados a los modelos de mesoescala de Predicción Numérica del Tiempo (NWP) como parametrizaciones internas sobre las variables espacialmente promediadas calculadas por estos modelos de NWP (Council et al., 2012). El modelo Weather Research and Forecast (WRF), es uno de estos modelos de NWP que ha sido acoplado a diferentes modelos urbanos y presenta un conjunto de parametrizaciones físicas para su implementación y desarrollo. El WRF integrado a modelos de superficie del terreno y a los de dosel urbano es la mejor opción para unir los vacíos entre la predicción numérica del tiempo en la mesoescala tradicional (10^5 m) y la modelación de transporte y dispersión (T&D) en la microescala (10^0 m) (Fei Chen et al., 2011). Más de 100 grupos en 25 países aplican este modelo acoplado para el pronóstico del tiempo y la calidad del aire sobre las ciudades, para investigar los impactos de la urbanización en la meteorología regional y los recursos hídricos, y también para explorar estrategias de adaptación de los urbanistas (Powers et al., 2017).

La Herramienta Portal de Acceso y Base de Datos Global (WUDAPT, por sus siglas en inglés), es una base de datos mundial que provee los datos y parámetros morfológicos que caracterizan varias ciudades del mundo. WUDAPT se basa en el marco de clasificación de zonas climáticas locales, estas contienen 10 clases urbanas que en su totalidad agrupan diferentes formas y funciones de una ciudad.

Planteamiento del problema.

¿Los resultados de las simulaciones actuales realizadas solamente con los modelos de NWP representan correctamente las condiciones meteorológicas para la urbanizada CDMX?

A medida que las superficies en las regiones metropolitanas cambian su cobertura de suelo de natural y vegetal a urbano, se producen cambios en la temperatura del aire, el campo de viento y la altura de la capa de mezcla. Estas perturbaciones afectan la distribución de los contaminantes atmosféricos, aspectos que son de suma importancia para la CDMX, pues la misma, es conocida por su mala calidad del aire.

Lo anterior indica que se requiere de un mejor tratamiento de las características urbanas en los modelos numéricos (Jiang et al., 2008). Las simulaciones realizadas solamente usando modelo NWP no tienen en cuenta la morfología de la ciudad y, por tanto, la estimación del flujo atmosférico y de las variables que se manifiestan dentro de la capa límite es errónea. Por lo tanto, es necesario implementar un modelo que represente las condiciones meteorológicas para la CDMX donde se considere el efecto de la urbanización en la simulación. El WRF/urbano es la respuesta a estas necesidades, pues el mismo:

- Captura con exactitud las influencias de las ciudades sobre el comportamiento del viento y la temperatura (variables de interés) en la capa límite planetaria.
- Determina mejor los movimientos de los flujos a meso-micro escala y por tanto la distribución de los contaminantes.
- Puede ser acoplado a los modelos de Transporte y Dispersión (T&D) y a de exposición humana.

Hipótesis.

La incorporación de la cobertura de suelo urbana en los modelos de mesoescala que consideren los efectos mecánicos y térmicos influenciados por la urbanización, mejorará las predicciones de las variables atmosféricas, así como también la distribución y estructura de la PBL en la CDMX.

Objetivo General: Incorporar la cobertura de suelo del WUDAPT en el sistema de modelación integrado WRF/urbano para simular las condiciones meteorológicas en CDMX.

Objetivos Específicos:

- Investigar e implementar un sistema que contenga una variedad de clases urbanas representativas de la CDMX y que pueda ser integrado al WRF/urbano.
- Simular el comportamiento de las principales variables de interés en diferentes épocas del año y durante el día y la noche sobre la CDMX con la implementación del WRF/urbano.

- Identificar las zonas urbanas de la CDMX que más modifican el flujo y las variables dentro de la atmósfera de la ciudad.
- Examinar las diferencias entre las simulaciones del WRF y el WRF/urbano.
- Evaluar los resultados de las simulaciones realizadas.

Esta tesis está estructurada en cuatro capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el primer capítulo, llamado marco teórico, se describen los principales conceptos físicos y efectos de la urbanización en la atmósfera, enfatizando el comportamiento de la temperatura (efecto isla de calor urbano), el viento y la altura de la capa límite planetaria (PBL); además se muestra una panorámica general de la modelización urbana y sus principales consideraciones teóricas. También, se describe el estado de la ciencia mundial y nacional referente a el uso de los modelos urbanos, y en especial el WRF/urbano, para diferentes aplicaciones.

El segundo capítulo, titulado área de estudio y materiales utilizados, muestra una descripción de las influencias mencionadas en el capítulo uno, pero enfocadas sobre la CDMX. Por otro lado, se detalla el WRF/urbano, específicamente, la parametrización urbana empleada. También, se expone la herramienta que fue usada para generar el mapa de uso del suelo que contiene las diferentes clases urbanas de la ciudad y las bases teóricas que lo sustentan.

El capítulo tres, nombrado metodología y configuración del modelo, se desarrolla el trabajo realizado por el autor para la implementación de las nuevas clasificaciones urbanas, así como todas las configuraciones del modelo y de las simulaciones realizadas y el esquema de evaluación empleado para la comparación de los resultados contra las observaciones.

El último capítulo es donde se muestran y se discuten los resultados obtenidos en las simulaciones, así como una evaluación crítica de los resultados obtenidos.

1. Marco Teórico.

Según Grimmond & Souch (1994), para entender la naturaleza del clima urbano, predecir los efectos de la urbanización o mejorar algunos de sus efectos hidro-climáticos es necesario comprender el papel jugado por el uso de suelos urbanos. Algunas características físicas de las áreas urbanas (por ejemplo, el tamaño) son independientes y este es un factor que puede ser usado para diferenciarlas. Existen características comunes de las áreas urbanas, las cuales son: los cambios de cobertura del suelo, la morfología y sus emisiones. Estas últimas presentan marcadas diferencias en comparación con las superficies no urbanas.

La **cobertura de suelo** en una zona urbana es la relación entre la cantidad de cobertura vegetal en y la cubierta impermeable o construida, donde esta última es mayor en los centros de las ciudades y menor en zonas residenciales. La fracción construida consiste en caminos pavimentados, aceras y estacionamientos, así como los edificios.

La **morfología** o geometría es una de las características a considerar, pues la heterogeneidad de las ciudades debido a la compleja geometría tridimensional de las estructuras impacta en el flujo y en el intercambio de radiación (Kanda, 2007). Además, los materiales de construcción urbanos tienen diferentes características térmicas y radiativas con relación a los materiales naturales lo que afecta el almacenamiento de calor y el intercambio radiativo. La geometría de las ciudades puede ser medida de diferentes formas, entre ellas:

- La altura de los edificios: razón de aspecto de la calle (H/W), medición del cañón urbano (espacio tridimensional limitado por los planos de los edificios que están en contacto con la calle).
- El factor de visión del cielo (SVF, por sus siglas en inglés): significa la fracción de la cúpula del cielo visible desde un punto dado al aire libre.
- Índice de compacidad: está definido como la razón entre el área superficial del edificio (excluyendo el área plana) y el área superficial de un cubo hipotético que contiene el mismo volumen del edificio.

Las áreas urbanas son la fuente principal de **emisiones** antropogénicas de CO_2 , debido al uso de combustibles fósiles para calentamiento o enfriamiento, procesos industriales y el transporte de personas y mercancías. Otro tipo de emisiones de suma importancia en zonas urbanas son las de calor y de humedad, conocidas como:

Calor sensible: Las emisiones de calor sensible antropogénico a la atmósfera pueden emitirse a través de los tubos de escape, chimeneas, equipamientos de aire acondicionados o calefacción; o indirectamente por conducción a través de la envoltura

de los edificios produciendo convección y radiación hacia el ambiente urbano (Sailor, 2011).

Calor Latente: Las emisiones de calor latente antropogénico son fuentes de humedad atmosférica que pueden ser emitidas mediante dos formas:

- La extracción del calor removido de las edificaciones a través de equipos de enfriamiento evaporativo.
- La reacción química que ocurre en la combustión de hidrocarburos combustibles, este proceso crea vapor de agua antropogénico como resultado de esta reacción química.

Los procesos meteorológicos urbanos se desarrollan en tres escalas espaciales (Council et al., 2012, p. 131); y en cada una de estas existen diferentes capas atmosféricas (C. S. Grimmond, 2006) como se observa en la Figura 1.1.

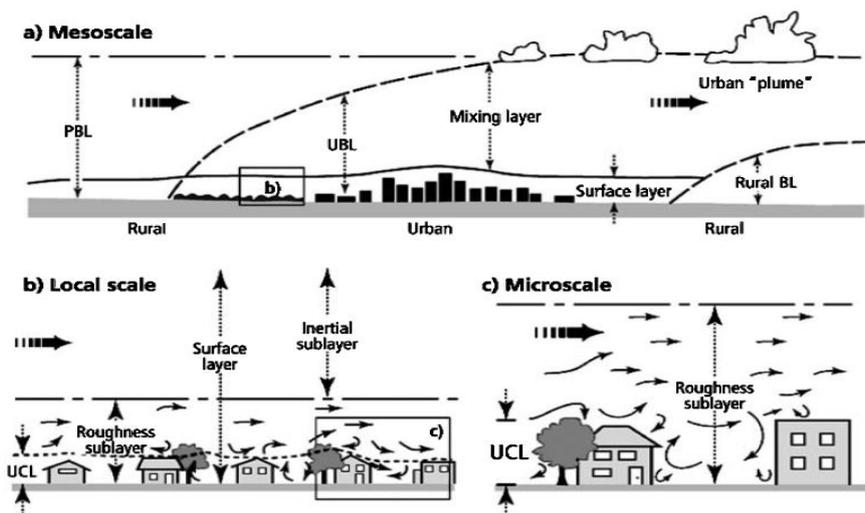


Figura 1.1. Escalas espaciales en un área urbana y sus respectivas capas atmosféricas. Fuente: C. S. B. Grimmond, 2006, p. 13

La micro-escala, cuya extensión vertical es considerada desde el suelo hasta el nivel del techo en lo que se conoce como la capa de dosel urbano [Urban Canopy Layer (UCL), por sus siglas en inglés]. La dimensión vertical de esta escala está dada por las dimensiones de los elementos de rugosidad (edificios, árboles, calles, etc.) y la horizontal varía desde uno hasta cien metros (Oke, 2011). Esta escala es la más relacionada con la vida de las personas, cuyas variaciones espaciales son significativas; pues en cortas distancias pueden manifestarse diferentes efectos como la radiación, el flujo del viento y el balance de energía de los elementos (Lee & Byun, 2004).

La escala urbana o local, es aquella donde existe un desarrollo urbano similar (cubiertas de superficies, tamaño y espaciado de los edificios, y actividades humanas). Esta similitud es

conocida como Zonas Climáticas Urbanas (UCZ). La escala local alcanza dos veces la altura media de los elementos de rugosidad (extensión de la subcapa de rugosidad (RSL)). La dimensión horizontal de esta escala depende en gran parte de la dimensión en sí de la UCZ, la cual puede variar desde uno hasta varios kilómetros.

La meso-escala contiene su propia capa de límite urbana (urban boundary layer (UBL), por sus siglas en inglés) que se encuentra embebida dentro de la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés), como se muestra en la figura 1(a). La altura de UBL es función de la variabilidad de las áreas en la ciudad y de las características de las áreas rurales que la rodea. Se ha estudiado que bajo buenas condiciones del tiempo durante el día, la UBL alcanza hasta dos km en la vertical y en la noche entre 100 y 300 m sobre grandes ciudades (T. R. Oke, 2011). Normalmente esta escala es de algunos pocos cientos de kilómetros en la dimensión horizontal y es donde los contaminantes secundarios son formados y dispersados (Martilli, Clappier, & Rotach, 2002a).

El estudio que aquí se realiza se enfoca sobre una atmósfera urbana en un terreno complejo en la meso-escala, enfatizando la atmósfera baja adyacente a la superficie terrestre. En esta el calor, el momentum y los flujos están controlados por el suelo y en especial por la cobertura de suelo urbana.

1.1. Influencia urbana en las propiedades atmosféricas. Descripción de las variables de interés.

1.1.1. Temperatura

Uno de los efectos urbanos más conocidos es el calentamiento urbano; ya que, por lo general, las ciudades son casi siempre más cálidas que la zona rural circundante. La magnitud de calentamiento urbano es altamente variable en tiempo y espacio. En promedio, las temperaturas urbanas pueden ser de 1-3°C más cálidas que el ambiente rural circundante, pero bajo ciertas condiciones meteorológicas (calma, noches despejadas en invierno) la temperatura del aire puede llegar a ser 10°C más cálida (S. Grimmond, 2007).

Las principales anomalías de temperaturas urbanas inducidas antropológicamente están representadas en el efecto de Isla de Calor Urbano (UHI, por sus siglas en inglés). Esta es una anomalía micro-climática caracterizada por temperaturas más cálidas comparada con el ambiente rural circundante (Emmanuel & Fernando, 2007). Este evento se manifiesta bajo determinadas circunstancias, especialmente en las noches bajo condiciones de viento débil y cielos despejados, aunque también puede ocurrir durante el día (Miao, Chen, LeMone, et al., 2009). Estas diferencias de temperaturas alcanzan su punto máximo cuatro horas después de la puesta de sol (Oke, 1982). Luego se presenta una ligera reducción de la intensidad del UHI

hasta que, en las primeras horas de la mañana, el calentamiento rural prácticamente elimina este efecto (Oke, 1982).

Este efecto se puede presentar en ciudades tanto de latitudes medias como tropicales. En estas últimas el evento tiene un comportamiento estacional pues puede presentar diferentes características en dependencia de la época del año -- periodo seco o lluvioso-- (Jauregui, 1997).

Existen diferentes tipos de UHI. Esta variedad está dada por las diferencias existentes entre zonas rurales y urbanas en el sub-suelo, en el suelo y en la temperatura del aire (Oke, 1995). El presente estudio analiza las diferencias apreciadas en la temperatura del aire; pero incluso esta categoría presenta dos vertientes, pues, se puede apreciar diferentes UHI dentro de la PBL: una se encuentra regida por los procesos que se manifiestan en la UCL y la otra por aquellos que se presentan en la UBL. Esta última es comúnmente denominada UHI_{UBL} y es principalmente resultado del calentamiento interno debido a la radiación y absorción en esta capa (Oke, 2011).

Los perfiles de temperatura durante el día justo encima del nivel de los techos son caracterizados por gradientes débiles, debido a la turbulencia intensa caracterizada por el calentamiento de la superficie y los elementos de rugosidad. Debido a esto la UHI en este periodo es pequeña en magnitud. Esto se debe a que la dinámica y la estructura de la UBL durante el día es muy similar a la de las capas de mezcla convectivas presentes sobre terrenos rurales, excepto que son más cálidas, turbulentas, secas y contaminadas (Oke, 1995).

En cuanto a la noche, el comportamiento de la UBL es completamente diferente en ambas zonas. En las rurales se manifiesta una fuerte inversión de la temperatura desde la superficie hasta alturas entre 100 y 300 m debido al enfriamiento radiativo, mientras que en zonas urbanas las temperaturas son más cálidas y el perfil es casi vertical debido al calentamiento y a la rugosidad, dando lugar a una capa de mezcla neutral o ligeramente estable (Oke, 2011).

Existen diferentes factores causantes de la UHI; las propiedades de los materiales de las superficies, asociadas con edificios, carreteras y otras infraestructuras; cambios en la morfología (geometría urbana), que alteran los intercambios de energía y el flujo de aire (S. Grimmond, 2007). Las propiedades térmicas de los materiales (ejemplo: la conductividad térmica) tiene un efecto sobre la UHI no solo espacial sino también temporal, pues este resultado es evidente en las primeras horas de la noche, sin embargo, el factor morfológico puede influenciar en cualquier horario.

Además de los factores mencionados anteriormente, los siguientes también contribuyen a la modificación del micro-clima urbano y por tanto a la generación de la UHI: (1) calor antropogénico: calor residual de la combustión; (2) efecto “invernadero” urbano: incremento de la radiación de onda larga entrante desde la contaminada atmosfera urbana; (3) pérdida de

evapotranspiración: reducción de las áreas verdes en las ciudades conducen a una mayor transferencia de calor sensible que latente; y (4) barreras contra el viento, ejemplo: la presencia de edificios reduce la habilidad del viento de acarrear el calor tanto el flujo sensible como el flujo de calor latente turbulento dando lugar a una insuficiente ventilación de la zona (Oke et al., 1991; Emmanuel & Fernando, 2007).

Para contrarrestar las consecuencias de la UHI, científicos han propuesto algunas medidas de mitigación; tales como, (1) aumento del albedo urbano, (2) incremento de la vegetación urbana, y (3) reducción de las emisiones de calor antropogénico (Touchaei & Wang, 2015).

1.1.2. Viento

Las áreas urbanas afectan los patrones de flujo de viento y por lo tanto el transporte de contaminantes en la atmósfera. El hecho más importante es que la velocidad de los vientos sobre las ciudades es menor que en las zonas no urbanas. Este detrimento ha sido atribuido a una mayor rugosidad superficial aerodinámica de las ciudades en comparación con sus alrededores (R. Bornstein & Johnson, 1977).

La travesía del aire sobre áreas urbanas encuentra a su paso ciertas superficies que alteran los campos de flujo. La investigación realizada por R. Bornstein (1987) resume que: “las UHI causan deformaciones tridimensionales del campo de presión, los edificios actúan como barreras al flujo, y la rugosidad de las superficies incrementa el arrastre de fricción sobre el flujo; estos factores y otros cambios modifican la velocidad vertical y horizontal del viento para los componentes medios y turbulentos del flujo”.

El comportamiento del viento a través y sobre las áreas urbanas también es un tema estudiado en diferentes escalas, donde en cada una de ellas existen diferentes procesos físicos que lo rigen. Existen cuatro rangos de escalas: regional (hasta 100 o 200 km), escala de ciudad (hasta 10 o 20 km, coincide con la meso-escala detallada en la sección anterior), escala de vecindario (hasta 1 o 2km, coincide con la escala urbana o local descrita en la sección anterior), y escala a nivel de calle (menos de 100 o 200 m, coincide con la micro-escala descrita en la sección anterior) (Britter & Hanna, 2003). En cada una de estas escalas los patrones de flujo se ven afectados por las áreas urbanas, pero cada una de diferente manera.

Los patrones medios sinópticos y las áreas urbanas representan una perturbación en el flujo, causando una desaceleración y desviación del mismo. Las anomalías térmicas (UHI) afectan el flujo existente alterando el campo de presión local. Esto cambia, por tanto, el balance de fuerzas y modifica la estabilidad y la turbulencia térmica, lo cual refuerza los movimientos verticales (Cermak et al., 2013). La magnitud de tales influencias depende de la fuerza del flujo gradiente y de la UHI. Existe un tipo de circulación llamado sistema de circulación de isla de calor

urbano. Durante condiciones de velocidades bajas del viento, fuertes UHI producen convergencia del viento en la mesoescala hacia el centro de la ciudad en forma de circulación centrípeta (Oliveira et al., 2003).

La escala de ciudad representa el diámetro de un área urbana promedio, donde las variaciones en el flujo son promediadas en la capa límite que se encuentra encima de la altura promedio de edificios individuales o grupos de ellos, donde pueden variar su tipo y el espaciado entre los mismos; además esta escala se destaca por la presencia de la fuerza de arrastre, la infusión de calor, la humedad proveniente de las actividades humanas, y la gran capacidad de almacenamiento de calor del concreto y otras estructuras. Se ha observado que el flujo es desviado sobre y alrededor del área urbana, esta desviación es en parte cinemática en dependencia del volumen de edificios y en parte dinámica debido a la fuerza de arrastre (Bitter & Hanna, 2003). En esta escala se observa también el fenómeno de UHI, alterando el balance de energía superficial debido a las diferencias de calor y humedad con las zonas rurales, resultando una convergencia de la componente horizontal hacia la ciudad y movimientos verticales sobre la ciudad, esto último implica que la profundidad de la capa de mezcla aumente sobre la ciudad. Este efecto se presenta bajo vientos regionales débiles o calma y la presencia de UHI; y es análogo a los sistemas de brisa marina, donde la ciudad se comporta como una isla (Cermak et al., 2013).

La escala de vecindario se enfoca mucho más en el flujo dentro de UCL, el cual puede cambiar de un vecindario a otro. En esta escala los edificios son tratados de forma estadística, asumiendo cierta homogeneidad entre ellos, esto es considerado en una dimensión del orden de un kilómetro.

La escala a nivel de calle (cañón) direcciona el flujo y la dispersión dentro y cerca de una o dos calles individuales, edificios o intersecciones. Esto puede ser de gran interés cuando se considera la turbulencia afectando la comodidad de los peatones y también la exposición directa de estos y las residencias cercanas a las emisiones vehiculares.

Las circulaciones de mesoescala (véase Figura. 1.2) en las áreas urbanas situadas en un valle pueden estar dominadas por dos tipos de flujo:

- por las perturbaciones del flujo sinóptico que es regido por los gradientes de presión y por las circulaciones térmicas (Fernando, 2010), estas últimas producen convergencia en superficie durante las horas nocturnas y ,
- divergencia durante el día debido a la circulación de valle-montaña (Oliveira et al., 2003).

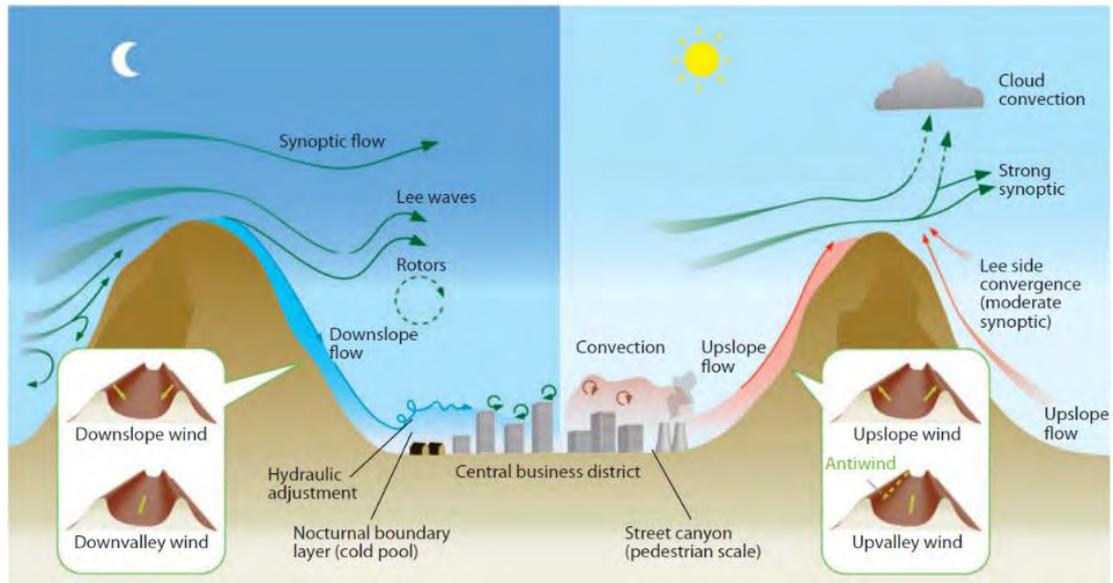


Figura 1.2. Flujos básicos de una atmósfera urbana en un terreno complejo. El panel de la izquierda muestra las condiciones nocturnas y el de la derecha las diurnas. Fuente: Fernando (2010).

1.1.3. Capa límite planetaria (PBL).

La PBL está ubicada en la parte más baja de la tropósfera que está influenciada por la superficie de la Tierra y responde al forzamiento de ésta en una escala temporal de 1 hora o menos. Sobre la superficie terrestre la estructura de la PBL es fuertemente influenciada por el albedo, la rugosidad, la emisividad de la superficie, la disponibilidad de agua (evaporación); y la capacidad calorífica a través de sus roles en la determinación de la temperatura superficial, y por tanto, en los flujos turbulentos y radiativos (Fernando et al., 2001). La altura de la capa límite no es constante con el tiempo, depende de la mezcla generada en superficie (Oke, 2002). Esta dimensión es también conocida como altura de mezclado, típicamente sobre tierra sólida alcanza su valor máximo (0.2 – 5 km) al final de la tarde y su valor mínimo (20 – 500m) antes de medianoche (Cermak et al., 2013, p. 41). Las variaciones diurnas de las variables meteorológicas en la PBL ocurren debido al ciclo diurno de calentamiento y enfriamiento de la superficie, mientras que otras variaciones temporales suceden como resultado de la evolución de los sistemas de mesoescala y sinópticos.

La estructura de la PBL depende mucho de las características del terreno (relieve, uniformidad, características del dosel, etc.); este estudio se enfoca en las peculiaridades de esta capa sobre un terreno complejo y urbano, donde la heterogeneidad del flujo es causada por la interacción de este con los elementos de rugosidad. A continuación usamos la descripción de Roth (2000) para presentar los procesos que modifican la transferencia turbulenta:

- Una intensa capa de cizalladura se forma cerca del tope del dosel, la energía cinética media del flujo es convertida en energía cinética turbulenta (TKE).

- Difusión de estela: mezcla generada por la estela turbulenta detrás de los objetos rugosos, eficiente mezcla y difusión de momento, calor, humedad o cualquier otra magnitud escalar. El tamaño de los remolinos está relacionado con las dimensiones de la estela producida por los elementos de rugosidad.
- Arrastre debido a cuerpos tipo cónico, o sea, las diferencias de presión a través de los elementos de rugosidad individuales aumentan el transporte de momento en la superficie y no tiene análogo al transporte de calor o de masa.
- Fuentes y sumideros de momento y propiedades escalares como el calor y el vapor de agua están organizados en arreglos tridimensionales. La diferencia de calentamiento-enfriamiento de las superficies iluminadas-sombreadas, así como las superficies secas y húmedas conducen al desarrollo de una localizada y discreta pluma de calor y masa la cual, junto con los vórtices y las estelas del flujo en los cañones, resultan en un sistema complejo de transporte de energía y masa para añadir heterogeneidades espaciales y temporales.
- El aumento del mezclado mecánico en las superficies urbanas resulta en una mejor interacción de las capas de mezcla y la de superficie y en combinación con el efecto de isla de calor urbano puede conducir a mayores alturas de la PBL.
- La estabilidad atmosférica cerca de la superficie es generalmente reducida por la propia presencia del UHI y el incremento de la cizalladura.

Como se puede observar, el flujo dentro de la PBL en una ciudad encuentra un conjunto de nuevas condiciones de fronteras, las cuales generan nuevas capas límites internas como se muestra en la figura 1.3. La capa límite urbana (UBL) es la porción de la PBL cuyas características son afectadas por la superficie urbana, es un fenómeno de escala local a mesoescala, está subdividida en capas dinámicamente dispares, las cuales son:

- La capa de dosel urbano (UCL, por sus siglas en inglés), esta capa es producida por los efectos de micro-escala y está dominada por la producción y transporte de la TKE, además es donde el flujo en un punto específico es afectado por los objetos locales.
- La subcapa de rugosidad (RSL, por sus siglas en inglés) abarca desde el suelo hasta z_* , donde la producción y disipación de TKE se equilibran entre sí, típicamente de un espesor $(2-5) \cdot h_B$, donde h_B es la altura promedio de los edificios, como resultado de la advección a escala local, el campo de turbulencia frecuentemente no es horizontalmente uniforme.

- La capa de flujo constante (CFL, por sus siglas en inglés), también conocida como subcapa inercial (ISL, por sus siglas en inglés), se extiende desde z_* hasta $0.1z_*$, la cual es una región horizontalmente homogénea localizada más allá de la altura donde la estela provocada por los edificios se mezcla completamente. En esta capa los perfiles medios siguen leyes semi-logarítmicas, y es el área donde la PBL ha asimilado los efectos integrados de la superficie urbana y es tratada según el comportamiento estándar de la PBL.
- La capa de mezcla (ML, por sus siglas en inglés), está situada encima de la CFL y es dominada por el arrastre debido al acoplamiento mejorado entre el terreno y la superficie urbana. Además está sujeta a la producción de TKE y sus propiedades turbulentas son independientes de las superficies de rugosidad (Roth, 2000; V. Masson, Grimmond, & Oke, 2002; Fernando, 2010).

