



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO METEOROLÓGICO  
DE ALTA RESOLUCIÓN EN UNA ZONA DEL VALLE DE  
MÉXICO**

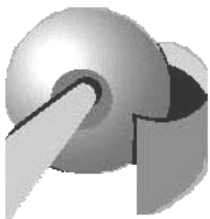
**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**P R E S E N T A**

**ING. WILLIAMS VAZQUEZ MORALES**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. ARÓN JAZCILEVICH DIAMANT**



**MÉXICO, D.F.**

**2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de maestría.

Al **Dr. Aron Jazcilevich Diamant** por darme oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo, al realizar mis estudios de maestría y en el desarrollo del trabajo de investigación.

Al **Dr. Agustín García Reynoso** por su apoyo, comentarios y colaboración en el trabajo de investigación.

A los asesores:

**M en I. Vicente Fuentes Gea**

**M en I. Ann Wellens Purnal**

**Dr. Ernesto Caetano Neto**

Por aceptar ser parte de mi jurado de evaluación y por sus valiosas observaciones en el desarrollo de este trabajo.

Al **Ing. Wilfrido Gutiérrez López** por el apoyo y capacitación de los equipos meteorológicos empleados en la campaña de monitoreo atmosférico.

Al **Dr. Ricardo Torres Jardón** por el apoyo y capacitación en el manejo de la unidad móvil empleada en la campaña.

Al **Dr. Robert Bornstein** del Depto. de Meteorología de la Universidad Estatal de San José California, EU., por su colaboración en la implementación del modelo uMM5.

Al **Posgrado en Ciencias de la Tierra** por darme la oportunidad de superarme académicamente.

Al **Centro de Ciencias de la Atmósfera** por permitirme laborar en sus instalaciones.

## Dedicatorias

*A mis padres Fermín Vázquez González y Eudexia Morales Tondopó, por enseñarme a luchar hacia adelante, por el apoyo incondicional, pero sobre todo por el gran amor que me han brindado toda la vida. Y a mi hermano Manuel A., por su apoyo y cariño.*

*A mi futura esposa Ariadna C. Toalá Culebro por su amor y apoyo incondicional durante todo este tiempo. Te amo*

*Al M. en I. Emmanuel Díaz Nigenda amigo del alma, por sus consejos durante todo este tiempo de conocerlo.*

*A todos mis amigos y compañeros que de una y otra forma aportaron un granito de arena para finalizar este trabajo.*

---

# Índice

**Agradecimientos**

**Dedicatoria**

**Índice**

**Lista de tablas**

**Lista de figuras**

**Resumen**

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Justificación y objetivos.....</b>	<b>3</b>
1.1 Justificación .....	3
1.2 Objetivos .....	5
<b>Capítulo 2: Antecedentes.....</b>	<b>6</b>
2.1 Modelación atmosférica en el Valle de México .....	6
2.2 Climatología urbana .....	7
2.3 Modelos numéricos de meteorología urbana.....	9
2.4 Clima de la Ciudad de México .....	11
<b>Capítulo 3: Metodología .....</b>	<b>13</b>
3.1 Descripción del modelo MM5 urbano.....	13
3.2 Selección de la zona de estudio .....	22
3.3 Campaña de monitoreo atmosférico .....	24
3.3 Configuración del modelo.....	26
3.4 Evaluación cuantitativa del desempeño de los modelos .....	30
<b>Capítulo 4: Resultados.....</b>	<b>33</b>
4.1 Días de simulación .....	33
4.2 Condiciones sinópticas.....	33
4.3 Resultados de la campaña de monitoreo atmosférico.....	35
4.4 Problemas de ejecución del modelo uMM5 .....	37
4.5 Resultados de la simulación .....	39

---

---

4.5.1 Velocidades de vientos en la zona urbana .....	40
4.5.2 Velocidad de viento el Jardín urbano .....	44
4.5.3 Evaluación cuantitativa de los resultados de velocidades de viento en la zona urbana y el jardín urbano.....	46
4.5.4 Temperatura superficial en la zona urbana y el jardín urbano .....	47
<b>Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
5.1 Conclusiones.....	51
5.2 Recomendaciones.....	52
<b>Bibliografía.....</b>	<b>53</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>58</b>
38 usos de suelo empleados por uMM5 .....	58

---

---

## Lista de tablas

Tabla 3.1 Dominios de simulación.....	1
Tabla 4.1 Métricas estadísticas en la zona urbana para las intensidades de viento promediadas cada hora.....	46
Tabla 4.2 Métricas estadísticas en la zona urbana para las intensidades de viento promediadas cada hora.....	47