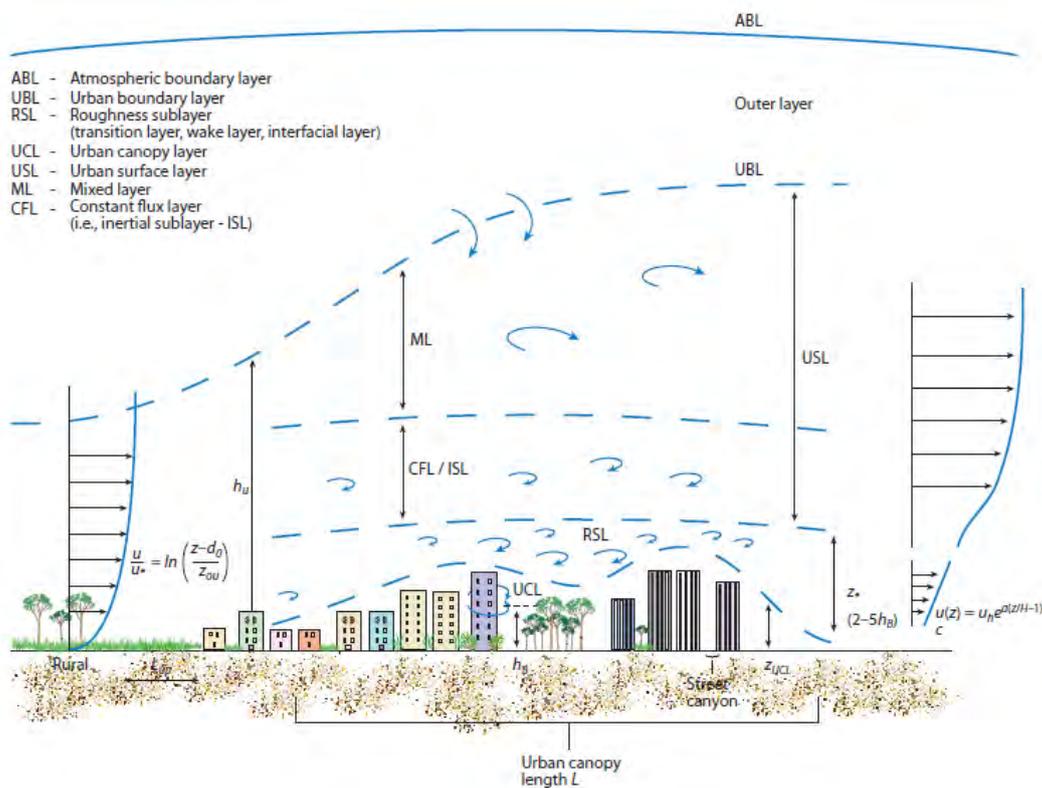


Figura 1.3. Zonas de la capa de límite urbano. La forma logarítmica se refiere a la velocidad del viento donde d_0 y z_{0u} son la altura de desplazamiento y de rugosidad respectivamente y la forma exponencial se refiere a la velocidad promedio en el dosel. Donde a es el coeficiente de atenuación y u_h es la velocidad promedio del dosel de altura h_b .

Fuente: Fernando (2010).

Los parámetros claves que definen las características aerodinámicas de las superficies subyacentes son la longitud de rugosidad para el momentum y el calor (z_0 y z_h , respectivamente). Se ha determinado que lo que determina z_0 son los parámetros morfo-

métricos. Por otro lado, los datos de z_h son relativamente raros, generalmente, este es menor que z_0 en varios ordenes de magnitud (Kanda, 2007). El logaritmo de la razón entre ambos parámetros está dado por $kB^{-1} = \ln z_0/z_h$, que es comúnmente usada en los estudios de modelación atmosférica, el término kB^{-1} presenta varias denominaciones, pero usualmente se representa como el número de Reynolds (Brutsaert, 2013).

El siguiente balance de energía superficial (SEB, por sus siglas en inglés) para la capa superficial urbana (USL, por sus siglas en inglés), la cual, como se observa en la figura 1.3 es la capa que abarca la ML y la CFL, ha sido descrito por diferentes autores, entre ellos (Masson, Grimmond, & Oke, 2002; Kanda, 2007),

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (1.1)$$

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_G \quad (1.2)$$

donde $K \downarrow$ y $K \uparrow$ son la radiación de onda corta entrante y saliente respectivamente, $L \downarrow$ y $L \uparrow$ son la radiación de onda larga entrante y saliente respectivamente, Q^* es la radiación neta, Q_F el flujo de calor antropogénico, Q_H el flujo de calor sensible turbulento, Q_E flujo de calor latente turbulento y Q_G el flujo de calor almacenado.

En ausencia de irrigación las superficies urbanas tienden a ser más secas que sus alrededores debido a los pavimentos y edificios. Esto podría conducir a un menor flujo de calor latente (Q_E) y a un mayor flujo de calor sensible (Q_H). Todos los efectos físicos descritos inducen condiciones neutrales (adiabáticas) sobre un área urbana.

El flujo en un terreno complejo, como en el presente estudio, difiere mucho de uno sobre un terreno plano, es por eso que nuevos fenómenos físicos emergen debido a la influencia topográfica. En la noche, los flujos catabáticos son confinados en la cuenca por lo que es posible un estrecho rango de densidad y una escala pequeña de mezclado vertical entre las diferentes capas de densidad, provocando que el gradiente vertical de densidad en esta región sea significativamente menor que la de un terreno plano. A veces encima de esta piscina fría puede existir una inversión, la cual actúa como una barrera al mezclado en la vertical. Si este aire frío fluye fuera de la cuenca hacia zonas circundantes, puede crear en esta zona central una estratificación moderada o débil cubierta por la inversión, por encima de la cual la estratificación es neutra. Durante el día, con la intensificación del calor, los flujos anabáticos adquieren fortaleza, removiendo sustancialmente el aire turbulento desde la CBL y creando una subsidencia en el centro de la cuenca (Fernando et al., 2001).

1.2. Generalidades de la modelación urbana en los modelos de mesoescala.

El entendimiento de los procesos físicos urbanos es la llave para ampliar los conocimientos en la meteorología urbana y desarrollar mejores modelos urbanos para diferentes aplicaciones.

La resolución espacial de los modelos atmosféricos de mesoescala es el resultado del balance entre tres factores (Martilli & Santiago, 2009):

- El tamaño de las circulaciones de mesoescala, que deben estar contenidas dentro del dominio del modelo.
- La escala de las superficies heterogéneas, la cual debe estar resuelta en el mejor de los casos por la resolución del modelo.
- El tiempo computacional requerido, este debe mantenerse razonable (pocas horas).

Actualmente, mayor capacidad de cómputo ha permitido que los dominios de los modelos de más alta resolución sean rutinariamente usados para la Predicción Numérica del Tiempo (NWP, por sus siglas en inglés).

Estos modelos atmosféricos de mesoescala resuelven las ecuaciones de conservación siguientes (Martilli et al., 2002). En la siguiente descripción las letras en mayúscula se refieren a las variables promedio de Reynolds y las minúsculas son sus respectivos flujos turbulentos:

- **Masa**

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1.3)$$

donde U_i son las tres componentes del viento y ρ la densidad del aire.

- **Momento**

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \overline{u_i w}}{\partial z} - \rho \frac{\theta'}{\theta_0} g \delta_{i3} + Du_i - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j (U_k - U_k^G), \quad (1.4)$$

donde el primer término del lado derecho representa el transporte medio y los siguientes se refieren al transporte turbulento; P es la presión, θ_0 es la temperatura potencial del estado hidrostático de referencia y $\theta' = \theta - \theta_0$ es la fluctuación relativa en este estado, g es la aceleración de la gravedad, Ω_j es la velocidad angular de rotación de la tierra y U_k^G es el viento geostrófico; el término Du_i representa las fuerzas (ejemplo, fuerza de fricción, la fuerza de arrastre, etc.) inducidas por la interacción entre las superficies sólidas (suelo, edificios, etc.) y el flujo del aire.

- **Energía**

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = -\frac{\partial \rho \theta U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \overline{w \theta}}{\partial z} + D_\theta - \frac{1}{C_p} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/C_p} \frac{\partial R_{lwave}}{\partial z}, \quad (1.5)$$

donde θ es la temperatura potencial, C_p es el calor específico del aire a presión constante, R es la constante ideal de los gases, P_0 es la presión de referencia (1000 hPa), R_{lwave} es el flujo de radiación de onda larga; D_θ es el término del impacto de los flujos de calor sensible desde las superficies sólidas sobre el acumulado de temperatura potencial.

- **Humedad del aire**

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} = -\frac{\partial \rho H U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \overline{w h}}{\partial z} + D_h, \quad (1.4)$$

donde H es la humedad absoluta media del aire y h es la fluctuación turbulenta, esta ecuación no considera la condensación y la formación de nubes; D_h representa el impacto de los flujos de calor latente desde el suelo en el acumulado de humedad.

- **Energía cinética turbulenta**

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} = -\frac{\partial \rho U_i E}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \overline{w E}}{\partial z} + \underbrace{\rho K_z \left[\left(\frac{\partial U_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} \right)^2 \right]}_{\text{producción de flotabilidad y cizalladura}} - \underbrace{\frac{g}{\theta_0} \rho K_z \frac{\partial \theta}{\partial z}}_{\text{disipativo}} - \underbrace{\rho C_\epsilon \frac{E^2}{l_\epsilon}}_{\text{disipativo}} + D_E \quad (1.6)$$

donde la primera llave es la suma de los términos de producción de flotabilidad y cizalladura de energía cinética turbulenta, dentro de la cual K_z es el coeficiente de difusión y su cálculo está dado por diferentes formulaciones [ejemplo,(Bougeault & Lacarrere, 1989)], la segunda llave es el término disipativo, D_E es nuevamente la fuente de TKE generada a partir de la interacción entre los edificios y el flujo del aire.

Los términos D presentes en las ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6 representan la interacción del flujo con las superficies urbanas, los respectivos subíndices de cada uno de ellos simbolizan la velocidad del viento, la temperatura y la TKE respectivamente. Este término es igual a los flujos debido a la presencia de los edificios dividido entre el volumen del aire presente en cada celda de rejilla. Los flujos antes mencionados se calculan teniendo en cuenta diferentes consideraciones teóricas que se traducen en distintas parametrizaciones urbanas, el cálculo de estos flujos será descrito en el capítulo dos.

Existen determinados asuntos por resolver, por ejemplo: la resolución espacial de los modelos de mesoescala es de 2 o 3 órdenes de magnitud mayor que la resolución espacial de la heterogeneidad de las áreas urbanas (1-10m) (Martilli & Santiago, 2009). A pesar de estas y otras dificultades se han dado importantes avances en el pronóstico meteorológico urbano en la última década. Ejemplo de ello es el desarrollo de los modelos de SEB urbano y, en particular, los de dosel urbano, los cuales pueden ser acoplados a los modelos de mesoescala de NWP como parametrizaciones internas sobre las variables espacialmente promediadas calculadas por estos modelos (Council et al., 2012, p. 129). Diversas aplicaciones, como la representación de las áreas urbanas en los modelos de calidad del aire, requiere que estos efectos urbanos sean parametrizados en una forma viable, operacional y simple (Coceal & Belcher, 2005).

Según V. Masson (2006) existen cinco clases de modelos de SEB urbanos:

- Modelos empíricos;
- Modelos de vegetación:
 - Considerando el término de arrastre, adaptado y modificado a la cobertura urbana.
 - Sin tener en cuenta el término de arrastre.
- Modelos de dosel urbano:
 - Modelos de una sola capa.
 - Modelos de multicapas.

Para poder entender la funcionalidad de estos modelos, es necesario comprender como estos toman en cuenta los efectos dinámicos y térmicos entre la superficie y la atmósfera. El análisis de esos enfoques en los procesos de mesoescala fue desarrollado entre otros autores por Martilli et al. (2002b), V. Masson (2006) y Martilli (2007), a continuación se muestra una síntesis del trabajo realizado en estos estudios.

Efectos Dinámicos o Mecánicos (campo de viento y turbulencia):

- Incremento de la rugosidad: El primer método propuesto es estimar el flujo de momento de la superficie usando la teoría de similitud clásica Monin-Obukhov (MOST, por sus siglas en inglés). El procedimiento clásico para tomar en cuenta la presencia de una área urbana en los modelos de mesoescala usa esta teoría como para áreas rurales, pero con una longitud de rugosidad mayor (propuesto por el estudio de (Grimmond & Oke, 1999)) y diferentes características térmicas del suelo (Hamdi & Schayes, 2007). Sin embargo, este enfoque no es capaz de reproducir la estructura vertical del campo de

turbulencia en la RSL. Tales características hacen que esta aproximación en particular sea solo apropiada para modelos de pronóstico del tiempo, pues el objetivo de estos no es reproducir los procesos en la RSL urbana, y además tienen estrictas restricciones en el tiempo computacional (Martilli, 2007).

- **Fuerza de arrastre:** Consiste en el uso de una muy alta resolución vertical con varias capas dentro del dosel urbano donde, el término de sumidero es introducido en la ecuación de momento para representar el arrastre inducido por los edificios. Esta fuerza de arrastre es directamente añadida a la ecuación de movimiento en el modelo atmosférico, encima de la altura de los edificios más altos. La principal ventaja de este método es que permite la resolución de algunas de las características de la UCL y de la RSL. La principal desventaja es la alta resolución vertical cerca del suelo la cual incrementa el tiempo computacional.

Efectos Térmicos (incremento de la energía superficial)

- **Efecto radiativo:** Masson (2006) propuso un enfoque para representar la captura de radiación de onda corta en los modelos urbanos especificando un albedo superficial relativamente bajo, del orden de 0.15. Otro esquema que ha sido desarrollado es la resolución del incremento de energía para un cañón idealizado en 2D, en este cálculo, los factores de forma se usan asumiendo que la radiación es reflejada isotrópicamente en todas las superficies (pared y calle); la parametrización de la radiación solar con la profundidad del dosel puede ser incorporada en los modelos del método de arrastre, y es una simple aproximación no computacionalmente cara, por lo que es muy útil en los modelos de pronóstico del tiempo.
- **Flujos de calor antropogénico:** El rol de estos flujos es relativamente simple en el modelo, ellos son usualmente prescritos como una fuente de energía adicional. Estos flujos son típicamente del orden de 10 Wm^2 (pueden ser mucho mayores en ciudades más densas). Estos valores son añadidos como un flujo de calor turbulento extra en la base de la atmósfera.

1.2.1. Modelos de Dosel Urbano (UCMs).

Estos modelos tienen como objetivo resolver el SEB para un dosel urbano realista en 3D. En su interpretación comparten en común las siguientes tres parametrizaciones (V. Masson, 2006):

- Los edificios tienen forma tridimensional (3D).
- El esquema posee diferentes valores de energía para techo(s), camino(s) y pared(es).

- Las interacciones radiativas entre el o los(as) camino(s), techo(s) y pared(es).

Dado que están compuestos de superficies horizontales y verticales, los UCMs son más capaces de capturar el comportamiento energético especial del dosel urbano. El uso de diferentes tipos de superficies proporciona una ventaja ya que sus propiedades (ejemplo. Capacidad calorífica de la pared, temperatura de la pared) se interpretan más fácilmente que las cantidades promedio correspondientes encontradas en los esquemas de vegetación modificada (ejemplo. capacidad calorífica o temperatura superficial de todo el sistema).

Estos modelos pueden ser separados en dos categorías principales: aquellos donde al aire del dosel es parametrizado, y aquellos usando el método de arrastre, que incluyen los efectos dinámicos de los edificios [como en (Martilli et al., 2002b)]. La primera se refiere a modelos de una capa, porque existe una interacción directa con una sola capa atmosférica, encima del nivel del techo más elevado. La segunda categoría es llamada modelos de multicapas, debido a que varias capas de aire son influenciadas explícitamente por los edificios (hasta la superficie de la carretera, porque las capas de aire se extienden hasta abajo del dosel).

Modelos de una capa.

Representan la ciudad como una capa de edificios con el intercambio de calor de toda la superficie siendo la suma de los intercambios de las superficies individuales. Esto permite representaciones más realistas del atrapado de radiación e intercambio turbulento (Grimmond et al., 2010). En estos esquemas, los intercambios entre la superficie y la atmosfera solamente ocurren en el tope de los cañones y techos (véase Figura. 1.4).

En general, la ley logarítmica del viento se supone que se aplica justo debajo de la parte superior del cañón, y la ley exponencial se usa a continuación. La temperatura y la humedad del aire son asumidas uniformes en el cañón. La ventaja de este esquema es que se necesita resolver pocos SEBs. Las interacciones de radiación son simplificadas, y por tanto el tiempo computacional se mantiene bajo, a pesar de la simplificada geometría de 3D. Pero la principal desventaja es que, debido a su simplicidad y transferibilidad, las características del aire en el espacio de los cañones deben ser especificadas.

Modelos multicapas: el enfoque de arrastre.

Cuando se aplica el método de arrastre, los intercambios con la atmósfera ocurren en el nivel del suelo y en varios niveles atmosféricos. En contacto con los edificios (véase Figura. 1.5), las propiedades atmosféricas como la temperatura y el viento no son asumidas por defecto, ellas dependen más estrechamente de la interacción entre el dosel y el aire, estos modelos son capaces de representar los perfiles de la estadística turbulenta del aire en los cañones y en la RSL (V. Masson, 2006; C. S. B. Grimmond et al., 2010).

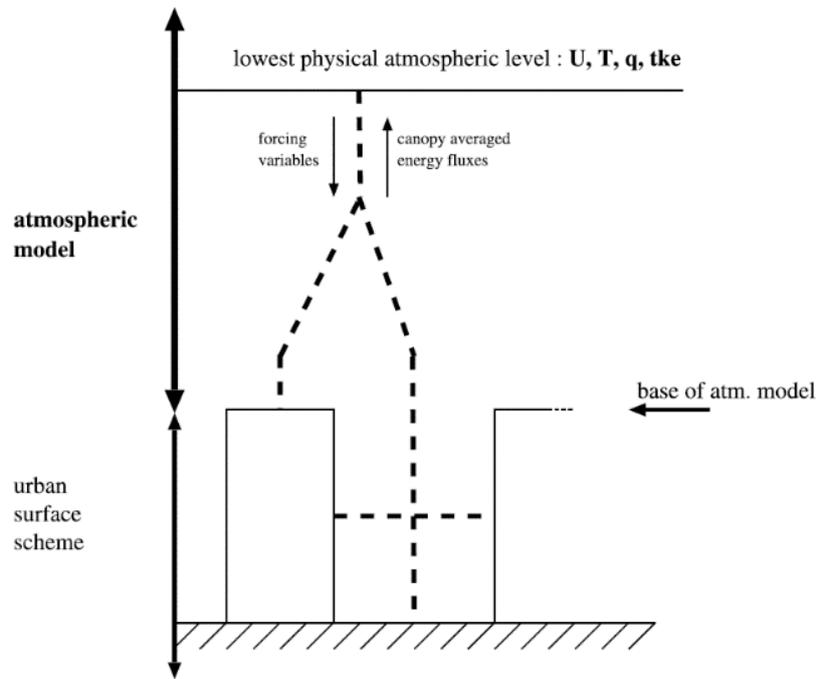


Figura 1.4. Vista del esquema de superficie urbano de una sola capa, todas las superficies interactúan con el mismo nivel atmosférico (líneas punteadas). Fuente: V. Masson (2006).

La mayor complejidad es que estos modelos dependen del conjunto de ecuaciones y su discretización, pues para realizar el refinamiento mencionado es necesario añadirle a cada una de las ecuaciones de variación del tiempo de las variables atmosféricas otro término: (1) el arrastre; (2) el calentamiento; (3) producción de TKE y (4) producción de la disipación de TKE (V. Masson, 2006).

La diferencia entre ambos modelos aparte de la representación espacial de la morfología urbana radica en que, los de una capa simulan una temperatura y un set de intercambios de energía por cada aspecto (carretera, pared y techo), mientras que, los multicapas simulan múltiples temperaturas e intercambios de energía por cada aspecto (Grimmond et al., 2010). Además, permite simular diferentes capas en carreteras, techos o paredes, incluyendo capas aislantes³.

³ Los caminos interactúan con el primer nivel atmosférico, cada pared del edificio interactúa con los niveles que se crucen con él, cada techo interactúa con el primer nivel atmosférico sobre él.

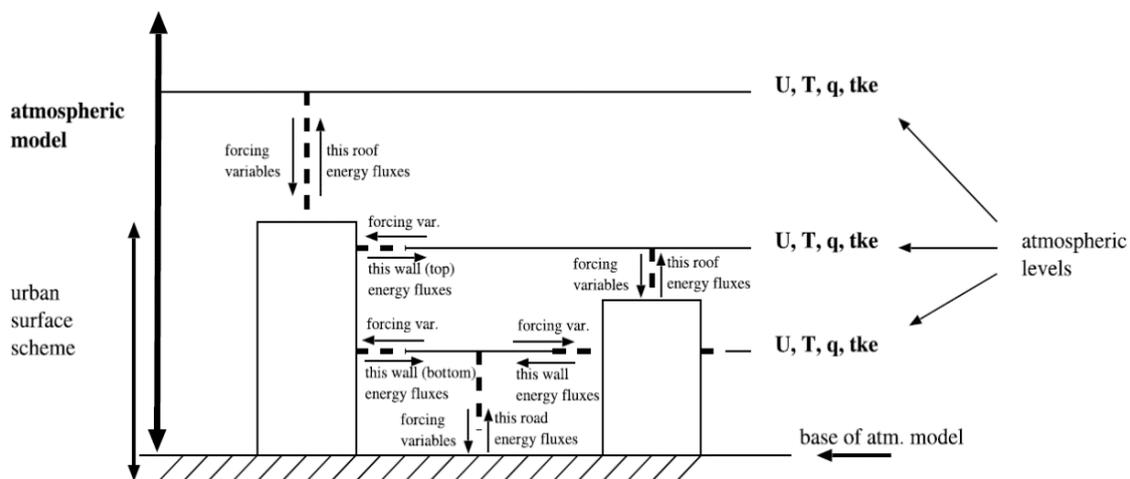


Figura 1.5. Vista del esquema de superficie urbana de multicapas: las interacciones entre el esquema y la atmósfera están representadas por líneas gruesas discontinuas. Cada variable forzante se selecciona en el correspondiente nivel atmosférico. Fuente: V. Masson (2006).

1.3. Antecedentes. Estado del arte.

En la última década el número de modelos capaces de representar el intercambio entre la superficie y la atmósfera en y sobre áreas urbanas se incrementó significativamente. Ellos se incluyen dentro de los modelos climáticos y del tiempo, que han sido utilizados para simular la atmósfera urbana para una gran variedad de propósitos.

Los modelos de mesoescala, con parametrizaciones detalladas de intercambio de flujos en las superficies urbanas con la atmósfera, son vitales para representar las influencias urbanas en la estructura de la PBL. Martilli (2002) realiza un estudio numérico de estas influencias sobre las características de la UBL, en particular simulaciones idealizadas en 2D para analizar la sensibilidad de la UBL con la velocidad del viento, la morfología urbana y la humedad del suelo rural; así como, un análisis de la importancia de los factores mecánicos y térmicos sobre la estructura de la PBL. Este estudio fue tomado como referencia teórica y práctica, pues los resultados encontrados representan la sensibilidad de la UBL a parámetros morfológicos como altura de edificios y la razón entre estos y las dimensiones de las calles y cañones.

Debido a la heterogeneidad de la morfología urbana de un vecindario a otro, diferentes UCMs fueron desarrollados. Los primeros modelos de una sola capa fueron presentados por (Valéry Masson, 2000; Kusaka, Kondo, Kikegawa, & Kimura, 2001; Kanda et al., 2005). En cuanto a los de multicapa, diversos autores como: Martilli et al. (2002) y Kondo et al. (2005) han desarrollado estas teorías, permitiendo con este desarrollo una mayor interacción entre la PBL y los edificios. En particular Martilli et al. (2002b) fue capaz de reproducir las principales características urbanas observadas de una mejor forma que en el método tradicional, basado en

la sola modificación de la longitud de desplazamiento de rugosidad, conservando así la teoría de MOST (esta teoría será explicada con más detalle en el capítulo 2). Con el objetivo de estimar los intercambios de energía entre el interior de los edificios y la atmosfera exterior que afecta directamente a la determinación de la energía urbana, la modelación urbana ha alcanzado un nivel superior con la implementación del acoplamiento entre los simples modelos de energía de los edificios y las parametrizaciones de dosel urbano de multicapas [ejemplo, BEP-BEM (Salamanca & Martilli, 2010)].

Un gran número de modelos de balance de energía superficial urbana existen con diferentes suposiciones sobre los procesos de intercambio en la superficie. Un esfuerzo significativo para comparar el desempeño de estos fue realizado por (Grimmond et al., 2010), donde los objetivos primordiales fueron identificar aquellos modelos que minimizaran los errores en los flujos simulados del SEB urbano y determinar el grado de complejidad requerida para simulaciones precisas. Se evidenció que ningún modelo se desempeñó mejor o peor para todos los tipos de flujos, pero algunos modelos fueron mejores para flujos individuales.

Varios esquemas urbanos de la superficie terrestre han sido desarrollados para modelar diferentes características de la superficie urbana y sus procesos asociados de intercambio de energía. Estos modelos, conocidos como Modelos Superficial del Terreno [*Land Surface Model* (LSM), por sus siglas en inglés], han sido desarrollados para diversos propósitos y diferentes consideraciones, como se muestran en los estudios realizados por Grimmond et al. (2011) y Best & Grimmond (2015). En estos trabajos se presentan implicaciones en futuros modelos, observaciones y base de datos de parámetros que se extienden más allá de la comunidad de modelos urbanos.

Chen et al. (2011) documenta el desarrollo de un sistema de modelado urbano integrado para el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF, por sus siglas en inglés), comúnmente llamado WRF/urbano. Como resultado de lo anterior, el sistema integrado WRF/urbano dispone de un conjunto de componentes que constituyen una guía y la base del entendimiento de la modelación urbana en el WRF, estos son: (1) tres diferentes parametrizaciones de dosel urbano; (2) un acoplamiento a los sistemas de modelación dinámicos de fluidos computacionales de escala fina para aplicaciones de transporte y dispersión; (3) el procedimiento para incorporar la resolución urbana de cobertura de suelo, morfología de los edificios, y datos de calor antropogénico usando la Herramienta Portal de Acceso y la Base de Datos Nacional (NUDAPT, por sus siglas en inglés); y (4) un sistema urbanizado de alta resolución de asimilación de datos terrestre. Este artículo provee a la comunidad las directrices de inicialización del modelo, así como los parámetros requeridos para ser corrido, considerando la sensibilidad del sistema a

estos, así como también la evaluación de los principales efectos provocados en el flujo por algunas de las regiones metropolitanas.

Como se mencionó anteriormente, el WRF/urban ha sido aplicado en varias de las mayores regiones metropolitanas del mundo (ej: Beijing, Guangzhou/Hong Kong, Houston, New York City, Salt Lake City, Taipei, Tokyo, Madrid, etc.) y su desempeño ha sido evaluado contra las observaciones de superficie, sondeos atmosféricos, datos de perfiles de viento y de precipitación (F. Chen et al., 2004; Holt & Pullen, 2007; Jiang et al., 2008; Lin et al., 2008; Miao & Chen, 2008; Kusaka et al., 2009; LeMone et al., 2009; Miao et al., 2009; Miao, Chen, Li, & Fan, 2009; Miao, Li, & Wang, 2009; Tewari et al., 2010; Brousse, Martilli, Foley, Mills, & Bechtel, 2016).

Los resultados de algunas de estas aplicaciones muestran que el sistema de modelación acoplado WRF/urban es capaz de reproducir bien las siguientes características (Miao & Chen, 2008 y Miao et al., 2009): (1) variación diurna de la intensidad de la UHI, (2) la distribución espacial de la UHI en Beijing, (3) la variación diurna de la velocidad y dirección del viento y su interacción entre las circulaciones de valle-montaña y de la UHI, (4) a pequeña escala los rollos y celdas convectivas de la capa límite horizontal y (5) el chorro de bajos niveles de la capa límite en horas de la noche. Otra de las más recientes aplicaciones, es el uso del sistema WRF/urban usado en un reciente proyecto llamado Herramienta Portal de Acceso y Base de Datos Mundial (WUDAPT, por sus siglas en inglés), el estudio realizado sobre la ciudad de Madrid por Brousse et al. (2016) exploró el potencial de esta herramienta en el WRF/urban, en particular la incorporación de los esquemas de multicapas implementados en el modelo WRF, encontrando que el esquema en que se basa el WUDAPT mejora considerablemente el desempeño del modelo.

En México no abundan los estudios relacionados con el uso del modelo WRF/urban que consideran la urbanización. De hecho, hasta la fecha, solo se tiene referencia de un solo trabajo realizado por la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) en colaboración con el Centro de Supercomputadora de Barcelona (Guevara et al., 2017), donde fue usado el sistema de modelación WRF/urban de una sola capa (WRF/urban/SLUCM) considerando tres categorías de cobertura urbana (alto residencial, bajo residencial y comercial e industrial) este acoplamiento fue usado para fines de calidad del aire. Los resultados obtenidos mostraron que el modelo es capaz de captar el ciclo diurno de las variables analizadas (temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento), las simulaciones realizadas subestimaron las temperaturas observadas durante el día en todo el periodo simulado, además de que especialmente durante la tarde se encontró una sobrestimación de la velocidad del viento a 10 metros.

Otro estudio fue realizado por Morales et al. (2016), usando una versión urbanizada del Modelo Meteorológico de Mesoescala (uMM5). El objetivo fue estudiar el efecto que tenía el uso

potencial y extensivo de techos verdes en algunos vecindarios de la Ciudad de México (CDMX) con la profundidad de la capa de mezcla en las mañanas. Los parámetros termodinámicos de entrada fueron obtenidos a partir de mediciones existentes sobre techos verdes y convencionales. Los datos morfológicos fueron obtenidos con un procedimiento descrito a partir de 60 orto-fotos (2-m de resolución) de la ciudad. Estos datos y los de cobertura de suelo fueron incorporados al uMM5 a partir de la representación brindada por el Instituto de Geografía de la UNAM mediante la implementación de un sistema GIS. Este trabajo arrojó, entre otros resultados, que la incorporación de techos verdes puede disminuir la altura de la capa de mezcla en las mañanas, afectando por tanto los procesos de dilución y dispersión de contaminantes en especial bajo la existencia de tráfico vehicular.