## Lista de figuras

Figura 1.1 Serie de tiempo de magnitudes de viento (m/s) reportados por las estaciones de la RAMA (línea continua) y las obtenidas de simulación (línea con puntos) (Díaz, 2005). Nótese como en el caso de la Merced (b), la intensidad de viento reportada por MM5 está por arriba de la medición, mientras que en Chapingo (a) que está fuera de la zona urbana las intensidades de viento medidas y modeladas son comprobables. ....	4
Figura 2.2 Ubicación geográfica de la Ciudad de México. Localizada en el centro de la república con una extensión de 1,479 km <sup>2</sup> (mancha negra) (wikipedia, 2007).....	12
Figura 3.3 Turbulencia generada entre los edificios .....	16
Figura 3.5 Esquema del balance de energía en muchas superficies con diferentes propiedades térmicas. Reflexiones múltiples en cañones urbanos por efecto de la radicación solar (Martilli, 2000). ....	21
Figura 3.7 Localización de Ciudad Universitaria. En el recuadro rojo se muestra la zona de la Ciudad Universitaria. ....	23
Figura 3.12 Dominios de simulación, donde el dominio 1 tiene una resolución de 27 km, dominio 2 de 9 km, dominio 3 de 3 km, y el dominio 4 de 0.5 Km. ....	1
Figura 3.13 Ejemplo de la utilización del clinómetro.....	28
Figura 3.14 Edificios de la zona de estudio los recuadros en blanco representa como fueron representados los edificios en acho y largo en la generación de los archivos de entrada para uMM5. ....	29

---

---

Figura 4.1 Condición sinóptica a 500 mb para los días 20, 21 y 22 de febrero promediado de las 6 a 12 hrs. ....	34
Figura 4.2 Gráfica de temperatura contra tiempo, la línea rosa representa la temperatura de la zona urbana y la línea azul es la correspondiente al jardín urbano, para las horas de 6 a 9 am donde observamos la diferencia de 1 a 1.5°C entre cada zona y siendo la zona del jardín urbano más fría que la zona urbana. ....	35
Figura 4.3 Intensidades y dirección de vientos observados en las dos zonas de estudio. ....	36
Figura 4.4 Estructura del compilador configure.user .....	37
Figura 4.5 Código fuente para acoplar e ingresar los datos en los archivos de entrada de uMM5.....	38
Figura 4.6 Terreno modificado, de la lado izquierdo se aprecia el terreno sin modificar, y del lado derecho el terreno modificado donde la elevación introducida se aprecia en la parte inferior izquierda. ....	39
Figura 4.7 Variación horaria de las velocidades de los vientos modelados por MM5 línea roja, por u-MM5 línea azul y medidos línea negra. Se promedia cada 5 minutos en la zona urbana para los días 20,21 y 22 de febrero respectivamente. ....	41
Figura 4.10 Comparación de las velocidades de vientos modelados con uMM5/MM5 y los observados en el jardín urbano, para los días 20 y 21 de febrero del 2006 respectivamente. ....	45
Figura 4.11 Variación horaria de la temperaturas para los días 20, 21 y 22 de febrero respectivamente, a) son las graficas correspondientes a la zona urbana y b) son las graficas correspondientes al jardín urbano.....	49

---



## Resumen

La mayoría de los modelos meteorológicos no toma en cuenta la morfología urbana, por lo que su desempeño no es óptimo en zonas urbanas. En este estudio, se implementó en la Ciudad de México el modelo de alta resolución uMM5, que es una versión urbanizada del modelo MM5 y toma en cuenta parámetros de morfología urbana como rugosidad, factor de arrastre, alturas de edificios, albedos, etc. para representar los efectos meteorológicos a microescala.

Debido a la complejidad en la obtención de los datos de entrada necesarios para el modelo uMM5, se seleccionó un área de modelación relativamente pequeña en el campus de Ciudad Universitaria (de 3.5 x 3.5 km). Se trabajó con una resolución de  $\frac{1}{2}$  km. Se comparó el desempeño de los modelos uMM5 y MM5 con datos observados en dos ambientes del dominio de modelación: un área urbanizada y un jardín urbano. Las alturas de los edificios fueron medidos directamente, mientras que los otros parámetros de morfología urbana fueron adaptados de una zona de estudio similar.

Los resultados mostraron que el modelo MM5 sobrepredice las intensidades de viento, mientras que uMM5 capta con fidelidad esta variable. En general, se constó que el modelo uMM5 representa en forma adecuada los efectos meteorológicos a microescala. Sin embargo, para ambos modelos, se encontraron discrepancias en cuanto a las temperaturas superficiales, debido a la falta de datos específicos de por ejemplo albedo o emisividad de la zona en estudio.

## **Introducción**

La aplicación de modelos matemáticos con capacidad de representar los fenómenos que afectan a los flujos atmosféricos en un área urbana, son una herramienta en la predicción y planeación y planeación de programas de ambientales para atacar los problemas de contaminación atmosférica. En este trabajo se implementa y evalúa cómo opera el modelo MM5 urbano ante los efectos que la morfología urbana tiene en los flujos atmosféricos.