A pesar de que en CDMX son pocos los estudios de modelación numérica urbana, sobre esta región se han realizado diferentes estudios para encontrar las principales características urbanas de la ciudad y su influencia en determinadas variables o propiedades, como lo son: el precursor estudio de Jauregui (1973), donde a partir de mediciones y análisis de patrones sinópticos pudo encontrar las primeras influencias de la urbanización sobre la atmósfera de la CDMX. Publicaciones más específicas como el efecto de UHI y el análisis urbano del SEB fueron realizados más tarde por diferentes autores (Oke et al., 1992; Jauregui, 1997; Oke et al., 1999; Cui & De Foy, 2012) los cuales sirvieron de base para la comprensión del clima urbano en la ciudad.

Por otro lado, sobre esta región se han realizado diferentes campañas dirigidas a analizar la calidad del aire y también la influencia meteorológica en los patrones de flujo que determinan su comportamiento, como es el caso de la campaña MILAGRO (Foy et al., 2009), esta influencia en particular ha sido estudiada por Jazcilevich, García, & Ruíz-Suárez (2003); García-Reynoso (2009), donde se ha demostrado que el desarrollo de complejos patrones verticales de flujo sobre esta región debido a la compleja orografía, presenta un marcado impacto sobre el transporte y dispersión de contaminantes.

2. Área de Estudio y Materiales utilizados.

2.1. Características geográficas, climáticas y urbanas de CDMX.

La Ciudad de México (CDMX) está ubicada en los 99° 08'W y 19° 26'N, su elevación es aproximadamente de 2250 m sobre el nivel de mar; y está rodeada por altas montañas particularmente en el sureste, sur y oeste. Es una ciudad con características tropicales, presenta una estación lluviosa en el verano, aunque también presenta características de clima templado, principalmente en los meses de invierno.

La CDMX⁴ ha sido sin duda un ejemplo representativo de crecimiento urbano en términos de expansión periférica en el último cuarto de siglo, como se muestra en la figura 2.1, en esta zona alrededor de 97% de la población vive en localidades mayores de 100 mil habitantes⁵. Según el último censo realizado en el 2010, la población total de la CDMX era de 8 851 080 de habitantes, aunque esta no es su población real pues al sumarse la población sub-urbana y la ambulante diaria que realiza todas sus actividades laborales en esta zona, proveniente principalmente del Estado de México, esta cifra se eleva hasta alrededor de los 21 millones de habitantes para conformar la población total del Área Metropolitana de la Ciudad de México.

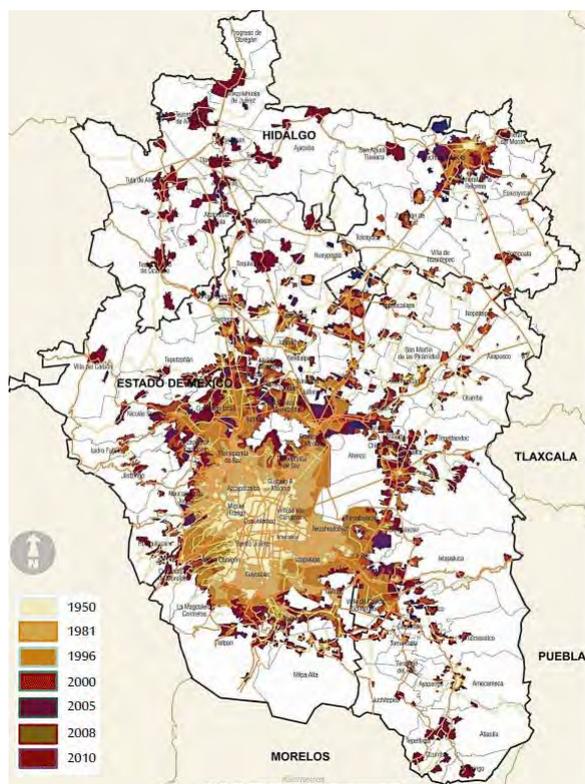


Figura 2.1. Crecimiento urbano de la CDMX desde 1950 hasta 2010. Fuente: PUEC-UNAM con base en el marco geo-estadístico municipal 2005, versión 1; 2009, versión 4.1; 2010, versión 5. México: IG, UNAM & INEGI.

⁴ Con esta denominación, nos referimos a la zona llamada antiguamente como Distrito Federal, que incluye a las 16 delegaciones existentes con sus respectivas colonias.

⁵ Fuente: INEGI, 2010. Censo de Población y Vivienda 2010, cuestionario básico.

Las montañas que rodean el Valle de México y la intensa urbanización de la ciudad (la cuarta más poblada del mundo) tiene un gran efecto en el clima local, especialmente la precipitación, la temperatura y los patrones de circulación del viento (Jáuregui & Luyando, 1992).

El desarrollo del evento UHI en la Ciudad de México (CDMX) fue bien estudiado por Jáuregui en 1997, quien encontró diferencias entre las temperaturas horarias de dos estaciones, una de ellas situada en una zona urbana y la otra en una rural. En el estudio se realizaron mediciones durante todo un año con el fin de encontrar la estacionalidad del evento, concluyendo que:

- La UHI nocturna es más frecuente (especialmente durante el periodo seco) y más intensa que la diurna.
- Los factores que controlan el desarrollo de este efecto durante la época lluviosa son los cambios en la velocidad del viento, la lluvia y la nubosidad, estos están asociados con tiempo inestable y turbulento.
- La UHI vespertina y de la tarde tiene una intensidad media de 4-5°C. Su frecuencia durante el año fue del 12% de los días, y ambas ocurrieron casi igual durante el periodo seco o lluvioso.
- Debido a diferentes factores, como la posición de los sensores, no se observó el máximo de la UHI tan grande como se esperaba que fuese según el tamaño y densidad de población de la ciudad.

El patrón de circulación de los vientos superficiales en la cuenca de México es el resultado de la interacción tanto de los vientos regionales, como de los vientos locales inducidos por la topografía. En la escala urbana estos dos factores se sobreponen generando una circulación centrípeta de intensidad variable generada por la UHI (Jáuregui & Luyando, 1992).

La circulación de los vientos ha sido un elemento muy importante en la calidad del aire de la ciudad. Los vientos catabáticos y la circulación centrípeta, principalmente nocturna, dan por resultado una convergencia del aire que tiende a contener la dispersión lateral de los contaminantes en el periodo nocturno y de la mañana. Durante el periodo vespertino, aun cuando la turbulencia del aire a esas horas diluye hacia arriba las emisiones, la irradiación solar origina la formación de oxidantes que alcanzan su culminación por la tarde, siendo transportados hacia el sector S y SW por la circulación dominante del cuadrante N (Jazcilevich et al., 2003).

Los resultados del estudio realizado por Oke, Zeuner, & Jauregui (1992) para investigar el balance de energía superficial de la CDMX mediante mediciones directas de la radiación neta y de los flujos de calor sensible turbulento, ayudaron a explicar el comportamiento de este efecto

así como las características observadas de la UHI y los regímenes de humedad, además de que constituyó la base que hasta estos días se tiene para conocer la naturaleza de los procesos físicos que conducen el clima de la ciudad.

Estos resultados mostraron que en la CDMX durante la temporada seca el almacenamiento de calor, la convección de calor sensible y la evaporación tienen la misma influencia en el balance de energía diario. El rol del almacenamiento de calor es mayor que en el caso de ciudades templadas, pues la partición de calor sensible entre la transferencia turbulenta y conductiva parecen ser casi igual, debido a la preponderancia de los techos de concreto de la ciudad. El curso diario de la razón Q_H/Q^* , a pesar de ser relativamente pequeño, es similar al observado en ciudades templadas pero la razón de Bowen toma caminos diferentes hacia el incremento.

2.2. WRF/Urbano.

El modelo WRF (Skamarock et al., 2005) es un modelo no-hidrostático, compresible con un sistema de coordenadas de masa. Fue diseñado como un modelo de predicción numérica del tiempo, pero también puede ser aplicado como modelo climático regional. Su predecesor fue el sistema de modelación MM5 (Chen & Dudhia, 2001). El modelo WRF incluye dos sistemas principales, el WRF-NMM orientado al pronóstico operacional y el WRF-ARW dedicado más a la investigación, la manera de ejecutar el modelo WRF es a través de un archivo de configuración que proporciona al usuario las opciones físicas para la simulación personalizada. El sistema de pre-procesamiento del WRF (WPS, por sus siglas en inglés) define la rejilla, genera el mapa con la información terrestre y de elevación, toma los pronósticos y datos de re-análisis de otros modelos, e interpola esta información para la malla a usar por el WRF. Este último módulo contiene diferentes opciones para varios procesos físicos en forma de esquemas de: microfísica de nubes, radiación, capa superficial, PBL, LSM, etc.

Las opciones físicas urbanas son incorporadas dentro de los LSM, y de las parametrizaciones físicas de la PBL y la capa superficial, lo que resulta en el sistema de modelación WRF/urbano (u/WRF).

El centro del sistema de modelación u/WRF (véase Figura 2.2) consiste en:

- Una serie de esquemas de parametrización urbana con varios grados de complejidad.
- La capacidad de incorporar in situ y por percepción remota datos de cobertura del suelo, características de los edificios, calor antropogénico, y fuentes de humedad.
- Sistema de asimilación de datos terrestre de alta resolución y urbanizados.
- La habilidad de ser acoplado con modelos químicos y modelos de Dispersión y Transporte (T&D) urbanos de alta precisión.

La diferencia principal entre el u/WRF y otros acoplamientos de modelos urbanos-atmosféricos es la viabilidad del u/WRF de ofrecer múltiples opciones (como se puede observar en la figura 2.2) para representar los efectos del ambiente urbano sobre el tiempo regional y local y la capacidad de modelación de múltiples escalas, que van desde la escala continental hasta la ciudad y las escalas de edificios. Las opciones señaladas en color rojo en la figura 2.2 son las descritas a continuación y las usadas en el presente trabajo.

El Modelo superficial del Suelo Noah (Noah LSM, por sus siglas en inglés), ha sido bien usado en los modelos de NWP, en los sistemas de asimilación de datos, y en especial en los modelos de mesoescala (WRF y MM5). Una función básica del modelo Noah LSM es proveer condiciones de frontera en forma de flujos de calor latente y sensible, así como temperatura superficial para el acoplamiento con modelos atmosféricos. Las variables pronóstico en el modelo Noah incluye vapor líquido, hielo, y temperatura en las capas del suelo; el agua almacenada en el dosel de vegetación; y la nieve líquida equivalente almacenada sobre el suelo.

El modelo Noah puede ser acoplado a diferentes modelos de dosel urbano (UCMs) implementados en el u/WRF, este acoplamiento es realizado a través del porcentaje del parámetro urbano (o fracción urbana, F_{urb}) que representa la proporción de las superficies impermeables. Para una celda de rejilla dada, el modelo Noah calcula los flujos y la temperatura para áreas urbanas vegetadas (árboles, parques, etc.) y el UCM provee los flujos para las superficies antropogénicas. Ejemplo de esto se puede observar en la ecuación 2.1, donde el flujo de calor sensible total en la rejilla es estimado como:

$$Q_H = F_{veg} \times Q_{Hveg} + F_{urb} \times Q_{Hurb} \quad (2.1)$$

Donde Q_H es el flujo de calor sensible total desde la superficie hasta la capa atmosférica más baja del modelo WRF; F_{veg} es la fracción de la cobertura de superficies naturales, como praderas, arbustos, cultivos, y árboles en las ciudades; F_{urb} es la fracción de la cobertura de superficies impermeables, como edificios, calles y vías férreas; Q_{Hveg} es el flujo de calor sensible del Noah para superficies naturales; y Q_{Hurb} el flujo del UCM para superficies artificiales. Los demás flujos integrados en la malla son calculados de la misma forma. La temperatura superficial es calculada como el promedio ponderado (según su cobertura aérea) de los valores de la temperatura de la superficie natural y artificial (Chen et al., 2011).

Chen et al. (2011) ha llevado a cabo la implementación de cuatro diferentes parametrizaciones urbanas en el modelo WRF mediante los UCMs, la primera de estas parametrizaciones fue incluida en el WRF desde el 2003 y es llamada Bulk, este esquema representa los efectos de orden cero de las superficies urbanas mediante valores dados de ciertos parámetros, como

longitud de rugosidad, albedo superficial, capacidad calorífica y conductividad térmica (Liu et al., 2006; Chen et al., 2011; Salamanca et al., 2011; Sharma et al., 2014).

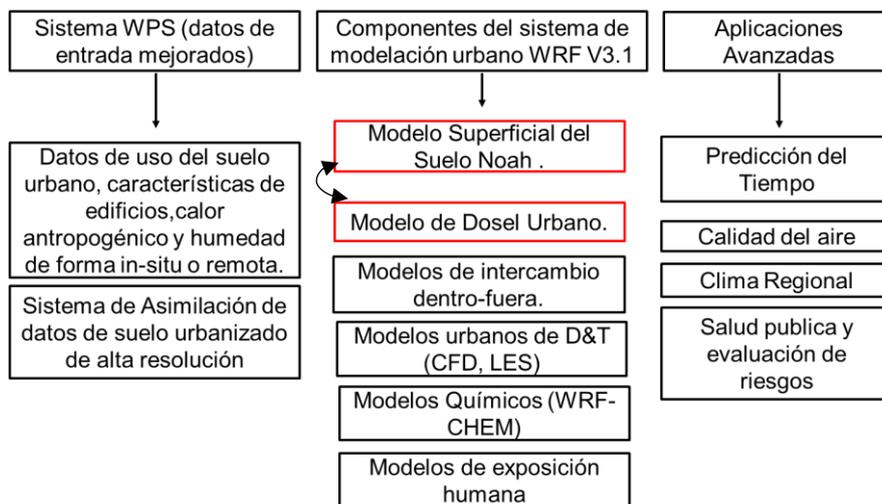


Figura 2.2. Visión general del sistema de modelación integrado WRF/urbano, incluye un conjunto de herramientas de modelación urbana en la física base del WRF V3.1 y sus aplicaciones. Fuente: (Chen et al., 2011).

La segunda parametrización es el UCM de una capa de dosel urbano (*single-layer UCM* (SLUCM, por sus siglas en inglés) desarrollado por (Kusaka et al., 2001), como se muestra en la figura 2.3 (lado izquierdo), este modelo usa cañones urbanos bidimensionales para parametrizar la transferencia de radiación, la turbulencia, el momento y los flujos de calor; toma en cuenta diferentes superficies urbanas e incluye los efectos de reflexión y sombreado sobre estas superficies, así como el perfil exponencial del viento (Tewari et al., 2007). Específicamente el cálculo de los flujos de calor por cada aspecto (techo, pared, cañón de calle, etc.) es calculado mediante la teoría MOST, y el calor sensible total de todas las superficies urbanas es conducida al modelo Noah-WRF como Q_{Hurb} .

El tercer esquema, que se aplica en este estudio, se conoce como Parametrización de Efecto Urbano de multicapas (*Building Effect Parameterization* (BEP), por sus siglas en inglés), tiene en cuenta que la estructura de la capa límite sobre áreas urbanas es un sistema de multi-escalas debido a la advección del flujo y la respuesta de los procesos atmosféricos a la heterogeneidad de las superficies urbanas (Martilli et al., 2002).

La cuarta y última parametrización urbana incluida en el modelo WRF se refiere al modelo de energía de edificios (Building energy model (BEM)) desarrollado por Salamanca & Martilli (2010) el cual ha sido acoplado al BEP para estimar los intercambios de energía entre el interior de los edificios y la atmósfera exterior, lo que significa una importante componente en el cálculo del incremento de energía urbana. Esta última parametrización mejora los resultados del

BEP al tener en cuenta determinados procesos (ejemplo, difusión del calor a través de las paredes, techos y pisos), pero su uso necesita de un volumen mayor de datos y parámetros urbanos que los usados por el BEP.

2.2.1. Consideraciones teóricas del BEP.

Como se puede observar en la figura 2.3 (lado derecho), el BEP presenta una interacción directa con la PBL, reconociendo la naturaleza tridimensional de las superficies y el hecho que esta son fuentes y sumideros de calor, humedad y momento a través de toda la UCL, lo cual impacta en la estructura termodinámica de la RSL y por tanto en la parte más baja de la UBL. El BEP toma en cuenta los efectos de las superficies verticales y horizontales sobre el momento (enfoque de la fuerza de arrastre), la TKE, y la temperatura potencial, siendo esta característica un avance en comparación con los enfoques anteriores presentados.

Los factores mecánicos y térmicos descritos en el capítulo anterior son incorporados en esta parametrización, la misma consiste en el cálculo por separado del impacto de cada superficie urbana en las ecuaciones de momento, calor y energía cinética turbulenta. Estas contribuciones, descritas en Martilli et al. (2002), sobre cada una de estas ecuaciones se realizan mediante la introducción de los términos D mencionados en el capítulo uno, donde:

$$D_{AI} = \frac{Fa_I^H + Fa_I^V}{V_I^A}, \quad (2.2)$$

donde D_{AI} es el término adicional mencionado en las ecuaciones 1.2, 1.3, 1.5 pertenecientes al capítulo uno, donde la variable A puede ser la velocidad del viento, la temperatura o la TKE en dependencia de la ecuación a usar, V_I^A es el volumen del aire en la celda I (volumen de la celda menos el volumen que ocupan los edificios en la celda). Los términos Fa_I^H y Fa_I^V son por tanto los correspondientes flujos promedio de momento, calor y de turbulencia calculados en la rejilla. A continuación es presentado las formulaciones referentes a los flujos de momento turbulento descrito en el estudio de Martilli et al. (2002)

La presencia de las *superficies horizontales* induce una fuerza de fricción que conlleva a una pérdida de momento. Este efecto es distribuido verticalmente en todos los niveles del modelo desde el suelo (nivel más bajo del modelo) hasta el edificio más alto que se encuentran dentro de la UCL, el mismo es proporcional a la fracción de área de estas superficies de cada celda, por tanto, el flujo de momento turbulento debido a los techos y cañones de superficies (canyons floors)) en el nivel iu es:

$$\vec{F} u_{iu}^H = -\rho \frac{k^2}{\left[\ln \frac{\Delta z_{IU}/2}{z_{0iu}} \right]^2} f_m \left(\frac{\Delta z_{IU}/2}{z_{0iu}}, Ri_B \right) |U_{IU}^{hor}| \vec{U}_{IU} S_{iu}^H, \quad (2.3)$$

donde U_{IU}^{hor} es la componente horizontal del viento, Ri_B es el número de Richardson del nivel vertical IU (calculado a través del viento y la temperatura de ese nivel), f_m es la expresión usada en Louis (1979), k es la constante de von Karman (igual a 0.4), Δz_{IU} es la profundidad del nivel numérico vertical IU , z_{0iu} es la longitud de rugosidad de las superficies horizontales en el nivel iu y S_{iu}^H es el área total de las superficies horizontales [ver (Martilli et al., 2002)]. De forma general, el flujo turbulento en el nivel iu se calcula a través de: la velocidad del viento y la temperatura del aire en el nivel IU y la temperatura y longitud de rugosidad de las superficies horizontales en el nivel iu ; cabe mencionar, que la MOST es utilizada para el cálculo de solo las superficies horizontales y que la longitud de rugosidad es la rugosidad específica de cada tipo de superficie y no de todo el conjunto de ciudad.

Como fue mencionado en el capítulo anterior, la existencia de los edificios induce una fuerza de presión y una fuerza de arrastre viscosa sobre el flujo. Estas fuerzas inciden en el intercambio de momento sobre las *superficies verticales* (paredes), el mismo es calculado de la siguiente manera:

$$\mathbf{F}u_{IU}^V = -\rho C_{drag} |U_{IU}^{ort}| \vec{U}_{IU}^{ort} S_{IU}^V, \quad (2.4)$$

donde \vec{U}_{IU}^{ort} es la velocidad del viento ortogonal a la dirección de la calle en el nivel IU y S_{IU}^V es el área total de las *superficies verticales* en el mismo nivel. El valor de la constante C_{drag} es de 0.4 acorde con las mediciones realizadas por Raupach (1992). La fuerza inducida por esta interacción es ortogonal a la dirección de la calle y presenta una componente que es opuesta a la dirección horizontal del viento.

Los resultados de las ecuaciones 2.3 y 2.4 son luego promediados mediante una interpolación realizada entre las rejillas del modelo urbano y del modelo de mesoescala, para luego ser sustituidos en la ecuación 2.2 y de esta manera obtener el término adicional, en la ecuación de momento, representante de la interacción del flujo y las superficies urbanas. El análisis anterior se realiza de manera similar para los restantes flujos [ver Martilli et al. (2002)]. De forma general, el resto de los efectos de la influencia urbana se manifiesta de la forma siguiente:

- Calor: La radiación en las paredes y en los caminos considera el sombreado, la reflexión y el atrapado de la radiación de onda corta y onda larga en los cañones urbanos. Es capaz de almacenar más energía en el ambiente urbano durante el día, dando lugar a simular ciertas características como la elevada capa de inversión sobre la ciudad. Esto además se conecta con la reducción de la pérdida de radiación durante la noche, representando mejor la UHI nocturna.

- Turbulencia: El modelo Noah-BEP ha sido acoplado en el modelo WRF con dos esquemas de turbulencia; desarrollados por Bougeault & Lacarrere (1989) y Mellor–Yamada–Janjic (Janjic,1994); mediante la introducción de un término fuente en la ecuación de la TKE dentro del dosel urbano y modificando la escala de longitud de turbulencia por la presencia de edificios, que determinan la reducción de la intensidad de la turbulencia debajo de la altura promedio del techo.

Martilli et al. (2002) considera que el BEP presenta avances con respecto a los UCMs anteriores:

- EL sumidero de momento es distribuido desde la superficie del suelo hasta la altura del edificio más alto.
- El sombreado y atrapado de la radiación de onda corta y larga en el cañón urbano es tomado en cuenta sobre varias superficies.
- Las escalas de longitudes usadas en el cálculo de la TKE son modificadas por la presencia de edificios.

Para tomar todas las ventajas del BEP, es necesario tener una alta resolución vertical cerca del suelo, por lo que este enfoque es más apropiado para investigación cuando la demanda computacional no es una restricción, mientras que la parametrización BULK y SLUCM son más adecuadas para pronóstico de tiempo real y de calidad del aire (Fei Chen et al., 2011).

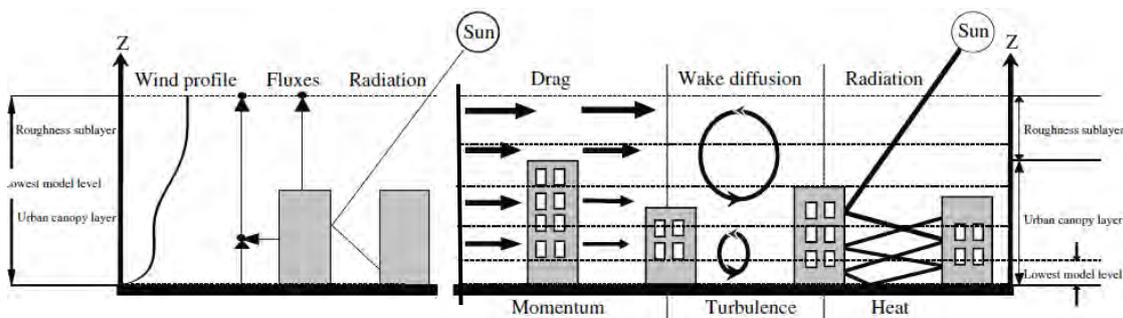


Figura 2.3. Esquemas de los modelos SLUCM (lado izquierdo) y multicapas BEP (lado derecho). Fuente: Fei Chen et al. (2011).

2.3. WUDAPT. Características Principales.

Una de las consideraciones que hay que tener en cuenta al aplicar la modelación urbana, son los datos de entrada necesarios. Los modelos urbanos se expresan en términos de la morfología urbana subyacente en cada celda de rejilla. Dada la existencia de los cañones urbanos y la vegetación intercalada, se requieren las ecuaciones fundamentales para el flujo, la termodinámica y la radiación, mientras que la humedad ha sido ahora mezclada con el

tratamiento de las influencias de estas características morfológicas utilizando los parámetros de dosel urbano (UCPs, por sus siglas en inglés) (J. Ching et al., 2014).

Un nuevo sistema conceptual llamado Herramienta Portal de Acceso y Base de Datos Urbana Mundial (World Urban Database and Access Portal Tool, WUDAPT, por sus siglas en inglés) ha sido propuesto para generar la deseada base de datos mundial en forma de rejilla (J. Ching et al., 2014; J. Ching et al., 2015; Mills et al., 2015). El objetivo del WUDAPT es producir una base de datos global de alta resolución que capture la información sobre la forma y función urbana, y proveer esta información en una forma apropiada para la ciencia (Bechtel et al., 2015). La forma urbana incluye: la cobertura superficial, los materiales de construcción y la geometría urbana; mientras que la función se refiere a aquellas actividades que conducen al consumo de energía, agua y materiales; así como también, aquellas que impulsan las emisiones de calor residual, gases, partículas y agua (Mills et al., 2015). El WUDAPT se basa en imágenes de satélites acopladas con el conocimiento de expertos urbanos locales a través de softwares libres y su resultado puede manejarse sin el conocimiento expertos en teledetección. Además, emplea el Sistema de Información Geográfica para Análisis Geo-científicos Automatizados (SAGA GIS, por sus siglas en inglés) y el Google Earth.

El sistema WUDAPT integra los siguientes componentes:

- Usa el marco de clasificación de Zona Climática Local (LCZ, por sus siglas en inglés) propuesto por (Ian D. Stewart & Oke, 2012).
- Contiene herramientas desarrolladas para obtener otros parámetros como los materiales de los edificios, sus dimensiones, etc,
- Usa la herramienta Geo-Wiki para muestrear tipos de cobertura y uso del suelo a través de las LCZ; mediante la validación de los productos satelitales como los son GLC2000, MODIS, y GlobCover (Fritz et al., 2009) usando los productos de Google Earth,
- Provee acceso abierto a la base de datos así los investigadores pueden usarla para diferentes aplicaciones, desde el modelado del clima y tiempo hasta estudios de balance de energía.

Para categorizar los tres aspectos mencionados anteriormente de la forma urbana, el sistema WUDAPT está estructurado en 3 niveles, los cuales indica el nivel de detalle disponible para la ciudad, así como la metodología empleada. Los datos de nivel más bajo (nivel 0) emplean la tipología de la (LCZ) para clasificar una ciudad y sus alrededores en 17 clases, 10 de las cuales son urbanas (Stewart & Oke, 2012). Cada categoría urbana tiene asociada las variables que describen los aspectos de la morfología urbana y las propiedades de los materiales en términos de rangos de valores. Los valores de las variables como la altura media de los edificios, la razón

de aspecto urbana (H/W) y la fracción de área pavimentada y construida fueron adquiridas del estudio de (Stewart & Oke, 2012), mientras que, la información sobre el albedo y otras propiedades térmicas de los materiales se obtuvieron de (Stewart et al., 2014). El mapa LCZ de una ciudad muestra el carácter de la superficie urbana y, por tanto, la distribución de los valores parámetros típicos. Los niveles de datos más altos (nivel 1 y 2) tienen medidas más detalladas del paisaje urbano.

LCZ es una región de cubierta superficial uniforme, con estructura, material, y actividad humana similares que se extiende desde cientos de metros hasta varios kilómetros en la escala horizontal (Stewart & Oke, 2012). Cada LCZ es nombrada individualmente y ordenada por una o más propiedades superficiales distintivas, la cual en la mayoría de los casos es la altura/aglomeración de los objetos de rugosidad o la cubierta superficial dominante. En la Tabla 2 del Anexo A se enumeran las 10 clases urbanas según el estudio de Stewart & Oke (2012), las mismas, están compuestas por características construidas sobre una cobertura de suelo predominante. En el presente trabajo solamente son usadas estas 10 clases urbanas, comúnmente llamadas UCZ, las cuales son integradas al fichero de uso de suelo sobre Ciudad de México para realizar las simulaciones de mesoescala.

El mapa de LCZ sobre Ciudad de México (véase Figura 2.4) fue generado por los doctores Martilli y Brouse usando la metodología de WUDAPT para el nivel 0 (ver http://geopedia.world/#T4_L107_x-11021531.545467831_y2205915.3085389766_s10_b17) sin la revisión de un experto en la ciudad. En este procedimiento se utilizan las imágenes del satélite Landsat 8 en el SAGA GIS para diferenciar entre los atributos espectrales de diferentes tipos de LCZ basados en las áreas de referencia. Estas áreas son creadas digitalizando partes de la ciudad y sus alrededores (usando Google Earth) que representen ejemplos de los tipos LCZ del área de estudio. Aunque este mapa fue realizado sin la supervisión de un perito técnico de la ciudad, luego que cierto número de áreas de referencia son identificadas para representar la diversidad del paisaje urbano, la forma más óptima es que un experto identifique estas áreas de referencia usando hojas de datos que usan fotografías que describen los tipos de edificios típicos y la cobertura terrestre asociada con cada LCZ. Debido al conocimiento de estos expertos sobre la ciudad en cuestión estos pueden rápidamente identificar aquellas áreas que cumplen con las especificaciones de cada tipo de LCZ hasta que esta redefinición sea satisfactoria.

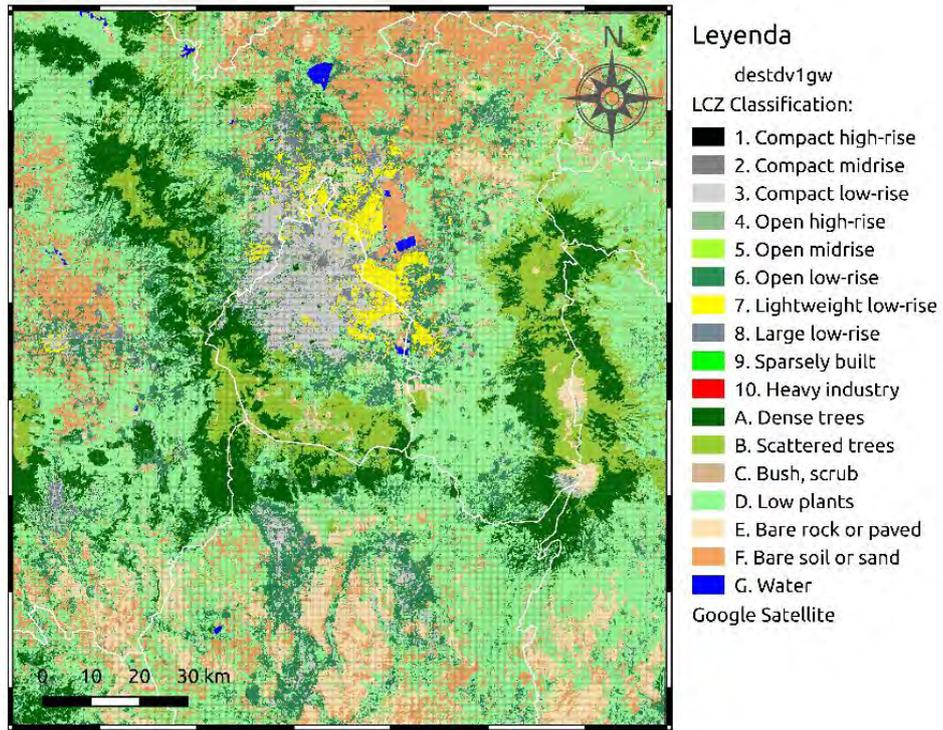


Figura 2.4. Mapa de LCZ sobre CDMX usando la clasificación aleatoria de bosques.

3. Metodología y configuración del modelo.

3.1. Adaptación del uWRF al formato de archivos WUDAPT.

El objetivo más importante del WUDAPT es proveer los parámetros de entrada a los modelos en especial a aquellos con aplicaciones urbanas, la figura 3.1 representa el diagrama de flujo de la metodología implementada por Martilli y otros autores en el informe: “Urbanized WRF modeling using WUDAPT ”. La filosofía seguida para usar el nivel 0 del WUDAPT como entrada para el BEP en el WRF, sigue estos tres pasos:

- El primer paso es extender el número de clases urbanas, de 3 (por defecto en el WRF) a 10 (UCZ), resultando en un total de 40 clases de uso de suelo, este paso fue realizado introduciendo estas 10 nuevas clasificaciones en el código fuente del modelo como lo indica el informe y con el asesoramiento de los autores. Los módulos del código fuente del WRF que fueron adaptados son los siguientes:
 - module_sf_urban.F
 - module_surface_driver.F
 - module_sf_noahdrv.F
 - module_sf_bep.F
 - module_sf_bep_bem.F

Luego de estos cambios y de ampliar el número de clases de uso de suelo a 40 en el archivo LANDUSE.TBL (para que coincida con la variable *num_land_cat* en los archivos de configuración) se guarda y se compila el modelo, esto último fue realizado con el compilador de Intel para C++ y Fortran 90.

- El segundo paso fue transformar el mapa generado por WUDAPT con la información del uso de suelo urbana a un archivo binario con el formato requerido por el WPS, de forma tal que los datos de entrada están distribuidos en un arreglo, con una distancia constante en el plano longitudinal y latitudinal. Este paso fue posible a través de un programa en Fortran que lee el archivo de texto producido por el software SAGA GIS (mapa LCZ de la CDMX) y que proyecta e interpola esta información en una malla acorde a las dimensiones del dominio de interés. Luego de tener este archivo binario, el mismo es añadido al GEOGRID.TBL junto a su archivo homólogo del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) que emplea 24 clases de uso de suelo. De esta forma las clases correspondientes a las clasificaciones no urbanas son aquellas brindadas por el USGS y las urbanas las brindadas por el WUDAPT.

- Por último, al archivo URBAPARM.TBL se le introdujeron los parámetros requeridos para cada UCZ según las referencias que se muestran en la figura 3.1. En el caso de la altura y ancho de los edificios, fueron extraídos de datos del LIDAR disponible para la CDMX a 5 metros de resolución⁶, para esto se usaron ciertas bandas representativas de la morfología de la ciudad que incluyeran la mayor cantidad de tipos de estructuras urbanas acorde a la clasificación de LCZ.

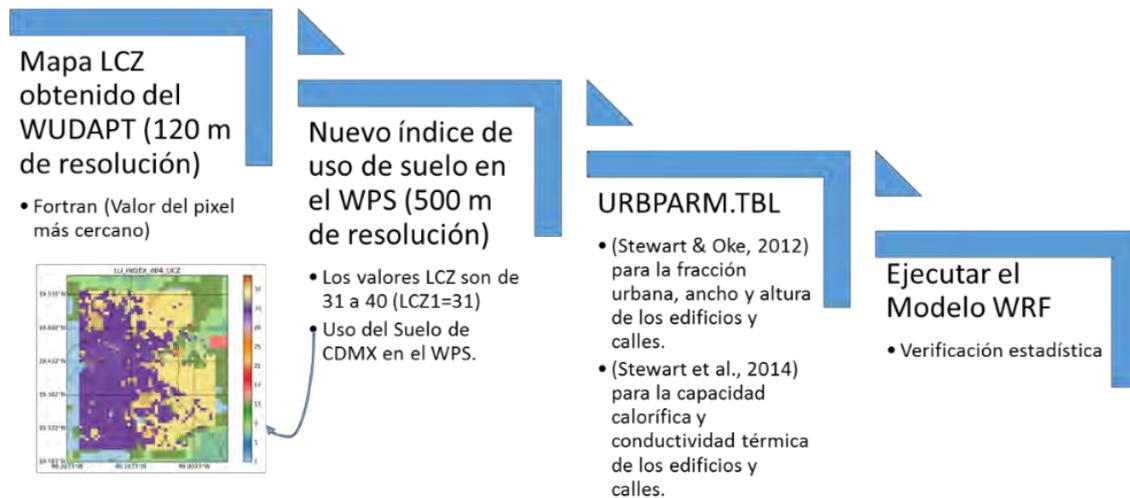


Figura 3.1. Diagrama de Flujo para usar WUDAPT en el uWRF/BEP, tomado de “Urbanized-WRF-modeling-using-WUDAPT-web-version-March2016.pdf”

3.2. Configuración del Modelo.

Se empleó el Modelo WRF V3.2 acoplado al Noah LSM y al BEP UCM, con cuatro dominios anidados centrados en las coordenadas 19°34.4' de latitud N y - 99°13.1' de longitud W (véase figura 3.2), donde el dominio más interno ocupa gran parte de la CDMX, así como zonas del Estado de México. Estos dominios mantienen la razón típica de resolución entre ellos de 1:3, la proyección cartográfica usada fue la de Mercator, la configuración específica para cada dominio es la siguiente:

- **Dominio 1:** 13.5 km de resolución y 30 x 30 puntos de rejilla.
- **Dominio 2:** 4.5 km de resolución y 58 x 58 puntos de rejilla.
- **Dominio 3:** 1.5 km de resolución y 118 x 103 puntos de rejilla.
- **Dominio 4:** 0.5km de resolución y 55 x 64 puntos de rejilla.

⁶ Estos datos fueron brindados por el Instituto de Geografía de la UNAM y el trabajo de post-procesamiento fue realizado por la especialista del departamento de fisicoquímica de nuestra institución Msc. Berta Morales.

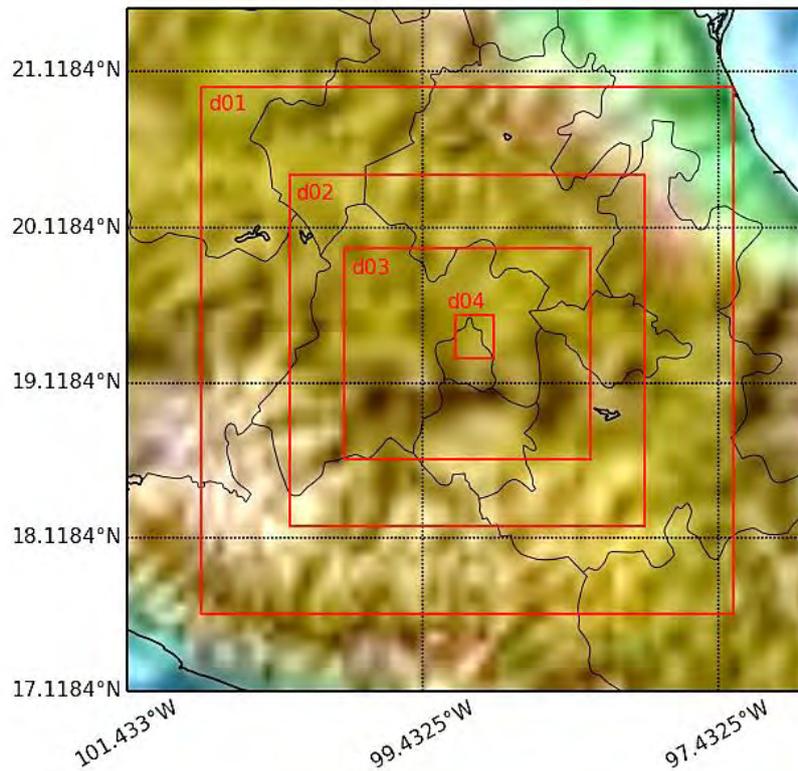


Figura 3.2. Dominios anidados.

Luego de realizar los pasos descritos en el epígrafe anterior, la figura 3.3 muestra el resultado final obtenido para el mapa de uso del suelo en el dominio 4 (dominio de interés). El mayor porcentaje de representación sobre el dominio lo alcanza la clase 33, edificaciones de pequeña altura y compactas (LCZ3, Compact low rise), con un 36.05% seguido de la clase 37, edificaciones de pequeña altura y de bajo costo (LCZ 7, Lightweight low-rise), con 22.52% (véase Figura 3.4). Existen algunas clases que no están representadas como la 31, 35, 39 y 40, las clasificaciones restantes presentan porcentajes de representación muy bajos (entre 0.5 y 6%).

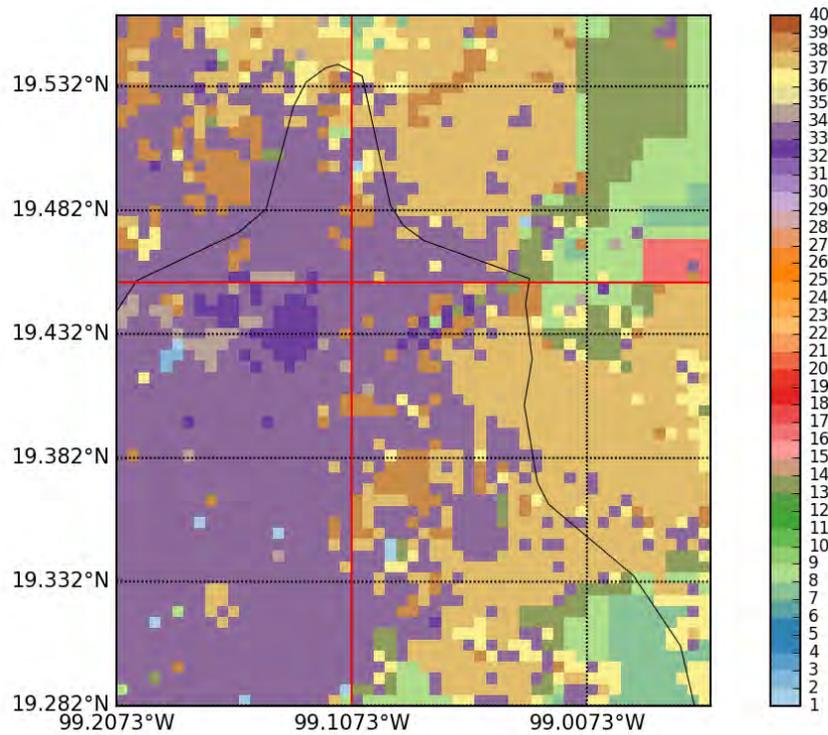


Figura 3.3. Uso del Suelo, 40 Clases (31-40: urbanas), las líneas rojas representan la ubicación de los cortes transversales.

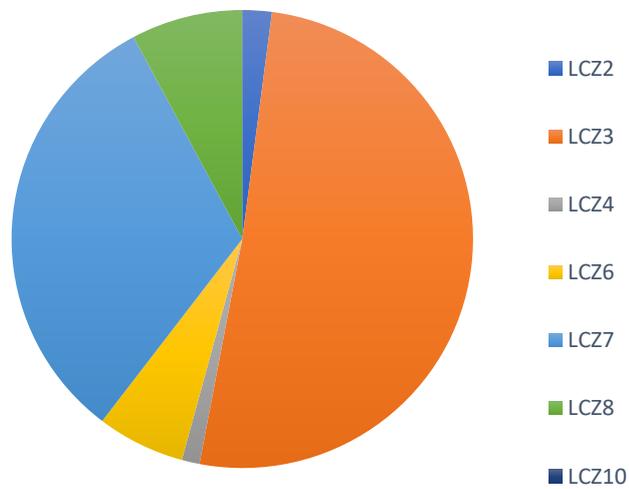


Figura 3.4. Representación de las clases urbanas sobre el dominio cuatro.

Se realizaron dos tipos de simulaciones, empleando el WRF con las modificaciones ya mencionadas (urbana) y en su forma original (no urbana), en dos épocas del año 2016, con el objetivo de analizar y evaluar el comportamiento del modelo en el periodo seco y lluvioso característico de la región. La única diferencia entre ambos tipos de simulaciones es la activación o no de la parametrización urbana para el dominio 4 en las opciones físicas del modelo. Los periodos seleccionados fueron:

- **21-23 de enero de 2016:** Este periodo estuvo bajo la presencia de un sistema frontal en el norte del Golfo de México (ver Anexo B), manteniendo temperaturas frías debido a la presencia del anticiclón correspondiente a este frente.
- **14-16 de agosto de 2016:** Este periodo se caracterizó por precipitaciones de tipo convectivas y orográficas en la tarde y en la noche, propias de la época. En general se mantuvieron temperaturas cálidas sobre la región propias del verano (ver Anexo B).

El criterio de selección de los días escogidos fue aquel donde existió días consecutivos donde la región de estudio no estuviera influenciada por ningún fenómeno sinóptico externo que afectara los resultados de las simulaciones.

Para llevar a cabo estas simulaciones a continuación se describen las restantes configuraciones:

- **Condiciones iniciales y de frontera:** Datos del Análisis del Sistema de Pronóstico Global (GFS-ANL, por sus siglas en inglés) con 1 x 1 grado de resolución cada 6 horas.
- **Dimensión vertical:** 51 niveles verticales.
- **Parametrizaciones físicas empleadas:**
 - **Microfísica:** Esquema de un solo momento de 6 clases de WRF (WSM 6 – class, por sus siglas en inglés) (Hong & Lim, 2006).
 - **Esquemas de radiación de onda larga/corta:** RRTM (Mlawer, Taubman, Brown, Iacono, & Clough, 1997)/Dudhia (Dudhia, 1989).
 - **Esquema de la PBL:** Bougeault–Lacarrere (BouLac) (Bougeault & Lacarrere, 1989).

3.3. Esquema de Evaluación.

Fueron utilizadas 9 estaciones para la evaluación de los resultados del modelo (ver Tabla 3.1). Para el caso de las variables viento y temperatura se emplearon 8 estaciones meteorológicas (las 8 primeras de la Tabla 3.1) pertenecientes a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Secretaría de Medio Ambiente de la CDMX. Además, para la comparación y evaluación de las salidas del modelo de altura de la PBL se usaron los diagramas termodinámicos correspondientes a los sondeos atmosféricos lanzados desde el Servicio Meteorológico Nacional en Tacubaya. La ubicación de estas estaciones en el dominio se puede apreciar en la figura 3.4. En general la distribución de las mismas sobre el dominio no es uniforme, pues existen zonas, como la porción NE y SO, que no cuentan con ninguna estación para el análisis.

Tabla 3.1. Estaciones Meteorológicas con su clase urbana correspondiente, coordenadas y elevación sobre el nivel del mar.

ID	Nombre	Clase Urbana (LCZ)	Latitud	Longitud	Elevación
GAM	Gustavo A. Madero	33	19,48	-99,09	2227
HGM	Hospital General de México	33	19,41	-99,15	2234
MER	Merced	34	19,42	-99,12	2245
NEZ	Nezahualcoyotl	37	19,39	-99,03	2235
SAG	San Agustín	38	19,53	-99,03	2241
UAX	UAM, Xochimilco	33	19,30	-99,10	2246
UIZ	UAM, Iztapalapa	38	19,36	-99,07	2221
XAL	Xalostoc	38	19,52	-99,08	2160
TAC	Tacubaya	33	19,41	-99,20	2313

Fueron utilizados cuatro estadígrafos para el análisis entre las simulaciones y las observaciones, el coeficiente de correlación de Pearson (R) para medir el grado de relación entre ambas medidas, el índice de concordancia (IOA, por sus siglas en inglés) para describir la covarianza relativa entre ambas medidas, para la estimación del error de las simulaciones con respecto a lo observado, se utilizó, el sesgo medio (MB, por sus siglas en inglés) y el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés). El MB es útil para conocer si el modelo subestima o sobrestima las mediciones mientras que el RMSE calcula la distancia horaria promedio para cada estación entre las simulaciones y las observaciones.

Todo el trabajo de post-procesamiento de los resultados, análisis estadístico y el procesamiento gráfico fue realizado con diversos programas desarrollados por el autor en el lenguaje de programación Python específicos para este estudio.

Cabe destacar que, aunque la altura de la PBL es una variable de pronóstico del modelo WRF, para el caso de nuestras simulaciones el modelo presentó dificultades en su almacenamiento, por lo que la misma fue estimada basándonos en lo descrito por Cheng et al. (2002) donde define la PBLH como la altura a la cual la energía cinética turbulenta (TKE) decrece a una pequeña fracción de su correspondiente valor en superficie, en vez de tomar una fracción se tomó un valor fijo de $TKE = 0.05$ (valor empírico recomendado por el autor de la parametrización).

Para el análisis de la temperatura, se tomó la temperatura potencial en superficie (k_0) y en el segundo nivel vertical (k_2), debido principalmente a dos razones fundamentales. Primero, en k_0 , debido a la importancia dinámica que presenta esta variable para hacer los estudios del efecto UHI, al ser una variable que no toma en cuenta la expansión o compresión de la parcela de aire al encontrarse con diferentes obstáculos a su paso; y segundo, en k_2 , a partir de la misma se puede calcular la temperatura ambiente para este nivel que es el correspondiente con la altura a la que se encuentran los instrumentos de medición en la zona urbana.

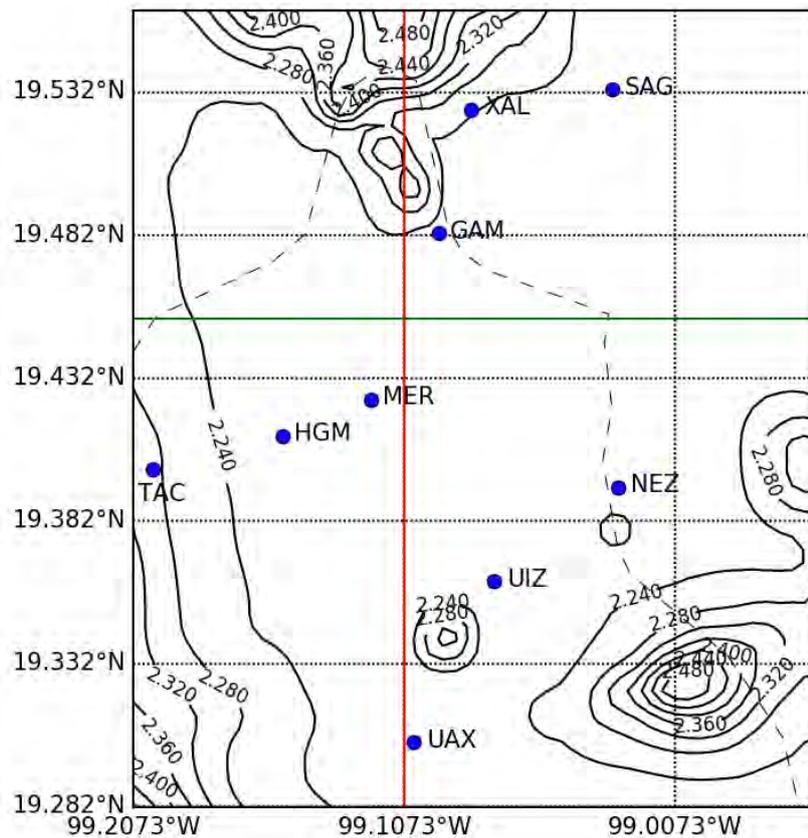


Figura 3.5. Ubicación de las estaciones meteorológicas usadas para la evaluación. Las líneas coloreadas representan los cortes transversales realizados, corte longitudinal (línea roja), corte latitudinal (línea verde).

4. Resultados y discusión

En el presente capítulo se muestran los resultados desde diferentes puntos de vistas:

- Se presenta un análisis espacial del comportamiento promedio para la temperatura potencial, el viento a 10m y la altura de la PBL usando el modelo urbanizado uWRF y el no urbanizado WRF.
- Se muestra el comportamiento en diferentes niveles verticales de la velocidad de viento de ambos modelos a partir de ciertos cortes transversales realizados.
- Para determinar el comportamiento temporal de la temperatura ambiente, la velocidad del viento a 10m y la altura de la PBL de ambos modelos, se comparan con mediciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) que opera en el Valle de México, y con información de altura de capa de mezcla proporcionada por el Sistema Meteorológico Nacional realizada en la estación Tacubaya.
- Para conocer cuál simulación presenta una mejor aproximación con respecto a las observaciones, se muestra un análisis estadístico de las variables mencionadas en el punto anterior.

4.1. Comportamiento promedio de la temperatura potencial, viento a 10m y la altura de la PBL.

La razón por la que se concentra nuestra atención en las variables de temperatura potencial, viento a 10m y la altura de la PBL es porque estas son de primordial importancia para estudios acerca de calidad del aire en el Valle de México donde se planea utilizar uWRF en el futuro.

En esta sección se muestra el comportamiento promedio horario diurno y nocturno de dichas variables para ambos periodos de simulación usando los modelos WRF y uWRF. Además, para el caso específico del viento se expone una comparación usando un corte transversal para coordenadas que incluyen zonas con diferente densidad de urbanización. Se presenta además un contraste entre las simulaciones de uWRF y WRF, donde el término de diferencias positivas se refiere a que uWRF simuló valores superiores que WRF de la variable en cuestión.

Los resultados de esta investigación aportarán conocimiento y bases para poder simular la dispersión y concentración de contaminantes en un escenario urbano, como lo es la CDMX, por lo que considerar el análisis de la altura de la PBL es un punto esencial en el presente estudio.

4.1.1. Temperatura potencial.

Como se muestra en la Figura 4.1 (a, b), la temperatura diurna potencial promedio horaria para el periodo seco (enero), mostró valores predominantes entre los 36 y 37 °C para el uWRF y

entre los 33 y 34°C para el WRF. Los contrastes entre el uWRF y el WRF para el caso diurno son observados en la Figura 4.1 (c), donde, se muestran diferencias positivas entre 2.5 y 3.0°C en la mayor parte del dominio, mientras que se alcanzan diferencias de hasta 3.5°C en algunas zonas al centro y al sur. Esto significa que uWRF presentó temperaturas de aproximadamente hasta 3 °C mayor de las simuladas por WRF.

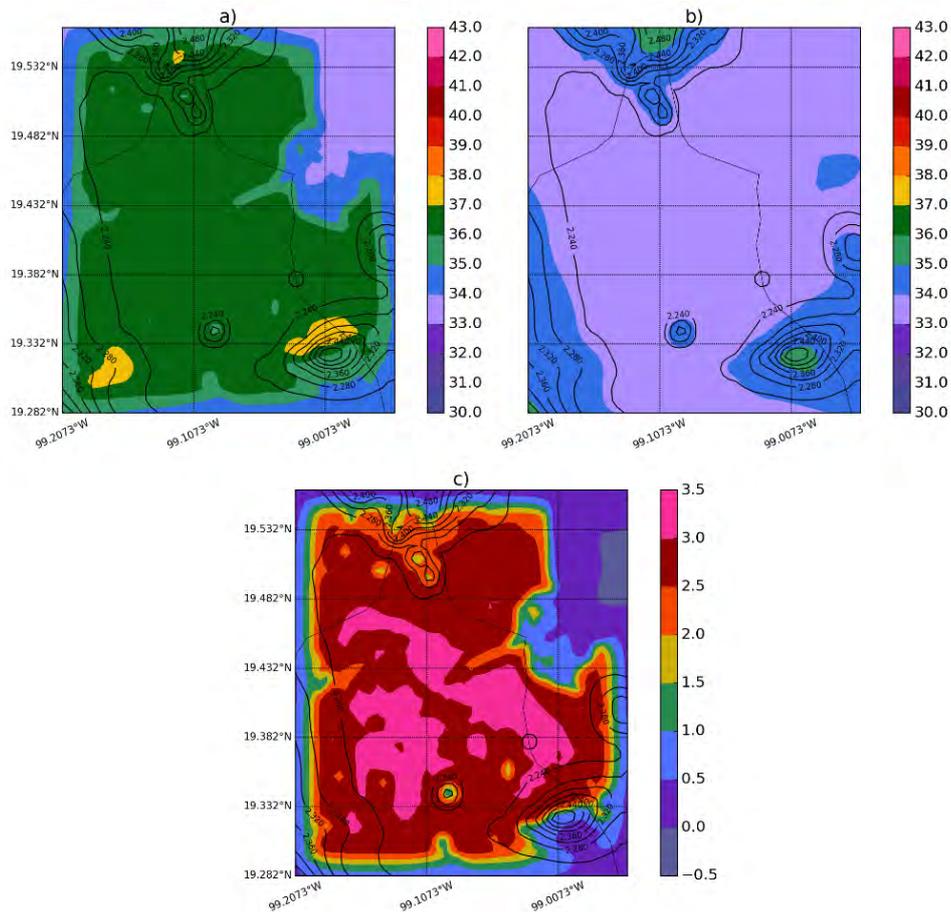


Figura 4.1. Comportamiento promedio horario diurno de la temperatura potencial (°C) durante el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF -WRF.

Durante la noche, las temperaturas predominantes se establecieron entre 33 y 34 °C para uWRF y WRF; sin embargo, para WRF este patrón presentó ligeras diferencias en cuanto a su amplitud (véase Figura 4.2 (b)). Se manifestaron diferencias positivas (menores a 0.5°C) en la mayor parte del dominio (véase Figura 4.2 (c)).

En ambos ciclos se manifiesta una mejor representación del campo de temperatura potencial por parte del uWRF, pues se reconocen diversas clases urbanas en las que se representan con mayor detalle los procesos de intercambio de energía, incluyendo los diferentes materiales de construcción que almacenan mayor cantidad de calor.

El efecto UHI diurno sólo es observado por el uWRF (véase Figura 4.1 (a)), pues el área donde las temperaturas potenciales son de hasta aproximadamente 3°C mayores que sus alrededores, coincide con la huella urbana que se observa en la Figura 3.3. En el caso del efecto nocturno este si es representado por ambos modelos, pero con dimensiones diferentes, pues la extensión de la isla en uWRF es mayor que en WRF.

El comportamiento de las temperaturas potenciales promedio horarias en las simulaciones realizadas en el periodo lluvioso (agosto) siguieron las características típicas de esta estación del año. El intervalo predominante durante el ciclo diurno fue de 41 a 42 °C para el uWRF (véase Figura 4.3(a)), y se presentaron algunas áreas con valores de hasta 43°C, principalmente al sureste del dominio. Estos patrones contrastaron con los encontrados en el WRF (Figura 4.3 (b)), donde el intervalo representativo estuvo entre los 39 y 40°C. Las desigualdades entre ambas simulaciones diurnas son observadas en la Figura 4.3 (c), donde se aprecian valores positivos en gran parte del dominio, con diferencias aproximadas de hasta 3°C.

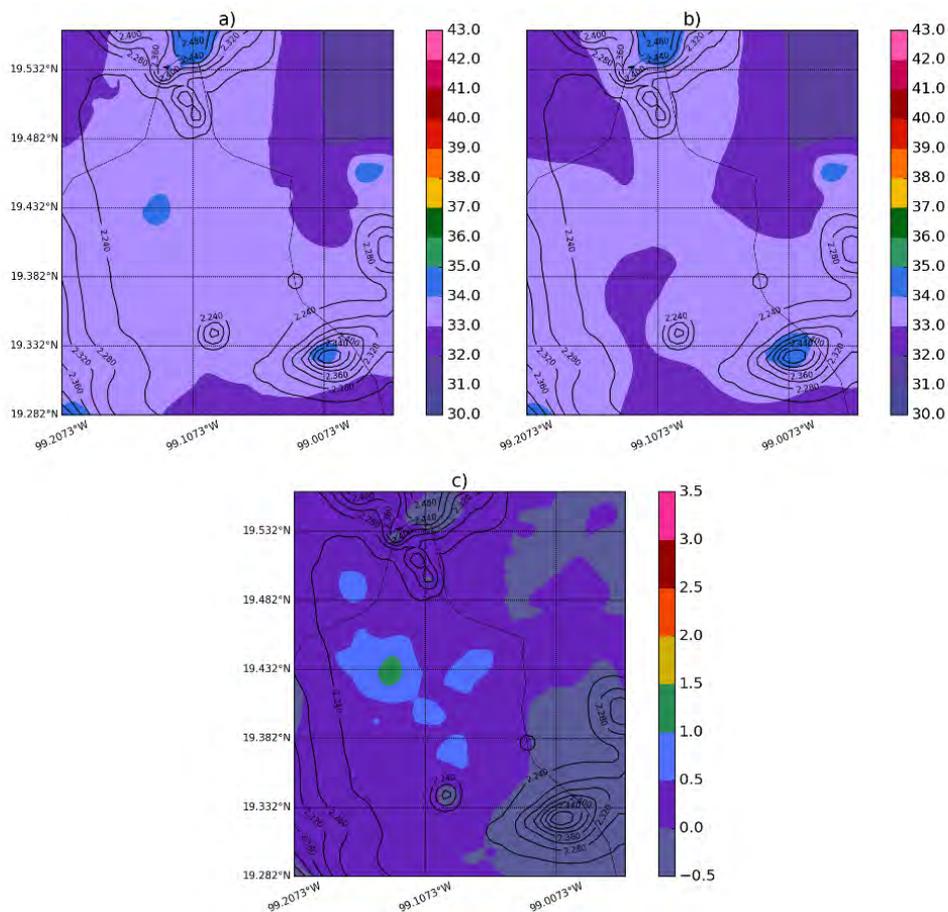


Figura 4.2. Comportamiento promedio horario nocturno de la temperatura potencial (°C) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF tradicional, c) uWRF - WRF.

Durante el ciclo nocturno en el periodo lluvioso el intervalo que prevaleció fue de 37 a 38 °C (véase Figura 4.4 (a) y (b)), aunque se pueden observar zonas para ambas simulaciones con

rangos entre los 38 y 39 °C, que para el caso del WRF (véase Figura 4.4 (b)) abarcaron una mayor amplitud, principalmente sobre su porción sur. La distribución espacial de este campo en WRF no corresponde con la zona urbana ubicada en el dominio, por lo que se puede inferir que, en este caso, existen otro u otros factores que el uWRF no reconoce, que son ajenos a la influencia de la zona urbana representada en el dominio, siendo esta sólo una de las influencias en el comportamiento de esta variable. El WRF de forma general, simuló mayores temperaturas que el uWRF con diferencias de hasta 0.5°C que abarcaron casi todo el dominio (véase Figura 4.4 (c)). Las diferencias positivas solo se manifestaron principalmente al noroeste del dominio, siendo menores a 0.5°C.

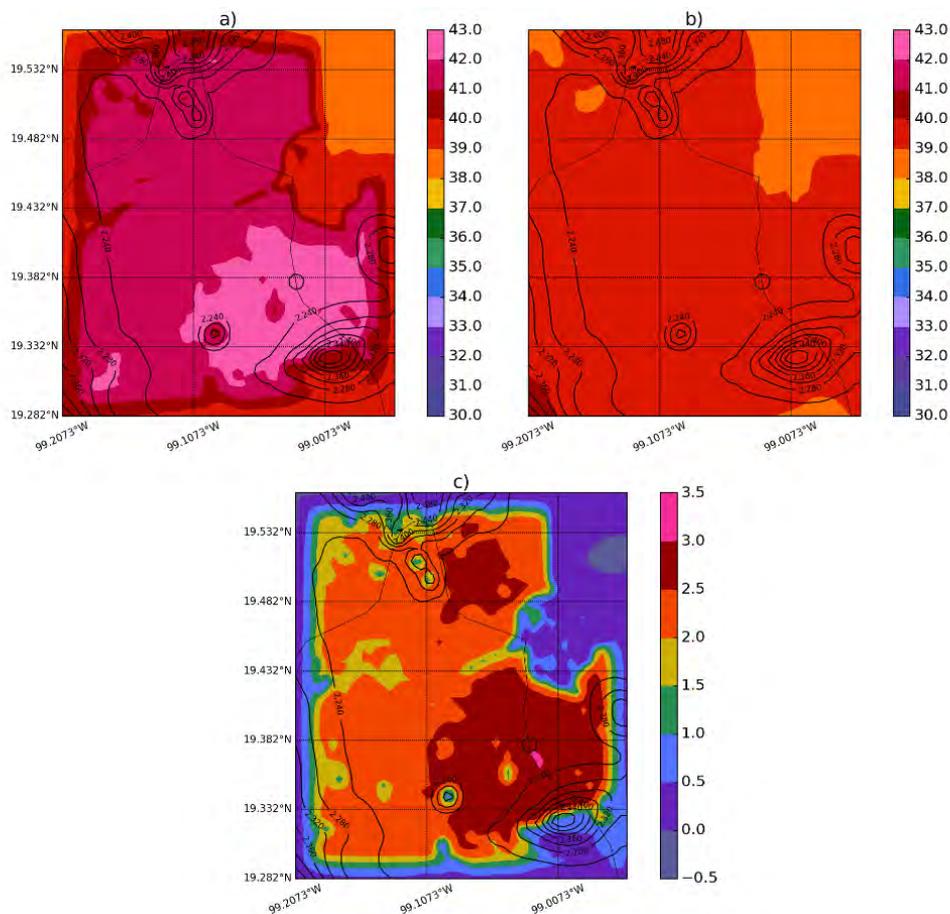


Figura 4.3. Comportamiento promedio horario diurno de la temperatura potencial (°C) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF – WRF.

El efecto UHI diurno y nocturno es visible en ambas simulaciones en el período lluvioso. Para el caso del efecto diurno, la diferencia de temperaturas entre las zonas rurales y urbanas para uWRF son de hasta aproximadamente 3°C, mientras que, para WRF es de 1°C. En el nocturno ambas simulaciones presentan una intensidad de alrededor de 1 °C, aunque existen algunas diferencias en cuanto a su distribución. En particular, se destacan, aisladas zonas de máximos para uWRF (específicamente al oeste del dominio sobre la latitud 19.432 N) que coinciden con

zonas urbanas donde existe más intercambio de energía debido a la densidad de superficies urbanas que absorben y emiten en mayor medida que otras partes de la ciudad.

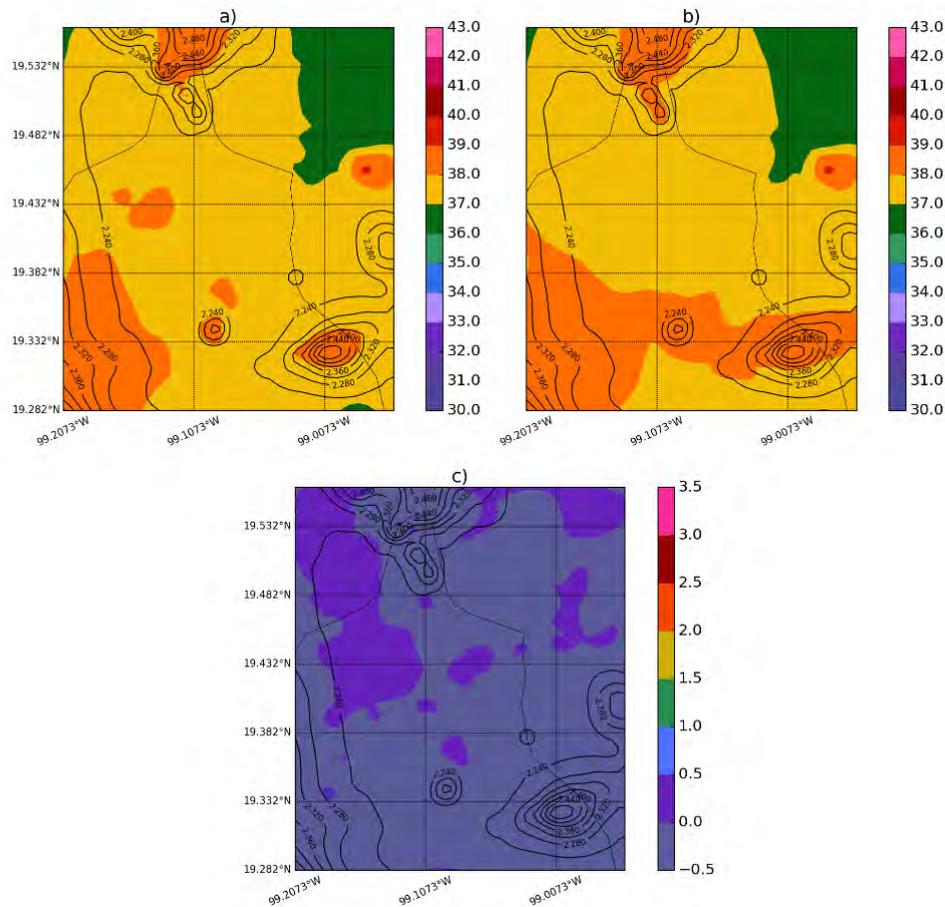


Figura 4.4. Comportamiento promedio horario nocturno de la temperatura potencial (°C) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF – WRF.

4.1.2. Viento a 10m.

En el periodo seco la intensidad del viento promedio horario predominante para ambas simulaciones (uWRF y WRF) durante el día presentó valores hasta 1.1 m/s, produciéndose varios eventos de calma en la mayor parte del dominio, mientras que, durante la noche predominaron velocidades entre 0.6 y 2.0 m/s (véase Figura 4.5 a y b).

Como se muestra en la Figura 4.5 (c), las velocidades promedio horarias diurnas presentan diferencias espaciales entre la simulación uWRF y de WRF. Se aprecia que la zona de menores magnitudes es más reducida en extensión para el uWRF (véase Figura 4.5 (a)) que para el WRF (véase Figura 4.5 (b)). Este resultado concuerda con lo descrito por Martilli (2002), donde muestra que en las áreas donde existe un incremento de la altura de los edificios y de la razón H/W, el modelo uWRF responde con una mayor reducción de la intensidad del viento debido a la mayor fuerza de arrastre y consiguiente disminución del momento. Se puede constatar que el uWRF toma en cuenta estas diferencias espaciales de altura y de razón H/W entre las 10 clases

urbanas descritas en la sección 3.2, y de esta forma, calcula la magnitud del viento en dependencia de la distribución de las mismas; mientras que WRF no es capaz de ver estos contrastes y prácticamente en toda la zona urbana asigna el mismo valor de velocidad del viento.

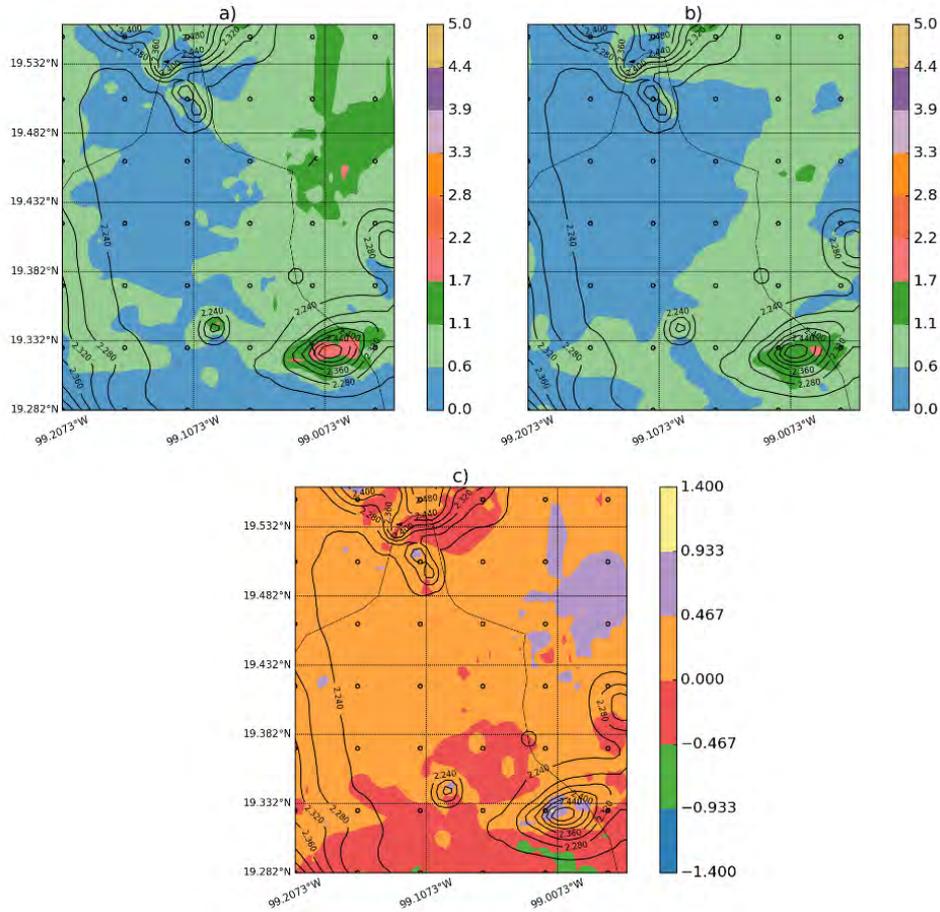


Figura 4.5. Comportamiento promedio horario diurno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.

En el periodo nocturno, se puede observar para ambas simulaciones, un aumento de estas velocidades (véase Figura 4.6) con respecto al ciclo diurno. Aunque este incremento es diferente para el uWRF y el WRF, los intervalos de velocidades más altas (1.1-1.7 m/s) para el WRF abarcan una mayor extensión en el dominio (véase Figura 4.6 (b)), mientras que el uWRF mantiene estos rangos en la periferia del área de estudio (véase Figura 4.6 (a)) o en zonas identificadas como no urbanas en la clasificación de uso del suelo (véase Figura 4.6 (c)).

De forma general, este aumento de velocidades en la noche está relacionado con que la convección en estas horas está más limitada y por tanto se manifiesta una disminución en la altura de la PBL (como se verá más adelante). Además, esto se debe también a una desigualdad entre alturas de la PBL entre ambos modelos, ya que la altura de la PBL en WRF es menor que en uWRF. Este contraste podrá ser mejor apreciado en la siguiente sección.

Para el periodo húmedo la intensidad del viento promedio horario predominante durante el día, simulada por uWRF presentó valores entre 0.6 y 1.7 m/s. Además, es posible observar como el uWRF presenta menores velocidades promedio sobre las zonas urbanas y mayores sobre las rurales en comparación con aquel simulado por WRF (véase Figura 4.7 (c)), debido principalmente a los parámetros morfológicos que generan turbulencia y reducen el momento.

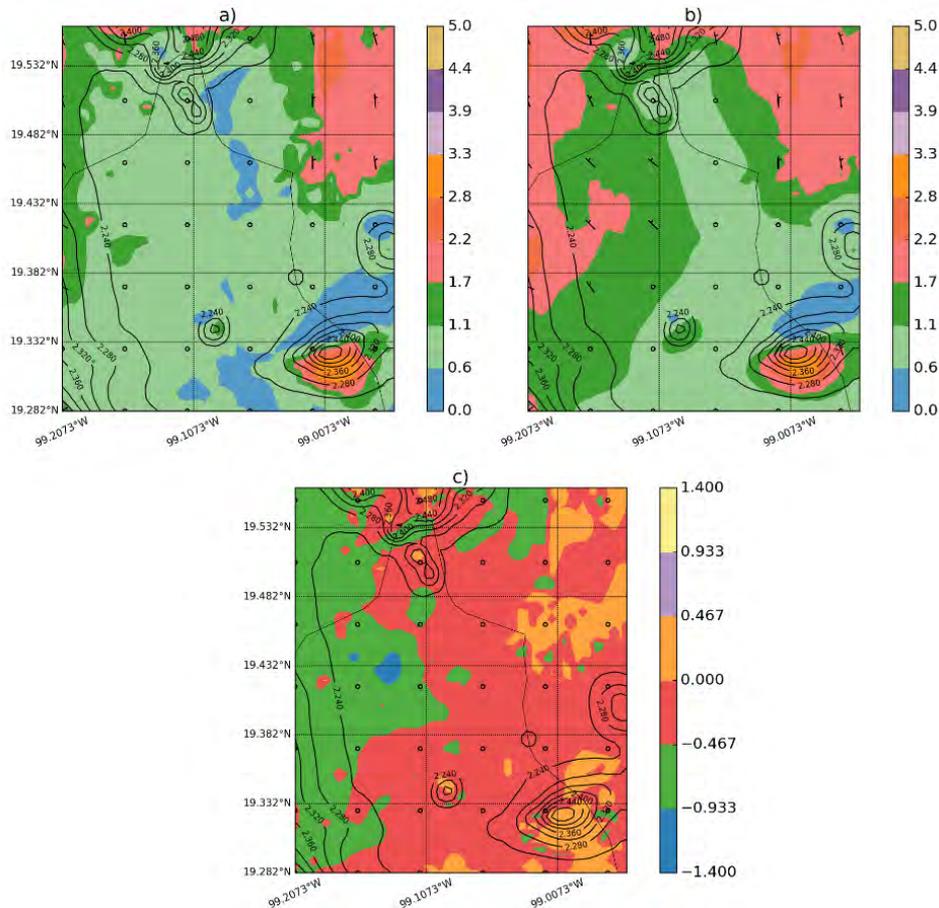


Figura 4.6. Comportamiento promedio horario nocturno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.

En la noche predominaron velocidades entre 0.6 y 1.1 m/s. Además, debido a la permanencia de la turbulencia generada por las edificaciones, no se observó por el uWRF el incremento en la velocidad del viento con respecto a la simulada durante el día como sucedió en el periodo seco (véase Figura 4.8). Esto se debe probablemente al alto contenido de humedad típico de la época del año, que provoca débiles gradientes de temperatura y por lo tanto una disminución en la circulación térmica, sumado a la fuerza de arrastre inducida por las edificaciones, lo que coincide con la existencia ya mencionada de una UHI nocturna más débil que la diurna. Este resultado también fue encontrado por Martilli (2002), durante el estudio numérico de la parametrización urbana aquí presentada.

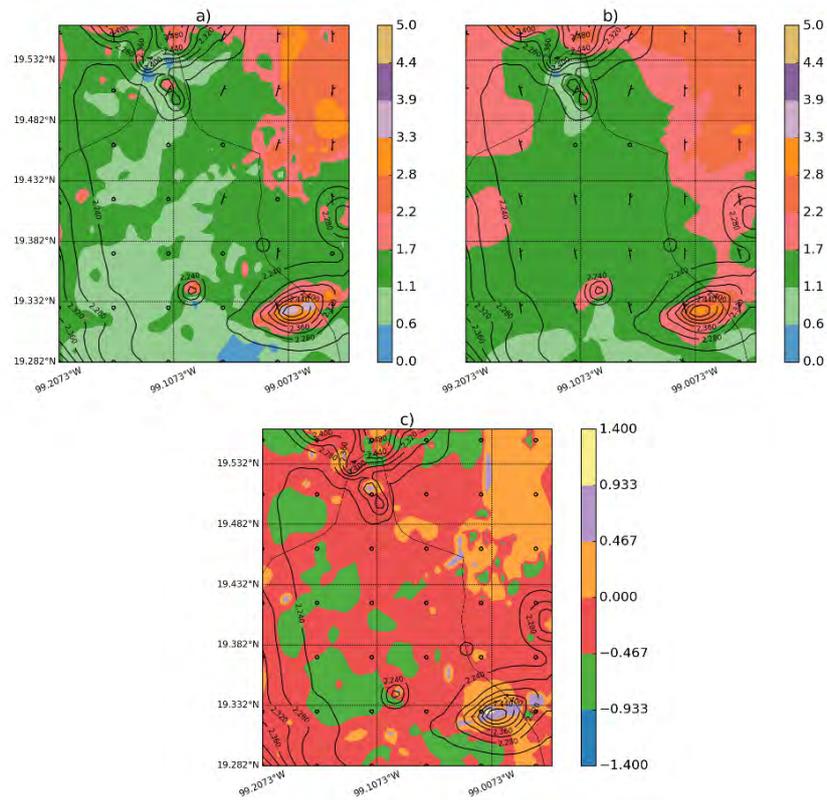


Figura 4.7. Comportamiento promedio horario diurno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF tradicional, c) uWRF - WRF.

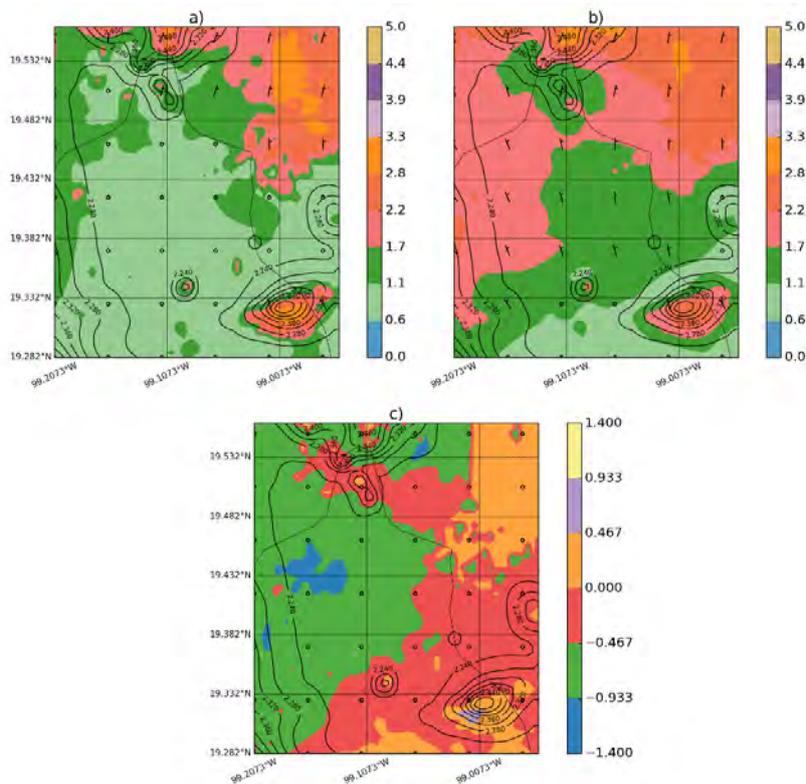


Figura 4.8. Comportamiento promedio horario nocturno de la velocidad del viento (m/s) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.

4.1.3. Altura de la PBL (PBLH).

Es válido recordar, como se mencionó en el capítulo anterior, que esta variable fue estimada a partir de la TKE, tomando como referencia cuando esta es igual a 0.05.

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran el comportamiento promedio horario de la PBLH para el periodo seco. Durante el día se puede observar que la principal diferencia entre el uWRF y WRF es que el primero estima una altura mayor en la parte del dominio correspondiente a la zona urbana (600-800 m). Estos contrastes son mejor observados en la figura 4.9 (c), donde las diferencias positivas de hasta 350m, son percibidos en gran parte del dominio, en especial al centro y al sur del mismo. Esto es probablemente debido a la combinación de varios factores: los flujos de calor sensible proveniente de la zona urbana son mayores que aquellos derivados del área rural, donde uWRF los calcula con mayor exactitud usando las categorías urbanas de las que WRF carece, además, la fuerte turbulencia generada por la rugosidad de las superficies urbanas, ya que este parámetro varía en dependencia de la clasificación urbana, lo que trae como consecuencia que uWRF estime una mayor turbulencia. Por tanto, se desarrolla una PBLH más alta, cuya diferencia con WRF es de cientos de metros.

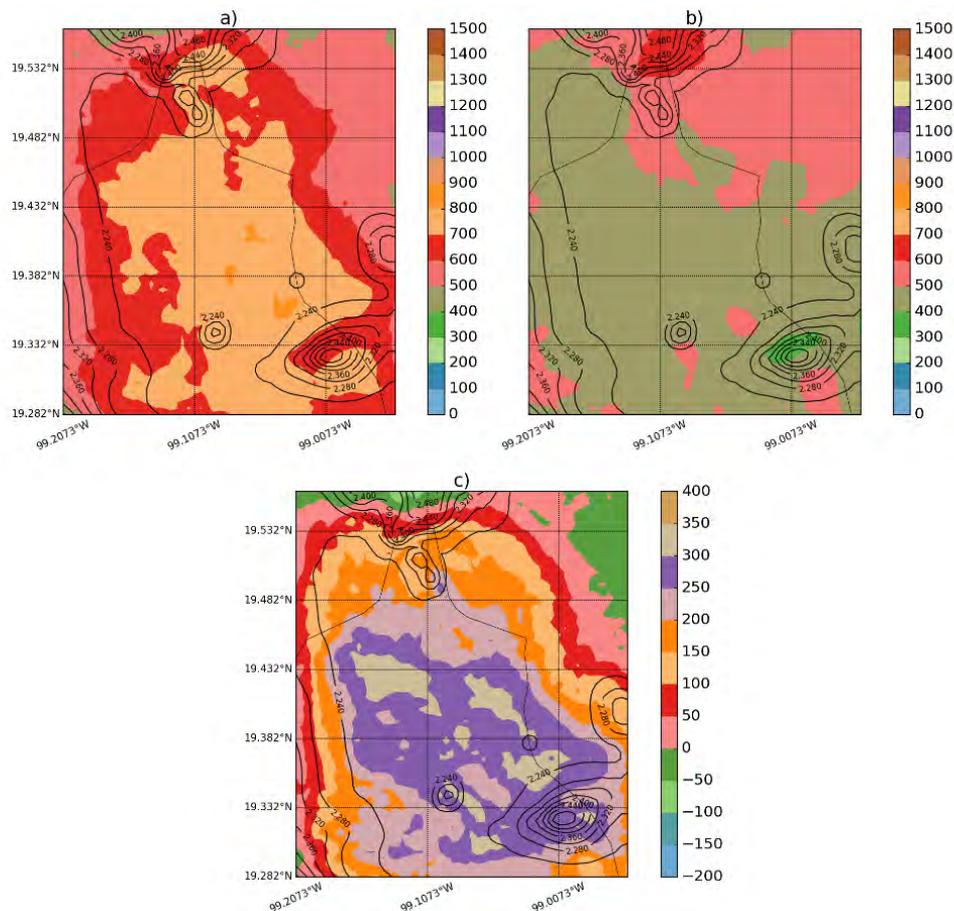


Figura 4.9. Comportamiento promedio horario diurno de la PBLH (m) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.

Durante la noche estas condiciones cambian. Debido a que no hay radiación solar, existe un enfriamiento radiativo de la superficie, resultando en un descenso de la temperatura y una disminución de flujos verticales. Se observa, para ambas simulaciones, una PBL de hasta 300 m de altura (Figura 4.10 (a) y (b)). La diferencia principal está dada en la distribución espacial, pues en algunas áreas uWRF simula una PBL más alta en comparación con WRF, mientras que en otras sucedió lo contrario: las zonas donde la PBLH, donde uWRF es mayor, coinciden con el área de clases urbanas de mayor densidad y mayor altura de los elementos de rugosidad (véase Figura 4.10 (c)).

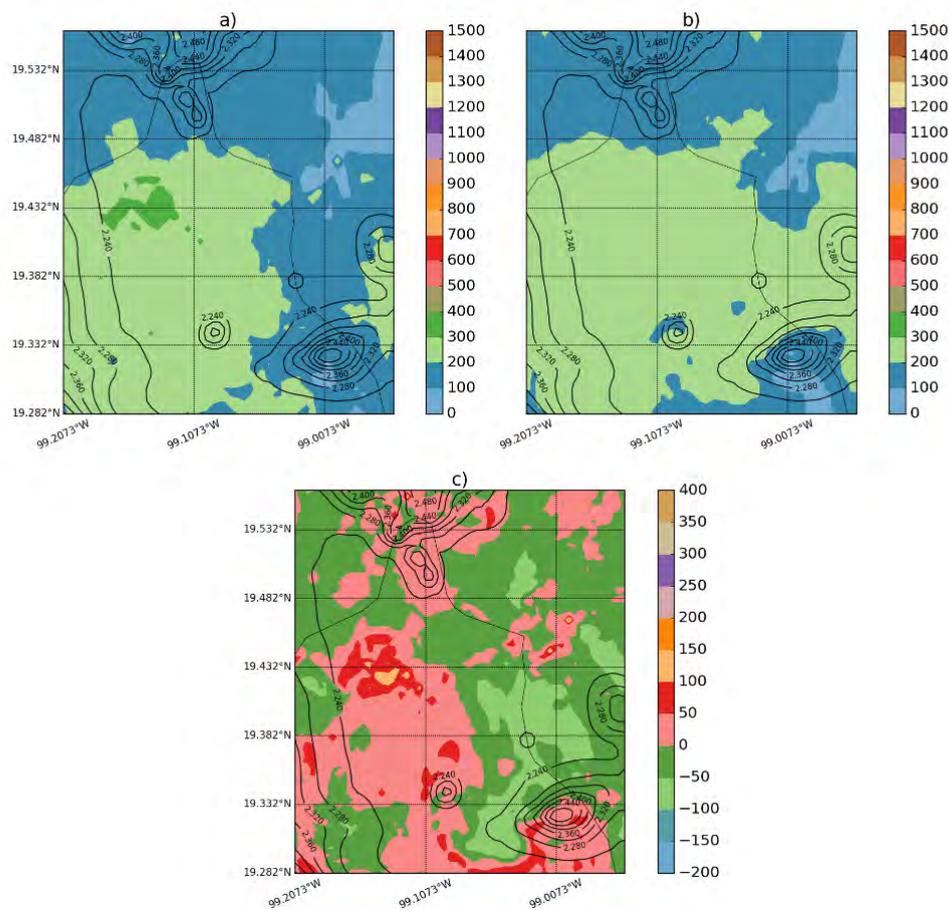


Figura 4.10. Comportamiento promedio horario nocturno de la PBLH (m) en el periodo seco, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.

En cuanto al periodo húmedo lo más relevante es que durante esta estación del año todas las variables que influyen en la PBLH sobre la ciudad y sus alrededores son más intensas. Las simulaciones diurnas urbanas muestran intervalos de PBL más altas (700-1000m) en comparación con el periodo seco (véase Figura 4.11 (a)). Las diferencias entre las simulaciones diurnas del uWRF y el WRF son similares a las modeladas durante el periodo seco, aunque la extensión de los máximos contrastes fue menor (véase Figura 4.11 (c)). En las simulaciones nocturnas (véase Figura 4.12) se presentaron alturas de hasta 400 m como se puede observar en

las figuras 4.12 (a y b). En este caso, en la mayor parte del dominio el WRF presentó alturas mayores (véase Figura 4.12(c)). Estas diferencias negativas estuvieron ubicadas principalmente en el área urbana, excepto en las zonas con mayor razón H/W, mientras que en las zonas rurales se puede observar que la PBLH de uWRF fue mayor que la de WRF. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por otros autores usando esta parametrización, especialmente los mostrados por Martilli et al. (2002) donde se observan las diferencias en la PBLH nocturna sobre zonas urbanas y rurales.

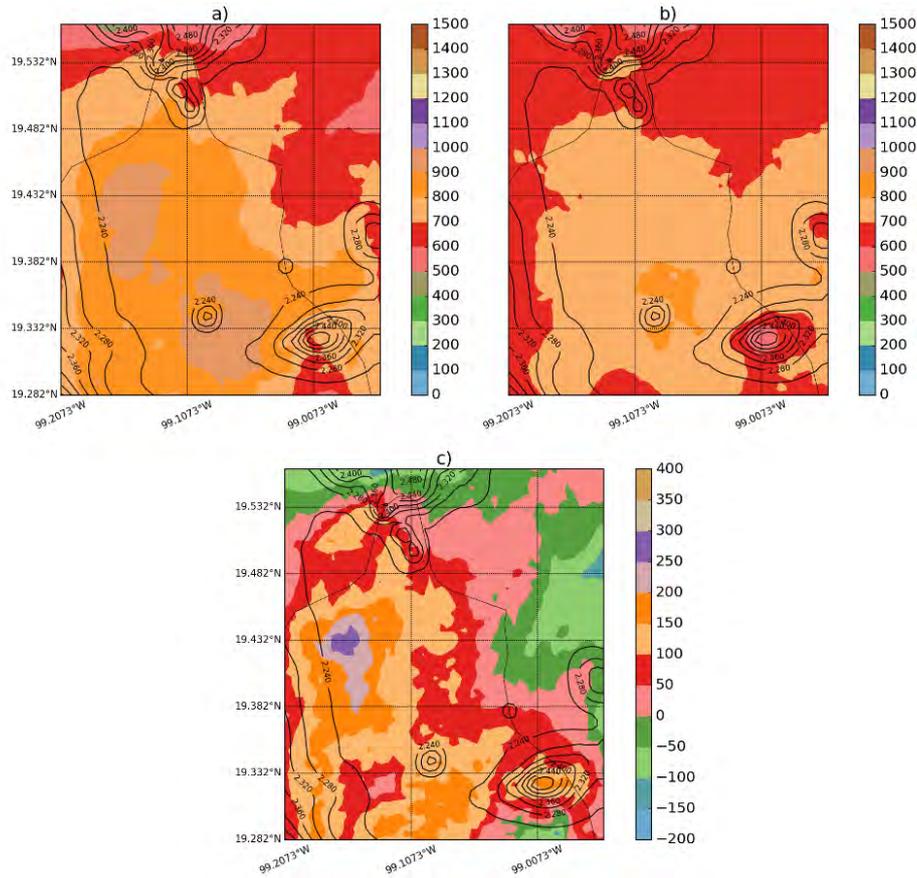


Figura 4.11. Comportamiento promedio horario diurno de la PBLH (m) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) $uWRF - WRF$.

4.1.4. Corte transversal de la velocidad del viento.

Se realizaron cortes longitudinales y latitudinales con el objetivo de analizar el comportamiento de la velocidad del viento con la altura, principalmente cerca de la superficie, y para distinguir la influencia de las clases urbanas sobre esta magnitud. El primer corte fue realizado en la dirección Sur-Norte sobre la longitud $-99.11^{\circ}W$ desde la latitud $19.28^{\circ}N$ hasta los $19.55^{\circ}N$, mientras que el latitudinal (dirección Oeste-Este) se realizó sobre la latitud $19.45^{\circ}N$ entre las longitudes $-99.21^{\circ}W$ y $-99.02^{\circ}W$. Como el comportamiento de esta variable es diferente en el día y en la noche, estos análisis fueron realizados en las dos horas representativas de estos ciclos para el periodo seco y lluvioso. Las horas de modelación fueron a las 13:00 LST del primer día

simulado (21/01 y 14/08) y las 00:00 LST del segundo día simulado (22/01 y 15/08). A continuación, se describe este análisis por cada corte para cada periodo y para cada hora seleccionada.

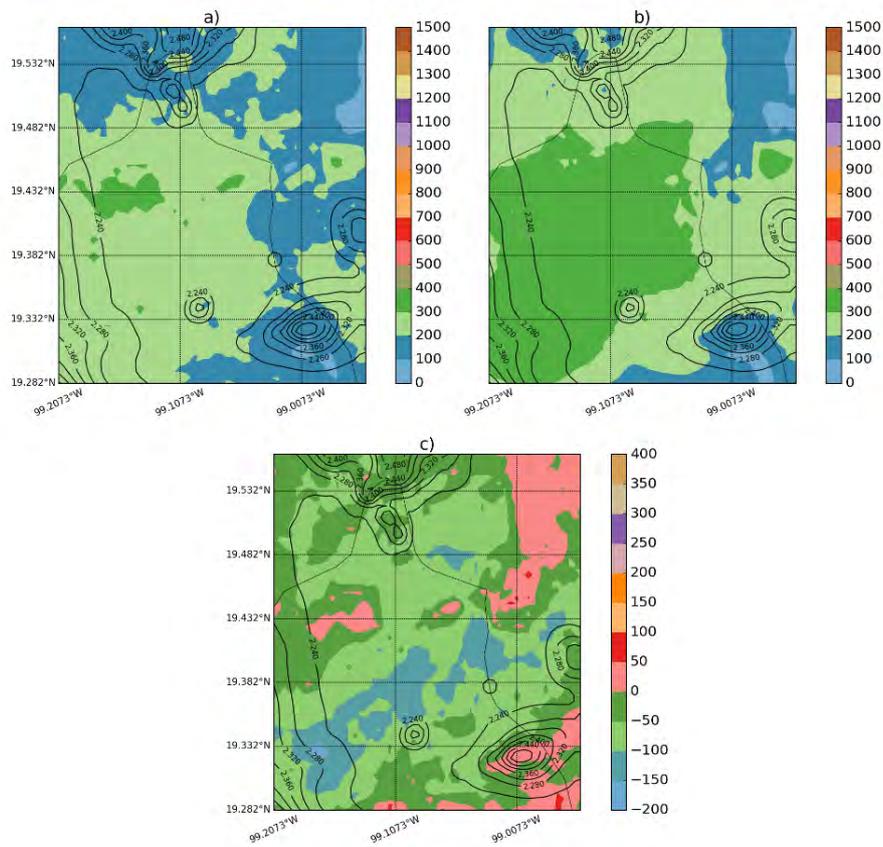


Figura 4.12. Comportamiento promedio horario nocturno de la PBLH (m) en el periodo lluvioso, a) uWRF, b) WRF, c) uWRF - WRF.

Los resultados de la simulación para el periodo seco usando uWRF (véase Figura 4.13 (a)) a las 13:00 LST en el corte longitudinal muestran capas de velocidades mínimas con características heterogéneas en comparación con las observadas en WRF. Es visible una capa poco profunda sobre la superficie y encima otra con velocidades superiores. Este resultado es consistente con lo observado por Martilli et al. (2002), donde explica que este comportamiento se debe a la competencia de tres fuerzas: el arrastre inducido por la superficie (el cual es verticalmente propagado por el transporte turbulento de momento), el gradiente de presión (resultado de las altas temperaturas sobre la ciudad) y la advección inducida por el flujo sinóptico. Esto conduce a la presencia de bajas velocidades del viento horizontal cerca de la superficie donde el efecto del arrastre es más importante y velocidades superiores encima de esta capa donde el gradiente de presión y la advección presentan el mismo signo.

En el sector derecho (Norte) de ambas figuras (véase Figura 4.13 a y b) se observa una zona de velocidades de 2 a 4 m/s. uWRF representa esta área a partir de los primeros metros encima de

la superficie, mientras que WRF desde aproximadamente 200 m más arriba. Este patrón se debe a la presencia en esta área de zonas montañosas que se ubican al norte de la ciudad que en combinación con el viento sinóptico predominante del N aumentan la intensidad del flujo.

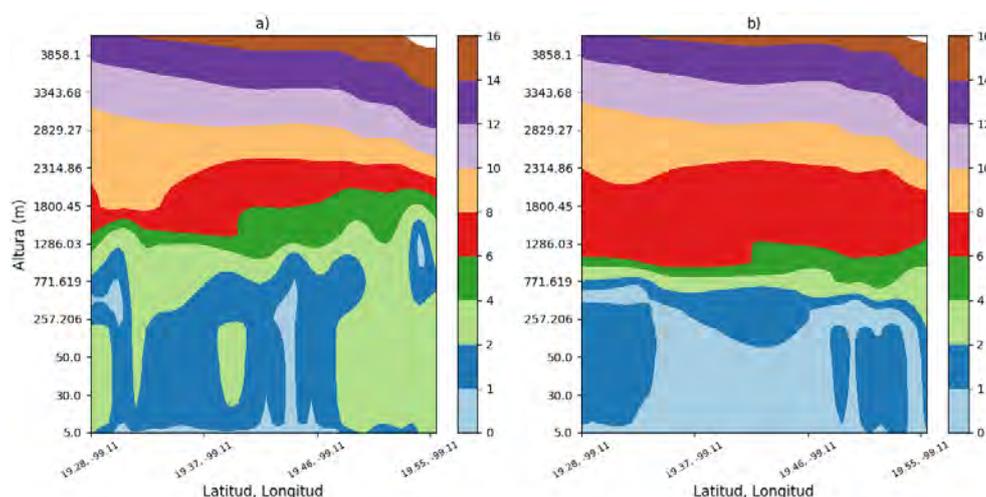


Figura 4.13. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 21 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.

Los resultados para la simulación de las 00:00 LST en el periodo seco revelan un comportamiento diferente para uWRF y WRF. Es visible en la Figura 4.14 (a) una capa de velocidades mínimas (hasta 1 m/s) en la porción izquierda y central, que corresponde con la parte central y sur del dominio extendiéndose hasta aproximadamente 20m sobre la superficie. Por lo que, el incremento de la velocidad del viento observado en otros estudios (ejemplo (R. D. Bornstein & Johnson, 1977; R. Bornstein, 1987)), no es posible apreciarla en esta investigación para todas las latitudes pertenecientes a esta sección transversal, debido probablemente a que la intensidad de la UHI nocturna no es lo suficientemente fuerte para eclipsar la fuerza de arrastre inducida por la superficie urbana; este resultado también fue encontrado por Martilli et al. (2002).

Para el periodo lluvioso, a las 13:00 LST, aunque los estratos de velocidades presentaron diferentes extensiones, se puede observar que cerca de la superficie la capa de velocidades en uWRF es más intensa que en WRF, y que existe un rápido incremento de la velocidad del viento en la vertical (véase Figura 4.15 (a) y (b)). Esto se debe a la mayor intensidad del efecto UHI durante el día en uWRF.

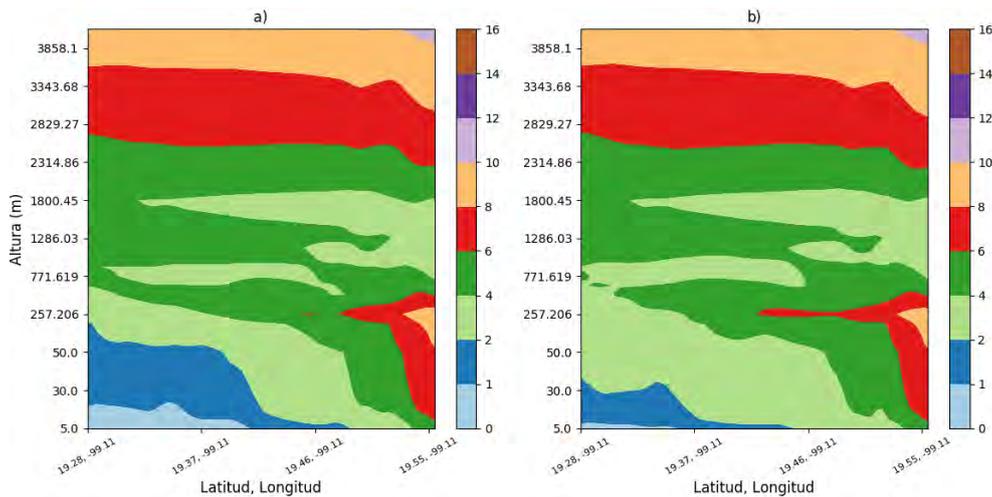


Figura 4.14. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00 h del 22 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.

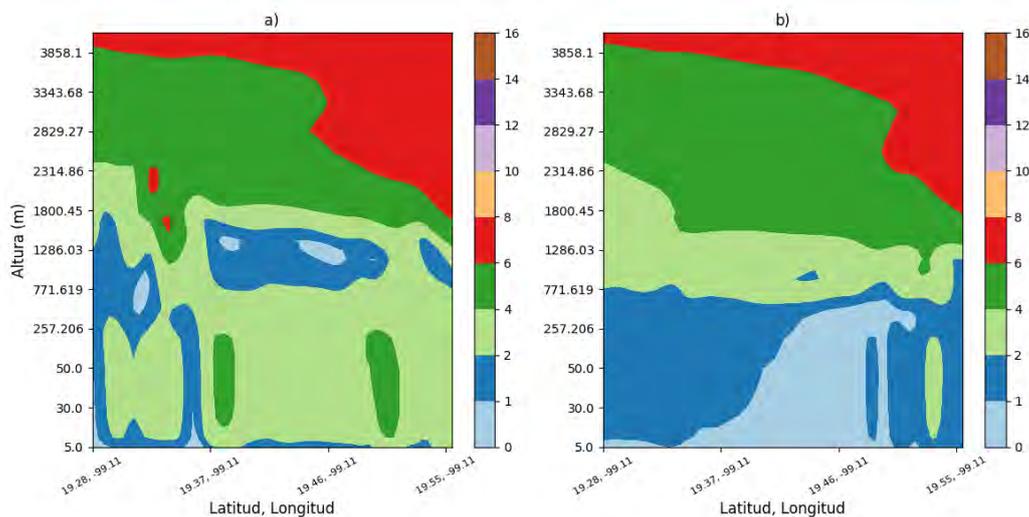


Figura 4.15. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 14 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.

En el ciclo nocturno para el corte longitudinal en el periodo lluvioso, se observa una capa poco profunda cercana a la superficie con intensidades de entre 1 y 2 m/s seguida de un aumento de velocidades de hasta 6 m/s. Para uWRF (véase Figura 4.16 (a)) esta capa presenta mayor extensión horizontal en comparación con el WRF (véase Figura 4.16 b), mientras que los estratos con magnitudes entre los 2 y 6 m/s presentan entre ambas simulaciones diferencias en sus extensiones verticales.

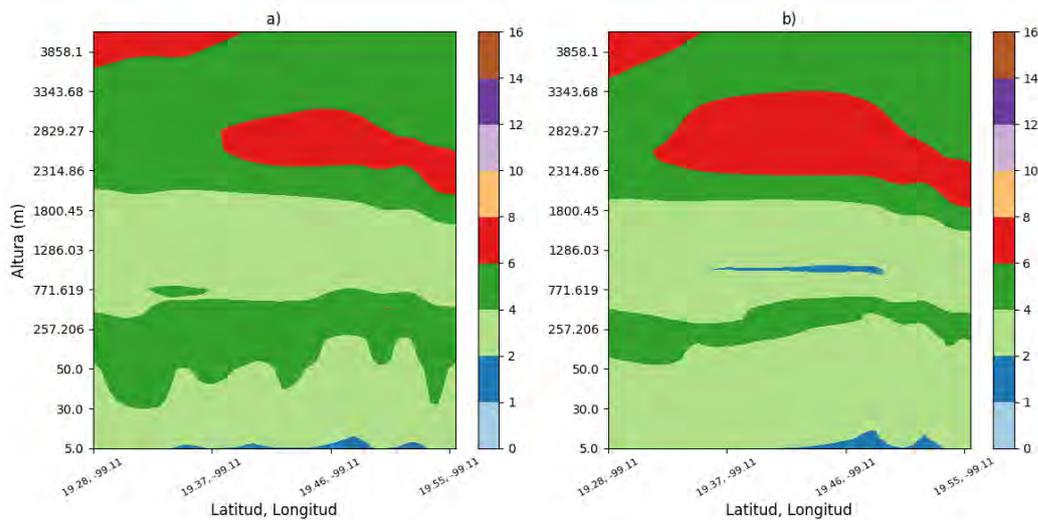


Figura 4.16. Sección longitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00 h del 15 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.

Los resultados del análisis para el corte latitudinal son diferentes, debido a que el flujo sinóptico predominante es perpendicular a esta sección. En el periodo seco diurno, como se observa en la Figura 4.17 (a), el estrato de menores velocidades (hasta 1 m/s) presenta dos núcleos principales en la porción izquierda y central de la imagen intercalándose una capa de velocidades mayores. Dicha zona coincide con el área de mayores diferencias entre las clasificaciones de cobertura de suelo entre uWRF y WRF (observadas en las secciones 4.1.1 - 4.1.3). Para entender el comportamiento en esta área es necesario un análisis más detallado con mayor resolución o con el uso de modelos computacionales de flujo dinámico (CFD, por sus siglas en inglés). WRF no muestra este patrón (véase Figura 4.17 (b)), sino una capa de velocidades menores más homogénea, con un espesor menor al oeste del dominio coincidiendo con la presencia de elevaciones montañosas. Lo anterior, en combinación con el viento sinóptico predominante perpendicular a la orografía produce este patrón. Aunque uWRF también representa este comportamiento, la extensión de esta capa es menor debido a que, además de las elevaciones del relieve, también, existen diferentes clases de cobertura del suelo que WRF no reconoce.

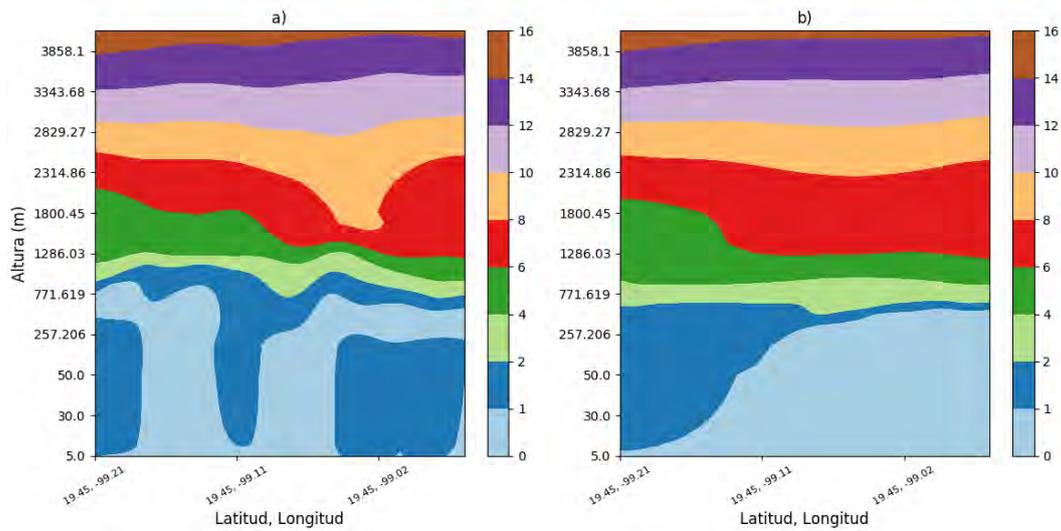


Figura 4.17. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 21 de enero (periodo seco), a) *uWRF*, b) *WRF*.

El comportamiento en el corte latitudinal de la velocidad del viento en el periodo lluvioso diurno en la simulación urbana presentó marcadas diferencias con su homólogo del periodo seco (véase Figura 4.18 (a)). Esto se debe a que la capa de velocidades de hasta 1m/s es prácticamente imperceptible y la correspondiente a los valores entre 1 y 2 m/s presenta menor espesor que el observado en el periodo seco, pues el estrato predominante en todo el corte fue de 2 a 4 m/s, que se extendió desde muy cerca de la superficie hasta aproximadamente los 1200 m. Estas diferencias están dadas por la intensidad de la UHI pues en este periodo se observaron temperaturas más elevadas que proporcionaron un mayor gradiente de presión y por tanto un estrato de velocidades más intensas y de mayor espesor (como fue explicado anteriormente).

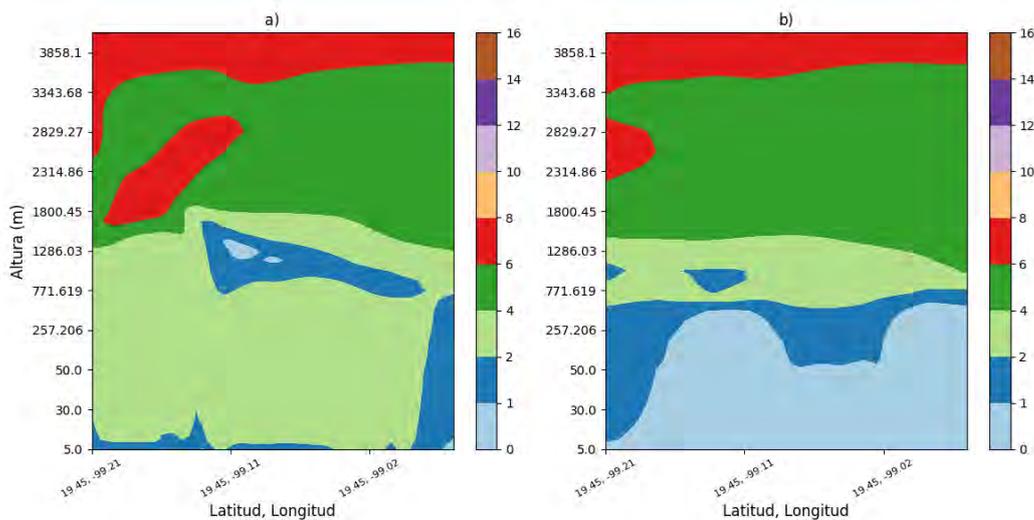


Figura 4.18. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 13h del 14 de agosto (periodo lluvioso), a) *uWRF*, b) *WRF*.

En el corte latitudinal del horario nocturno para ambos periodos es posible observar velocidades entre 2-6 m/s cerca de la superficie para ambas simulaciones (véase Figura 4.19 y Figura 4.20), aunque con algunas diferencias. El uWRF para ambos periodos (véase Figura 4.19 (a) y Figura 4.20 (a)) muestra que en la región central del corte vertical se manifiesta una fina capa muy cerca de la superficie con intensidades entre 1-2 m/s, y sobre esta última es visible otro estrato de velocidades entre 2-4 m/s. La diferencia más significativa entre ambos periodos es que, en el periodo seco se observa una región de velocidades entre 6 y 8 m/s en zonas donde en el periodo lluvioso no se observa, las cuales en algunos casos se manifiestan muy cerca de la superficie (principalmente en el Este), esta diferencia está dada por la dirección del viento sinóptico predominante y la intensidad de la PBLH en el periodo lluvioso.

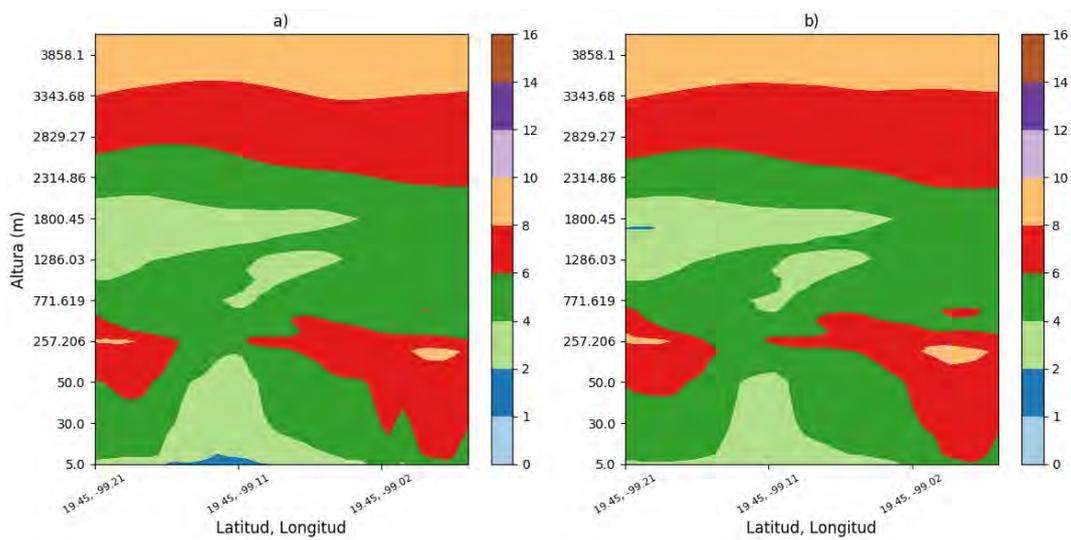


Figura 4.19. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00h del 22 de enero (periodo seco), a) uWRF, b) WRF.

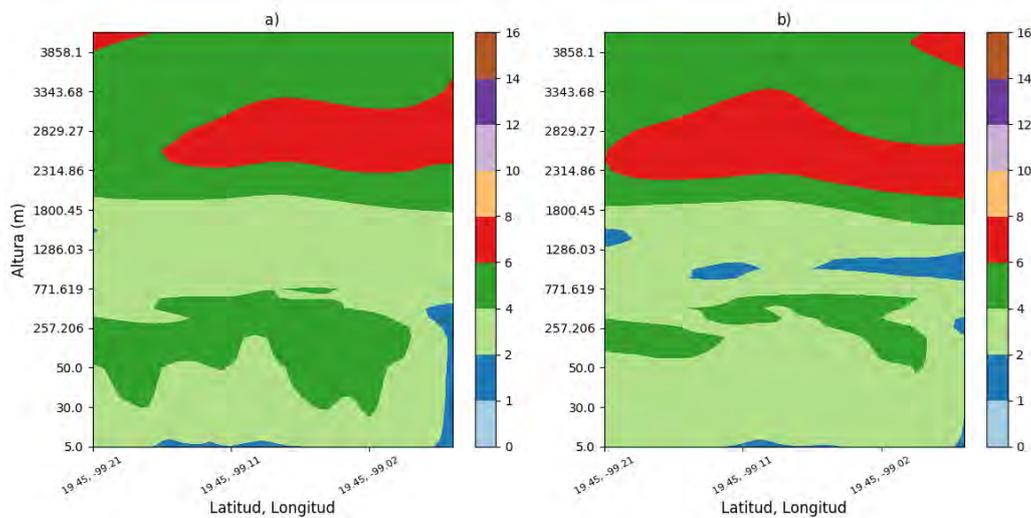


Figura 4.20. Sección latitudinal vertical de la velocidad del viento (m/s) a las 00h del 15 de agosto (periodo lluvioso), a) uWRF, b) WRF.

4.2. Comparación de los resultados de la modelación con las observaciones.

En el presente epígrafe se muestran para ambos periodos la comparación de las variables de interés simuladas por uWRF y el WRF con las observaciones. El análisis se realizó a partir de la hora 10 de simulación, pues las primeras horas son consideradas el periodo de autoajuste del modelo.

4.2.1. Temperatura.

La figura 4.21 muestra que en el periodo seco uWRF se acerca más a las observaciones en comparación con WRF. El comportamiento de ambas simulaciones durante la noche es muy similar y que las mayores diferencias son apreciadas durante el día cuando la radiación solar comienza a hacer efecto. Precisamente debido a este factor es que se observa un desfase entre ambos modelos, y entre cada uno de ellos y las observaciones. En el periodo lluvioso (véase Figura 4.22), aunque nuevamente el uWRF se acerca más a las observaciones que WRF tradicional (especialmente durante el día), se observó una mayor separación de más de 2 grados Kelvin entre el uWRF y las observaciones.

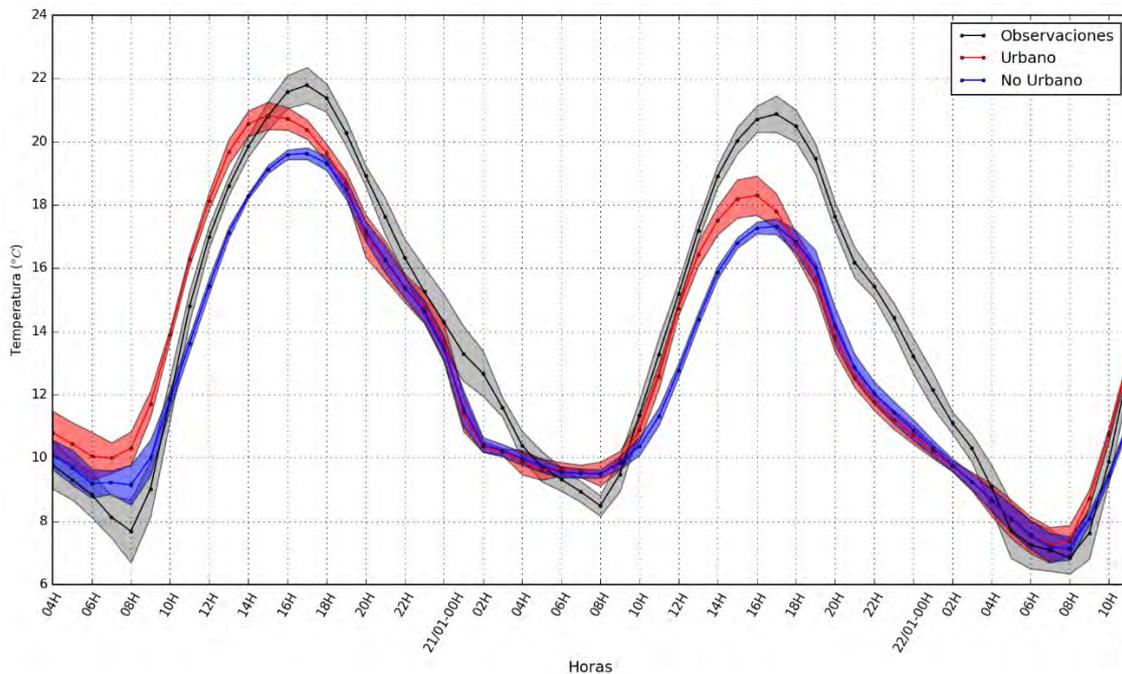


Figura 4.21. Ciclo temporal de la Temperatura (K) en el periodo seco, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).

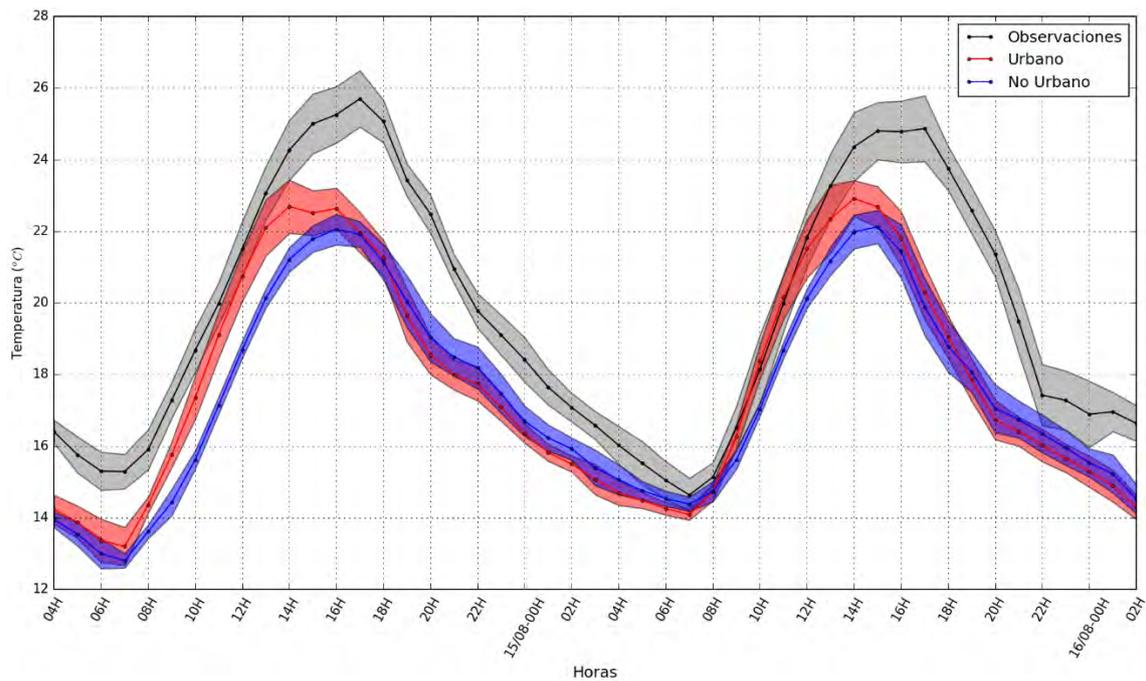


Figura 4.22. Ciclo temporal de la Temperatura (K) en el periodo lluvioso, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).

4.2.2. Velocidad del viento a 10m.

La figura 4.23 muestra las curvas de la velocidad del viento para el periodo seco durante las horas simuladas en las coordenadas de las estaciones de medición. Para esta variable las diferencias entre el uWRF y las observaciones siguen siendo menores que aquellas observadas entre estas últimas y el WRF tradicional. De forma general las mayores diferencias se observan en horas de la noche. El periodo lluvioso mostró un comportamiento similar (véase Figura 4.24), la mayor parte del tiempo simulado el uWRF se mostró más cercano a la curva de valores observados en comparación con WRF. De forma general, para ambos periodos las simulaciones representaron de forma adecuada el comportamiento de la variable, sin embargo, fue posible observar un mejor acercamiento a las mediciones por los resultados simulados en uWRF.

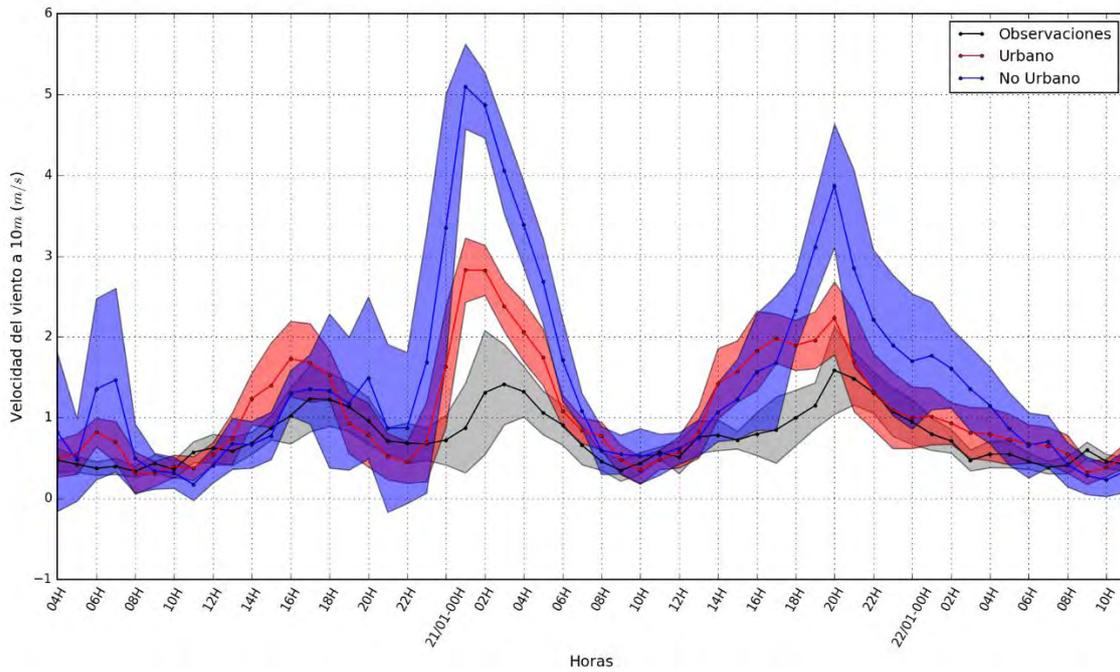


Figura 4.23. Ciclo temporal de la velocidad del viento en el periodo seco, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).

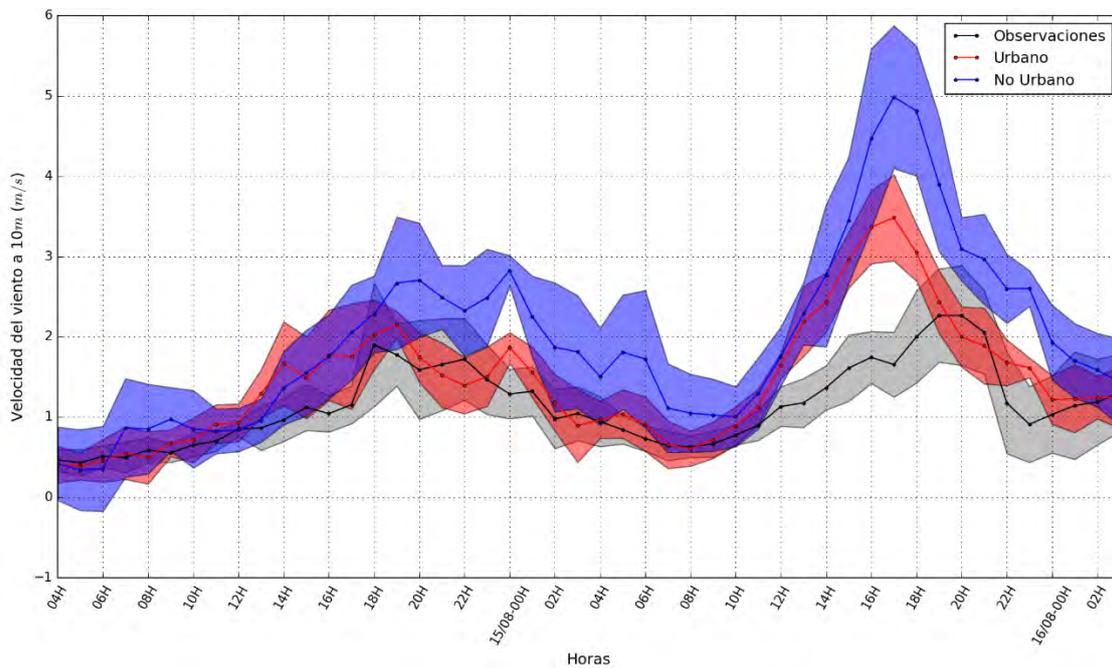


Figura 4.24. Ciclo temporal de la velocidad del viento en el periodo lluvioso, observaciones (línea negra), uWRF (línea roja), WRF (línea azul). Las zonas sombreadas representan la desviación estándar de las observaciones (sombra gris), uWRF (sombra roja), WRF (sombra azul).

4.2.3. PBLH.

La comparación de esta variable fue realizada a partir de datos de radiosondeos realizados diariamente desde un solo punto en el dominio (Tacubaya). Estas mediciones son tomadas a las

06:00H y a las 18:00H en hora local, y en el periodo lluvioso sólo existió la disponibilidad de los datos de las 06:00H. La estimación de la altura de la PBL a partir de este tipo de datos fue realizada por métodos subjetivos, descritos por Seibert et al. (2000), tomándose los perfiles de temperatura y de viento en la parte baja de la atmósfera. Es conocido que todos los métodos (y en especial los subjetivos) que estiman la altura de la PBL a partir de estas fuentes presentan un alto grado de incertidumbre (Russell et al., 1974) y los mayores problemas ocurren bajo condiciones estables o neutrales (nocturna).

En la figura 4.25 se puede observar este análisis para el periodo seco. Se puede observar que el comportamiento entre las simulaciones es similar; sin embargo, no siempre coinciden con la estimación realizada a partir de los radiosondeos. De forma general, las simulaciones muestran un comportamiento típico con alturas que varían desde alrededor de los 2000 m en el máximo diurno hasta muy cerca de la superficie en las horas nocturnas.

En el periodo lluvioso (véase Figura 4.26) el comportamiento es muy similar al observado en el periodo seco, las simulaciones se acercan a la estimación a partir de los datos de sondeo (excepto para la primera medición), y la mayor diferencia se puede observar entre las 12 y 18 H del día 14 de agosto donde el uWRF simula alturas de hasta 2000m mientras que el WRF no rebasa los 1500m.

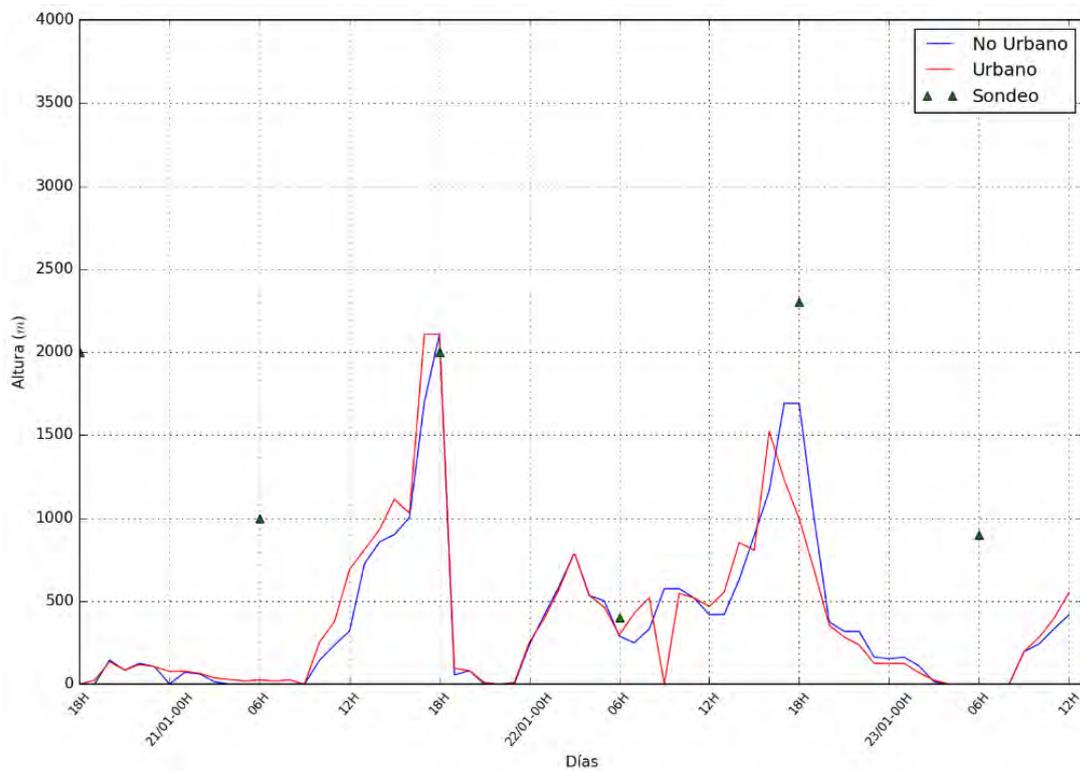


Figura 4.25. Evolución de la PBLH periodo seco, observaciones (triángulos verdes), uWRF (línea roja), WRF (línea azul).

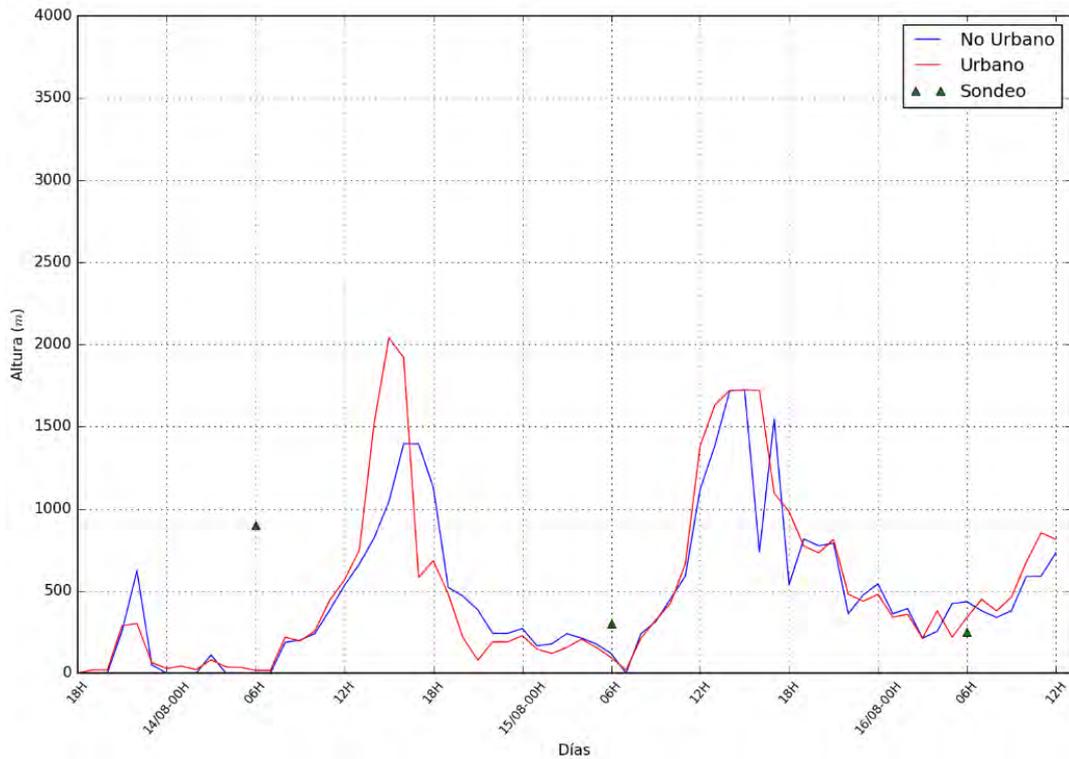


Figura 4.26. Evolución de la PBLH periodo seco, observaciones (triángulos verdes), uWRF (línea roja), WRF (línea azul).

4.3. Comparación estadística de la simulación y las observaciones.

En este epígrafe se analiza la concordancia de los resultados obtenidos en las simulaciones con respecto a las observaciones. Solamente son analizadas las variables temperatura y velocidad del viento, la PBLH no fue incluida debido al poco volumen de observaciones existente. En primer lugar, se muestran en una tabla los estadígrafos (Correlación, RMSE, MB) para todas las estaciones para la simulación urbana y no urbana, luego se expone un gráfico de barras con estos estadígrafos más el IOA para todas las estaciones, donde es posible analizar de forma general cual simulación es más acorde a las observaciones.

4.3.1. Temperatura.

En la tabla 4.1 se exhiben los resultados para el periodo seco, donde se observa que de todas las estaciones analizadas para ambas simulaciones la mejor concordancia fue con la estación UIZ. Las simulaciones se distanciaron de las observaciones para esa estación en 1.62 K y ambas presentaron correlaciones altas (por encima a 0.90), sin embargo, el WRF tradicional (No Urbano) subestimó más las observaciones que el uWRF.

Tabla 4.1. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la temperatura (K) para cada estación analizada durante el periodo seco.

		Urbano	No Urbano
GAM	RMSE	1,87	1,96
	MB	-0,69	-1,29
	Correlación	0,93	0,97
HGM	RMSE	1,73	2,19
	MB	-0,88	-1,68
	Correlación	0,95	0,96
MER	RMSE	1,70	1,73
	MB	-0,17	-1,13
	Correlación	0,93	0,97
NEZ	RMSE	2,01	2,02
	MB	-0,93	-1,57
	Correlación	0,92	0,98
SAG	RMSE	2,34	2,33
	MB	-1,16	-1,48
	Correlación	0,92	0,95
UAX	RMSE	1,82	2,06
	MB	-0,38	-0,98
	Correlación	0,94	0,97
UIZ	RMSE	1,62	1,62
	MB	-0,19	-0,92
	Correlación	0,94	0,98
XAL	RMSE	1,80	1,88
	MB	-0,50	-1,01
	Correlación	0,93	0,95

De forma general, se observa para el periodo seco un mejor comportamiento de las simulaciones del uWRF (véase Figura 4.27), pues presentó valores que demuestran una mejor validación de las observaciones (RMSE y BIAS), particularmente el BIAS, donde se observa que el uWRF subestimó en menor medida las observaciones.

En el periodo lluvioso, por lo general todas las estaciones estuvieron más alejadas de las observaciones en comparación con el periodo seco (véase Tabla 4.2), pues el RMSE se comportó por encima de 2 K para 9 de las estaciones involucradas. La estación NEZ presentó, para ambas simulaciones, buenas correlaciones (por encima de 0.90), aunque el uWRF exhibió un RMSE más cercano a cero, además se observó una menor subestimación de las observaciones en comparación con el WRF.

De forma general, también para el periodo lluvioso, las simulaciones del uWRF representan mejor las observaciones que las del WRF; esto se observa principalmente en las diferencias que se muestran en la figura 4.28 donde la mayoría de los estadígrafos presentaron valores favorables a la simulación urbana.

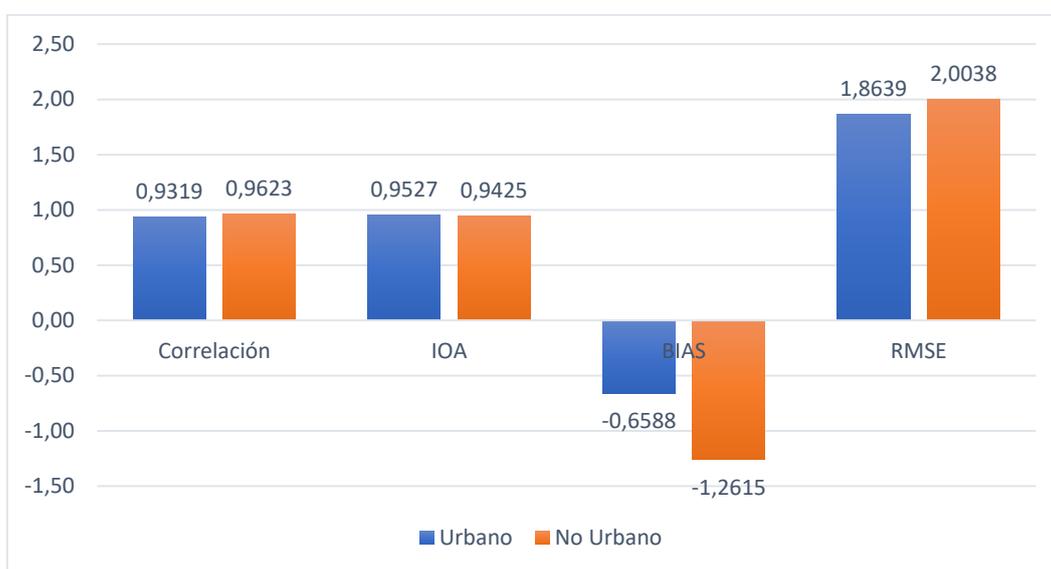


Figura 4.27. Resumen estadístico de las simulaciones de la temperatura para el periodo seco.

Tabla 4.2. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la temperatura (K) para cada estación analizada durante el periodo lluvioso.

		Urbano	No Urbano
GAM	RMSE	2,67	2,91
	MB	-2,30	-2,61
	Correlación	0,92	0,95
HGM	RMSE	2,32	2,65
	MB	-1,93	-2,38
	Correlación	0,93	0,95
MER	RMSE	2,26	2,57
	MB	-1,85	-2,32

	Correlación	0,93	0,96
NEZ	RMSE	1,88	1,97
	MB	-1,18	-1,47
	Correlación	0,91	0,94
PED	RMSE	2,49	2,59
	MB	-2,14	-2,24
	Correlación	0,94	0,95
SAG	RMSE	3,66	3,82
	MB	-3,32	-3,54
	Correlación	0,92	0,95
UAX	RMSE	2,50	2,81
	MB	-2,04	-2,41
	Correlación	0,93	0,95
UIZ	RMSE	2,03	2,31
	MB	-1,59	-1,99
	Correlación	0,93	0,95
XAL	RMSE	2,07	2,21
	MB	-1,66	-1,93
	Correlación	0,92	0,94

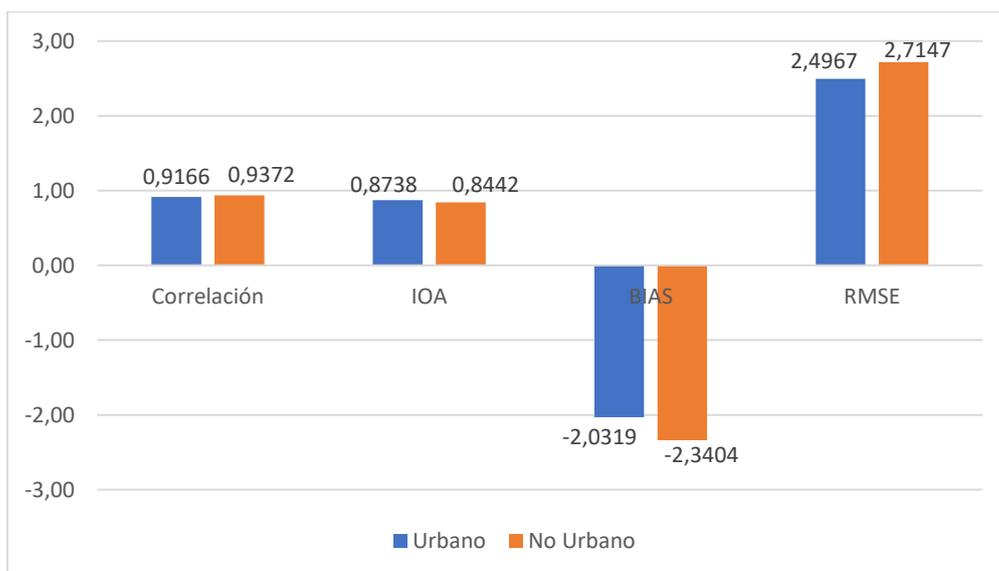


Figura 4.28. Resumen de los estadígrafos de las simulaciones de la temperatura para el periodo lluvioso.

4.3.2. Velocidad del viento a 10 m.

En la tabla 4.3 se muestran los estadígrafos referentes a las simulaciones para el periodo seco. Para la simulación urbana, la estación para la cual el modelo uWRF presentó menor RMSE fue UIZ con un valor de 0.54 m/s mientras que este mismo indicador para la simulación no urbana en esta estación presentó un valor de 1.29 m/s, por lo que los resultados del uWRF presentan una menor dispersión con respecto a las mediciones en esta estación. Para la simulación no urbana, la estación para la cual el modelo WRF presentó menor RMSE fue XAL con un valor de 1.09 m/s, mientras que, para la urbana (uWRF) para esta misma estación este estadígrafo fue de 0.61 m/s, comprobándose nuevamente que los resultados del uWRF presentaron una menor dispersión que los simulados por el WRF tradicional. En el caso del MB para esta última estación ambos modelos presentaron el mejor valor, el uWRF sobrestimó la velocidad del viento solamente en 0.02 mientras que el WRF lo hizo en 0.50.

Tabla 4.3. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la velocidad del viento (m/s) para cada estación analizada durante el periodo seco.

		Urbano	No Urbano
GAM	RMSE	0,67	1,37
	MB	0,31	0,60
	Correlación	0,55	0,25
HGM	RMSE	0,65	1,54
	MB	0,36	0,93
	Correlación	0,66	0,61
MER	RMSE	0,62	1,44
	MB	0,23	0,62
	Correlación	0,63	0,52
NEZ	RMSE	0,90	1,33
	MB	0,57	0,69
	Correlación	0,60	0,51
SAG	RMSE	0,81	1,98
	MB	0,61	1,36
	Correlación	0,80	0,76
UAX	RMSE	0,70	1,32
	MB	0,28	0,75
	Correlación	0,45	0,41

UIZ	RMSE	0,54	1,29
	MB	0,18	0,72
	Correlación	0,59	0,55
XAL	RMSE	0,61	1,09
	MB	0,02	0,50
	Correlación	0,63	0,63

De forma general, el comportamiento del uWRF fue mejor que el WRF tradicional, pues para todos los estadígrafos analizados la simulación urbana presentó mejores valores. Particularmente, es posible observar en la figura 4.29, que los resultados de la velocidad del viento obtenidos por el WRF presentaron una mayor dispersión para todas las estaciones analizadas en todo el periodo seco en comparación con el los obtenidos por el uWRF; además se comprobó que los resultados del uWRF presentaron un menor sesgo con respecto a las observaciones por lo que WRF tradicional tuvo la tendencia a sobrestimar en mayor medida las mediciones.

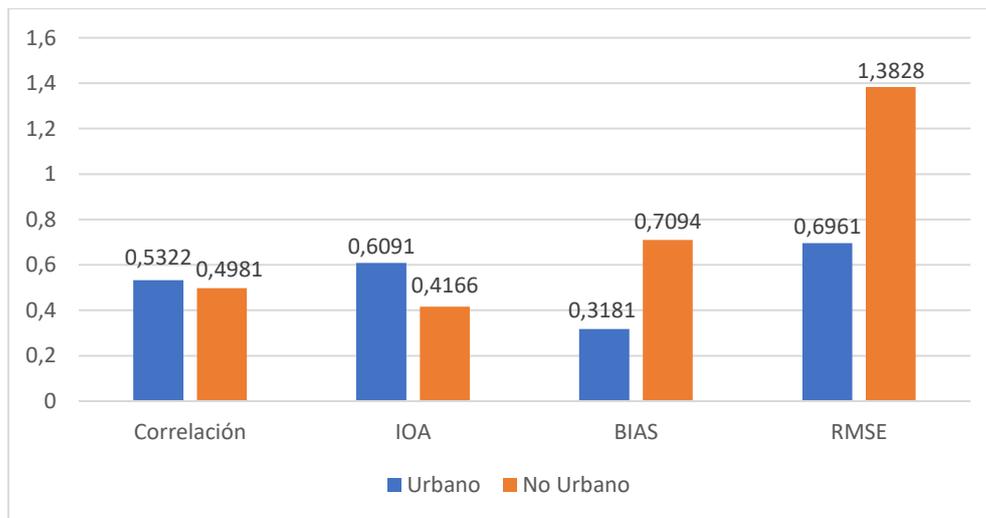


Figura 4.29. Resumen de los estadígrafos de las simulaciones de la velocidad del viento para el periodo seco.

En el periodo lluvioso (véase Tabla 4.4), la estación para la cual el modelo uWRF y WRF presentaron menor RMSE fue UIZ con un valor de 0.59 m/s y 1.02 m/s respectivamente, manifestándose así la menor dispersión con respecto a las observaciones para los resultados correspondientes a la simulación urbana. En cuanto al MB, esta última estación fue la que presentó menor valor (0.12) para la simulación urbana, que en comparación con el WRF esta medida fue menor. De manera general para este periodo, como se muestra en la figura 4.30 el uWRF mostró una mejor concordancia con respecto a todas las estaciones, pues presentó menores medidas de dispersión y mayor índice de concordancia. Es válido destacar que, aunque

se observa para ambos periodos y por ambas simulaciones una correlación baja (cercana a 0.50), este es un valor aceptable para esta variable.

Tabla 4.4. Comparación estadística de las simulaciones (urbanas y no urbanas) y las observaciones de la velocidad del viento (m/s) para cada estación analizada durante el periodo lluvioso.

		Urbano	No Urbano
GAM	RMSE	0,67	1,08
	MB	0,28	0,61
	Correlación	0,72	0,74
HGM	RMSE	0,77	1,48
	MB	0,49	1,18
	Correlación	0,46	0,64
MER	RMSE	0,74	1,27
	MB	0,30	0,83
	Correlación	0,60	0,67
NEZ	RMSE	0,73	1,24
	MB	0,40	0,68
	Correlación	0,80	0,76
PED	RMSE	0,81	1,25
	MB	0,53	0,94
	Correlación	0,72	0,80
SAG	RMSE	0,76	1,75
	MB	0,55	1,39
	Correlación	0,60	0,60
UAX	RMSE	0,60	1,09
	MB	0,32	0,79
	Correlación	0,80	0,67
UIZ	RMSE	0,59	1,02
	MB	0,12	0,69
	Correlación	0,70	0,73
XAL	RMSE	0,82	0,99
	MB	-0,31	0,19
	Correlación	0,72	0,75

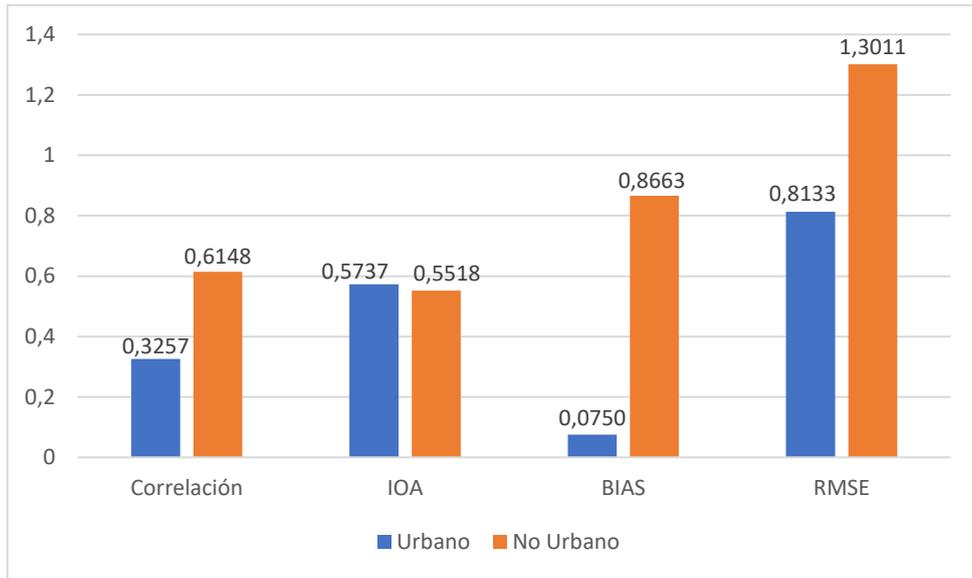


Figura 4.30. Resumen de los estadígrafos de las simulaciones de la velocidad del viento para el periodo lluvioso.

5. Conclusiones.

- Se implementó el sistema de modelación integrado WRF/urbano, con una clasificación de 10 categorías urbanas, siendo éste el primer esquema de modelación atmosférica para la CDMX que reconoce diversas estructuras urbanas.
- A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron las siguientes conclusiones acerca de las variables de interés en su caracterización y distribución espacial:
 - Temperatura.
 - La UHI diurna para ambos periodos (enero y agosto) es reconocida por uWRF, con intensidades aproximadas de hasta 3°C. Este efecto en el periodo lluvioso presenta un patrón más extenso e intenso que el encontrado para el periodo seco. El WRF sólo representó este fenómeno en el periodo lluvioso, pero con una intensidad menor que la reportada por uWRF.
 - El efecto de UHI nocturna para ambos periodos es representado por uWRF y WRF, y en ambos casos, sus intensidades fueron menores que las reportadas en el efecto diurno. El uWRF simuló este efecto para el periodo seco con una mayor amplitud que la encontrada por WRF.
 - Velocidad del viento.
 - Periodo Seco.
 - Durante el ciclo diurno, se observaron intensidades de aproximadamente hasta 1.1 m/s. Se constató que uWRF toma en cuenta las diferencias morfológicas al simular la velocidad del viento en dependencia de la distribución espacial de estos factores. Además, sólo uWRF apreció una capa heterogénea y poco profunda en el perfil vertical del viento, con patrones intercalados de velocidades superiores de hasta 2 m/s al oeste y al centro del dominio que coincidieron con el área de mayores diferencias positivas observadas en el comportamiento espacial de las variables de interés.
 - Durante la noche, se apreció de forma general en todo el dominio, un incremento en las velocidades del viento con respecto a las diurnas, siendo las intensidades reportadas por uWRF inferiores al WRF en la mayor parte del dominio. Sin

embargo, en el corte vertical se registraron por ambos modelos patrones de velocidad entre 6 y 8 m/s cercanos a la superficie, localizados al este del dominio.

- Periodo lluvioso.
 - Durante el ciclo diurno, se observaron por parte de uWRF intensidades entre 0.6 y 1.7 m/s en el campo horizontal a 10 m de la superficie, siendo inferior a las simuladas por WRF sobre las áreas urbanas. Sin embargo, el perfil vertical muestra para uWRF un mayor incremento de velocidades con la altura en comparación con WRF.
 - Durante la noche, no se registró el incremento reportado en otros estudios de las velocidades del viento a 10 m de la superficie por parte de uWRF. En cuanto a la distribución vertical se aprecia un comportamiento similar al periodo seco, destacando que en horas de la noche uWRF muestra una mayor extensión horizontal de la capa de velocidades mínimas cercana a la superficie.
- Altura de la PBL.
 - Para el ciclo diurno en ambos periodos, uWRF pronosticó mayores alturas de la PBL en aproximadamente 200 m en comparación con WRF en gran parte del dominio.
 - Para el ciclo nocturno ambos modelos simularon alturas de PBL con pocas diferencias entre ellas; sin embargo, en el periodo seco uWRF representó una PBL más profunda al oeste del dominio, mientras que en el periodo lluvioso este comportamiento se observó en las zonas rurales.
- La evaluación de los resultados de las simulaciones realizadas permitió concluir que:
 - Temperatura.
 - Para ambos periodos las simulaciones de uWRF se acercaron más a las observaciones principalmente durante las horas de la mañana y en sus valores extremos. En particular para el periodo seco, aunque ambos modelos subestimaron los valores de la temperatura, uWRF lo hizo en menor magnitud. Para el caso del periodo lluvioso, uWRF se aproximó

más a las observaciones en comparación con WRF como refleja el RMSE.

- Velocidad del Viento.
 - Para ambos periodos los resultados de uWRF presentaron un mejor ajuste con respecto a las observaciones, en especial en la noche, donde se registraron los valores extremos, ambos modelos sobrestimaron las observaciones, pero uWRF lo redujo a la mitad en comparación con WRF. Para ambos periodos, uWRF presentó con respecto a WRF errores más cercanos a cero en comparación con las observaciones, y en particular, en el caso del periodo lluvioso, uWRF sobrestimó en menor medida las observaciones que WRF.

6. Recomendaciones.

- Ampliar el dominio de estudio para la Zona Metropolitana del Valle de México en dependencia de la disponibilidad de datos de clasificaciones urbanas.
- Realizar simulaciones en otros periodos del año, en particular durante eventos de contingencia ambiental.
- Comparar los resultados obtenidos con una estación ubicada en zonas rurales, en particular la UHI.
- Emplear métodos más precisos de estimación de altura de la PBL a partir de las mediciones para compararlos con los resultados alcanzados.
- Aprovechar en mayor medida la disponibilidad de los datos del LIDAR en CDMX para el cálculo de parámetros urbanos.
- Implementar el sistema uWRF-Chem para conocer el comportamiento de la calidad del aire sobre la CDMX.
- Acoplar las salidas de uWRF a modelos CDF para investigar a detalle las principales zonas identificadas por uWRF donde se modifica el flujo atmosférico.

7. Bibliografia.

- Bechtel, B., Alexander, P. J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., ... Stewart, I. (2015). Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199–219.
- Best, M. J., & Grimmond, C. S. B. (2015). Key conclusions of the first international urban land surface model comparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(5), 805–819.
- Bornstein, R. (1987). Mean diurnal circulation and thermodynamic evolution of urban boundary layers. *Modeling the urban boundary layer*, 53–93.
- Bornstein, R. D., & Johnson, D. S. (1977). Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment (1967)*, 11(7), 597–604.
- Bougeault, P., & Lacarrere, P. (1989). Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta–Scale Model. *Monthly Weather Review*, 117(8), 1872–1890.
- Britter, R. E., & Hanna, S. R. (2003). Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 469–496.
- Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G., & Bechtel, B. (2016). WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*, 17, 116–134.
- Brutsaert, W. (2013). *Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- C. S. Grimmond. (2006). Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1–3), 3–22.
- Cermak, J. E., Davenport, A. G., Plate, E. J., & Viegas, D. X. (2013). *Wind climate in cities* (Vol. 277). Springer Science & Business Media. p.96.

- Chen, F., Kusaka, H., Tewari, M., Bao, J. W., & Hirakuchi, H. (2004). Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the Greater Houston area. En Fifth Symposium on the Urban Environment (pp. 9–11).
- Chen, Fei, Bornstein, R., Grimmond, S., Li, J., Liang, X., Martilli, A., ... Wang, Y. (2012). Research priorities in observing and modeling urban weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(11), 1725–1728.
- Chen, Fei, & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569–585.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S.(2011). The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273–288.
- Cheng, Y., Canuto, V. M., & Howard, A. M. (2002). An improved model for the turbulent PBL. *Journal of the Atmospheric sciences*, 59(9), 1550–1565.
- Ching, J., Mills, G., See, L., Bechtel, B., Feddema, J., Hanna, A., ... others. (2015). The portal component, strategic perspectives and review of tactical plans for full implementation of WUDAPT. *Proceedings of the ICUC9. Meteo France, Toulouse, France*.
- Ching, Jason, See, L., Mills, G., Alexander, P., Bechtel, B., Feddema, J., ... others. (2014). WUDAPT: Facilitating advanced urban canopy modeling for weather, climate and air quality applications.

- Council, N. R., Studies, D. on E. and L., Climate, B. on A. S. and, & Needs, C. on U. M. S. the P., Defining the. (2012). *Urban Meteorology: Forecasting, Monitoring, and Meeting Users' Needs*. National Academies Press.
- Cox, W. (2015). Demographia World Urban Areas. *11th Annual Edition ed. St. Louis: Demographia*. Available: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>. Date of access, 30, 2015.
- Cui, Y. Y., & De Foy, B. (2012). Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *51*(5), 855–868.
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *46*(20), 3077–3107.
- Emmanuel, R., & Fernando, H. J. S. (2007). Urban heat islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. *Climate Research*, *34*(3), 241–251.
- Fernando, H. J. S. (2010). Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain. *Annual review of fluid mechanics*, *42*, 365–389.
- Fernando, H. J. S., Lee, S. M., Anderson, J., Princevac, M., Pardyjak, E., & Grossman-Clarke, S. (2001). Urban fluid mechanics: air circulation and contaminant dispersion in cities. *Environmental Fluid Mechanics*, *1*(1), 107–164.
- Foy, B. de, Zavala, M., Bei, N., & Molina, L. T. (2009). Evaluation of WRF mesoscale simulations and particle trajectory analysis for the MILAGRO field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *9*(13), 4419–4438.
- Fritz, S., McCallum, I., Schill, C., Perger, C., Grillmayer, R., Achard, F., ... Obersteiner, M. (2009). Geo-Wiki.Org: The Use of Crowdsourcing to Improve

Global Land Cover. *Remote Sensing*, 1(3), 345–354.

<https://doi.org/10.3390/rs1030345>

García-Reynoso, J. A. (2009). Influencia de la meteorología en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Tip. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 12(2)

<http://revistas.unam.mx/index.php/tip/article/view/43139>

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Beringer, J., ... others. (2011). Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International journal of climatology*, 31(2), 244–272.

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J. J., Belcher, S. E., ... others. (2010). The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. *Journal of applied meteorology and climatology*, 49(6), 1268–1292.

Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of applied meteorology*, 38(9), 1262–1292.

Grimmond, C. S. B., & Souch, C. (1994). Surface description for urban climate studies: a GIS based methodology. *Geocarto International*, 9(1), 47–59.

Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, 173(1), 83–88.

Guevara, M., Tena, C., Soret, A., Serradell, K., Guzmán, D., Retama, A., ... Mediavilla, A. (2017). An emission processing system for air quality modelling in the Mexico City metropolitan area: Evaluation and comparison of the MOBILE6.2-

- Mexico and MOVES-Mexico traffic emissions. *Science of The Total Environment*, 584, 882–900. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.135>
- Hamdi, R., & Schayes, G. (2007). Validation of Martilli's urban boundary layer scheme with measurements from two mid-latitude European cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(17), 4513–4526.
- Holt, T., & Pullen, J. (2007). Urban canopy modeling of the New York City metropolitan area: A comparison and validation of single-and multilayer parameterizations. *Monthly Weather Review*, 135(5), 1906–1930.
- Hong, S.-Y., & Lim, J.-O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc*, 42(2), 129–151.
- Jauregui, E. (1973). The Urban Climate of Mexico City. *Erdkunde*, 27(4), 298–307.
- Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821–3831.
- Jáuregui Ostos, E., & Luyando, E. (1992). Patrones de flujo de aire superficial y su relación con el transporte de contaminantes en el Valle de México. *Investigaciones geográficas*, (24), 51–78.
- Jazcilevich, A. D., García, A. R., & Ruíz-Suárez, L. G. (2003). A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. *Atmospheric Environment*, 37(2), 183–193.
- Jiang, X., Wiedinmyer, C., Chen, F., Yang, Z.-L., & Lo, J. C.-F. (2008). Predicted impacts of climate and land use change on surface ozone in the Houston, Texas, area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20).
- Kanda, M. (2007). Progress in Urban Meteorology: A Review. *気象集誌. 第2輯*, 85, 363–383.

- Kanda, M., Kawai, T., Kanega, M., Moriwaki, R., Narita, K., & Hagishima, A. (2005). A simple energy balance model for regular building arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, *116*(3), 423–443.
- Kondo, H., Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado, H., & Komiyama, H. (2005). Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance. *Boundary-Layer Meteorology*, *116*(3), 395–421.
- Kusaka, H., Chen, F., Tewari, M., Duda, M., Dudhia, J., Miya, Y., & Akimoto, Y. (2009). Performance of the WRF model as a high resolution regional climate model: model intercomparison study. *Proceedings of ICUC*, 7.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., & Kimura, F. (2001). A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, *101*(3), 329–358.
- Lee, S.-M., & Byun, D. W. (2004). CFD modeling of fine scale flow and transport in the Houston metropolitan area, Texas. En Fifth Conference on Urban Environment
https://ams.confex.com/ams/AFAPURBBIO/techprogram/paper_80519.htm
- LeMone, M. A., Chen, F., Tewari, M., Dudhia, J., Geerts, B., Miao, Q., ... Grossman, R. L. (2009). Simulating the IHOP_2002 Fair-Weather CBL with the WRF-ARW–Noah Modeling System. Part II: Structures from a Few Kilometers to 100 km across. *Monthly Weather Review*, *138*(3), 745–764.
<https://doi.org/10.1175/2009MWR3004.1>
- Lin, C.-Y., Chen, F., Huang, J. C., Chen, W.-C., Liou, Y.-A., Chen, W.-N., & Liu, S.-C. (2008). Urban heat island effect and its impact on boundary layer development

- and land–sea circulation over northern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 42(22), 5635–5649.
- Liu, Y., Chen, F., Warner, T., & Basara, J. (2006). Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the Joint Urban 2003 field project. *Journal of applied meteorology and climatology*, 45(7), 912–929.
- Louis, J.-F. (1979). A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 17(2), 187–202.
- Martilli, A. (2002). Numerical study of urban impact on boundary layer structure: Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture. *Journal of Applied Meteorology*, 41(12), 1247–1266.
- Martilli, A. (2007). Current research and future challenges in urban mesoscale modelling. *International journal of climatology*, 27(14), 1909–1918.
- Martilli, A., Clappier, A., & Rotach, M. W. (2002a). An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
- Martilli, A., Clappier, A., & Rotach, M. W. (2002). An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
- Martilli, A., & Santiago, J. L. (2009). How to use computational fluid dynamics models for urban canopy parameterizations. En *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas* (pp. 31–37). Springer.
- Masson, V. (2006). Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1–3), 35–45.

- Masson, V., Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (2002). Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities. *Journal of Applied Meteorology*, *41*(10), 1011–1026.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2)
- Masson, Valéry. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, *94*(3), 357–397.
- Miao, S., & Chen, F. (2008). Formation of horizontal convective rolls in urban areas. *Atmospheric Research*, *89*(3), 298–304.
- Miao, S., Chen, F., LeMone, M. A., Tewari, M., Li, Q., & Wang, Y. (2009). An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *48*(3), 484–501.
- Miao, S., Chen, F., Li, Q., & Fan, S. (2009). Impacts of urbanization on a summer heavy rainfall in Beijing. En *The seventh International Conference on Urban Climate: Proceeding (Vol. 29)*.
- Miao, S., Li, P., & Wang, X. (2009). Building morphological characteristics and their effect on the wind in Beijing. *Advances in Atmospheric Sciences*, *26*(6), 1115.
- Mills, G., Ching, J., See, L., Bechtel, B., & Foley, M. (2015). An introduction to the WUDAPT project. En *9th International Conference on Urban Climate, Toulouse*
http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/gd2-1-6521222_a.pdf
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *102*(D14), 16663–16682.

- Morales, W. V., Jazcilevich, A., Reynoso, A. G., Caetano, E., Gómez, G., & Bornstein, R. D. (2016). Influence of Green Roofs on Early Morning Mixing Layer Depths in Mexico City. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(6), 061011.
- Oke, T. R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. En *Wind climate in cities* (pp. 81–107). Springer.
- Oke, T. R. (2011). Urban heat island. En *The Routledge Handbook of Urban Ecology* (pp. 120–131). Routledge Abingdon, Oxon.
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339–358.
<https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Oke, T. R., Zeuner, G., & Jauregui, E. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26(4), 433–444.
- Oke, Tim R., Spronken-Smith, R. A., Jáuregui, E., & Grimmond, C. S. (1999). The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, 33(24), 3919–3930.
- Oke, Timothy R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- Oke, Timothy R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge.
- Oliveira, A. P., Bornstein, R. D., & Soares, J. (2003). Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 3(5), 3–15.
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., ... others. (2017). The Weather Research and Forecasting (WRF) Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American*

- Meteorological Society, (2017).
<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Raupach, M. (1992). Drag and drag partition on rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, 60(4), 375–395.
- Roth, M. (2000). Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(564), 941–990.
- Russell, P. B., Uthe, E. E., Ludwig, F. L., & Shaw, N. A. (1974). A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic acoustic sounder and lidar techniques. *Journal of Geophysical Research*, 79(36), 5555–5566.
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 31(2), 189–199.
- Salamanca, F., & Martilli, A. (2010). A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3–4), 345.
- Salamanca, F., Martilli, A., Tewari, M., & Chen, F. (2011). A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(5), 1107–1128.
- Seibert, P., Beyrich, F., Gryning, S.-E., Joffre, S., Rasmussen, A., & Tercier, P. (2000). Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric environment*, 34(7), 1001–1027.
- Sharma, A., Fernando, H. J., Hellmann, J., & Chen, F. (2014). Sensitivity of WRF model to urban parameterizations, with applications to Chicago metropolitan

urban heat island. En ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (p. V01DT28A002–V01DT28A002). American Society of Mechanical Engineers. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2087037>

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2. DTIC Document. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA487419>

Stewart, Iain D., Oke, T. R., & Krayenhoff, E. S. (2014). Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062–1080.

Stewart, Ian D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.

Tewari, M., Chen, F., Kusaka, H., & Miao, S. (2007). Coupled WRF/Unified Noah/urban-canopy modeling system. NCAR WRF Documentation, NCAR, Boulder, 122. <http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/urban/WRF-LSM-Urban.pdf>

Tewari, M., Kusaka, H., Chen, F., Coirier, W. J., Kim, S., Wyszogrodzki, A. A., & Warner, T. T. (2010). Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Atmospheric Research*, 96(4), 656–664.

Touchaei, A. G., & Wang, Y. (2015). Characterizing urban heat island in Montreal (Canada)—effect of urban morphology. *Sustainable Cities and Society*, 19, 395–402.

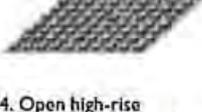
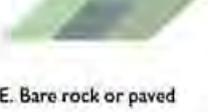
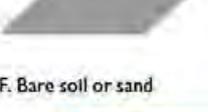
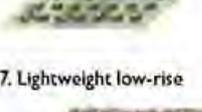
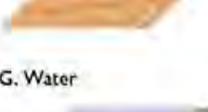
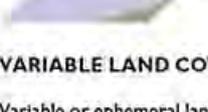
Urbanized-WRF-modeling-using-WUDAPT-web-version-March2016.pdf. (s/f).

Recuperado a partir de <http://www.wudapt.org/wp-content/uploads/2016/05/Urbanized-WRF-modeling-using-WUDAPT-web-version-March2016.pdf>

8. Anexos.

Anexo A.

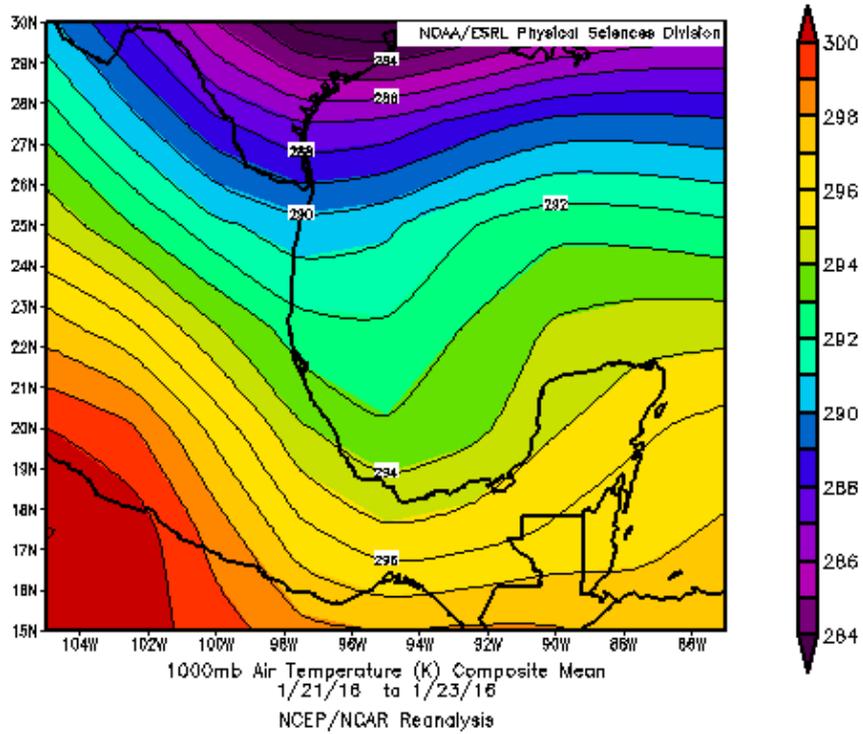
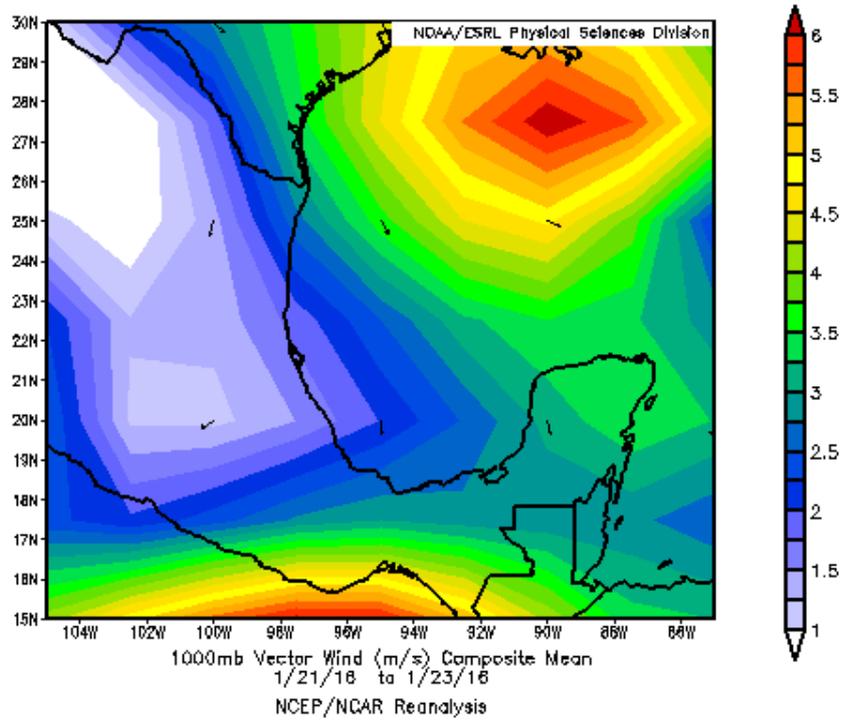
Tabla 8.1. Definiciones reducidas de las zonas climáticas locales (LCZ). Tomado de: Stewart & Oke (2012).

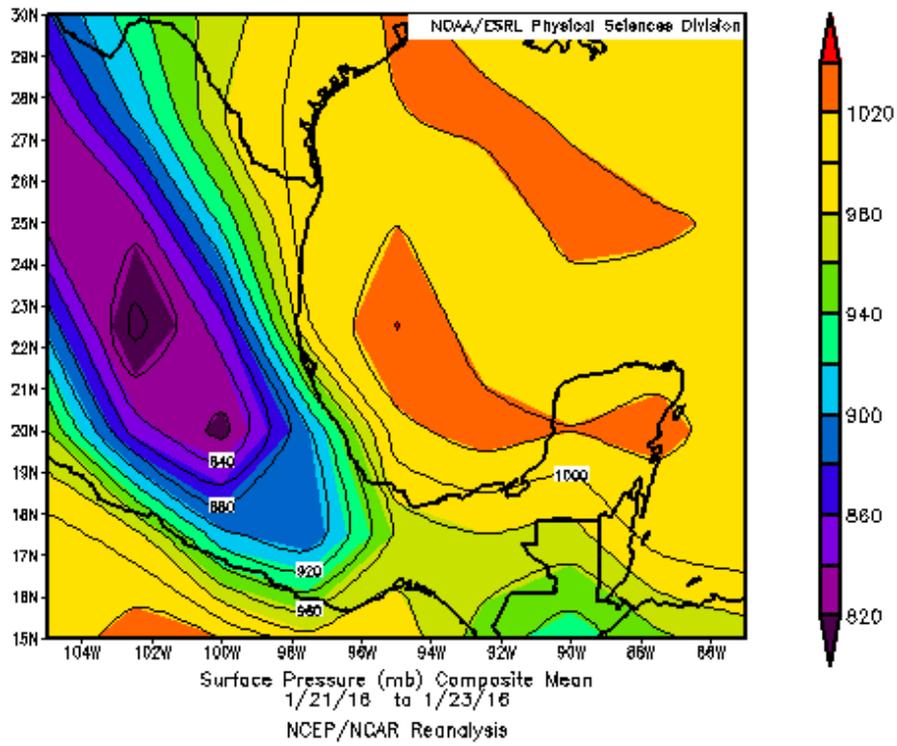
Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	<p>b. bare trees</p>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>s. snow cover</p>	Snow cover > 10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<p>d. dry ground</p>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<p>w. wet ground</p>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Anexo B.

Condiciones sinópticas imperantes durante los periodos simulados.

Periodo Seco





Periodo Lluvioso.