De esta manera el modelo MM5 urbano fue implementado en un dominio de 3.5 x 3.5 km con una resolución espacial de 0.5 km. La zona de estudio corresponde a la ciudad universitaria de la UNAM. Este trabajo está compuesto por 5 capítulos que a continuación se describen:

En el Capítulo I se da a conocer la problemática que tiene el modelo MM5 al no captar los efectos en la dinámica de los flujos atmosféricos por la presencia de edificaciones y diferentes usos de suelo lo cual da origen al desarrollo del presente trabajo y los objetivos del estudio.

El Capítulo 2 se subdivide en cuatro temas; en el primero se da una breve reseña de la modelación atmosférica en México, en el segundo es una descripción sobre climatología urbana donde conoceremos como afecta la urbanización al clima de una región. El tercero presenta un resumen de los diferentes modelos que se han empleado para representar estos fenómenos urbanos, desde el modelo más simple hasta el modelo que se emplea en este proyecto y por último se resume la climatología de la Ciudad de México y de la Ciudad Universitaria.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología usada para desarrollar este proyecto, empezando por conocer el modelo MM5 urbano, la forma de obtener los datos debido a la urbanización y se describe la selección de la zona de estudio y los diferentes parámetros empleados para ejecutar el modelo. Finalmente se presenta las métricas estadísticas para evaluar cuantitativamente los resultados de la modelación.

En el Capitulo 4 es donde se da a conocer los resultados obtenidos, en la comparación del modelo MM5 con el uMM5, así como la evaluación cuantitativa del desempeño de los modelos. Las conclusiones y las recomendaciones son presentadas en el capítulo 5.

# Capítulo 1: Justificación y objetivos

## 1.1 Justificación

En los últimos 30 años, el área urbana de la Ciudad de México se ha sextuplicado y la población, que actualmente asciende a 18 millones de habitantes se ha triplicado (CONAPO, 2006). Se calcula que en el Valle de México transitan más de 3.5 millones de vehículos y se consumen más de 20 millones de litros de gasolina y diesel (Molina, 2002). Esta situación, junto con emisiones de origen natural, provoca que la calidad del aire de la ciudad México no sea satisfactoria. Un caso reciente fue cuando se generó una precontingencia ambiental por Ozono durante los días 16 y 17 de Abril del 2007, donde la zona suroeste de la ciudad México registró 185 puntos del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), (El Universal, 2007). Además, en la ciudad de México se rebasa la norma mexicana de calidad del aire de este contaminante en un 56% de los días del año, pero a comparación de otros años como en 1991 cuando solo el 2.6% de los días del año norma se cumplía este ha disminuido, debido a los diferentes programas ambientales aplicados a la ciudad que se desarrollan con el apoyo de nuevas herramientas científicas como los modelos numéricos meteorológicos y de calidad del aire (SMA-GDF, 2007).

La importancia de estos modelos radica esencialmente en que contribuyen al conocimiento de los fenómenos meteorológicos y de fotoquímica que provocan la contaminación atmosférica y ayudan a la definición de planes de contingencia y de estrategias para evitar episodios de alta contaminación atmosférica.

Obedeciendo a esta necesidad, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y otras instituciones del país se han desarrollado y modificado modelos meteorológicos numéricos, de transporte de contaminantes y de fotoquímica atmosférica, (Cruz, 1992; Jazcilevich y García, 2002a, b, 2003, 205a, b; García, 2001). Otros investigadores también se han interesado por la meteorología y transporte de contaminantes en el Valle de México (Bossert, 1996; De Foy, 2003; Fast, 1998, 2006). Muchos de estos esfuerzos para estudiar la meteorología del Valle de México se basan en el uso del modelo meteorológico MM5

(Jazcilevich *et al.*, 2005; Magaña, 1998; Zitacuaro, 2004) o modelos similares como RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, Bossert, 1996).

Estas experiencias han mostrado que existen desviaciones consistentes entre los resultados de velocidad de los vientos modelados y los medidos. Por ejemplo, en la figura 1.1 se muestran los resultados de velocidad de viento usando MM5 en dos localidades del Valle de México y su comparación con las mediciones la simulación corresponde al 5 de diciembre del 2001. En la figura 1.1a, se aprecia cómo la velocidad del viento en Chapingo, un área fuera de la interferencia por edificaciones, presenta valores de magnitud de viento modelados y medidos comparables, el desfaseamiento se atribuye a la resolución espacial usada en el modelo afectando en el tiempo los datos de salida. En la figura 1.1b, se muestran las magnitudes de viento medidos y modelados en la estación de la Merced, un área en medio de edificaciones de alta densidad. Se aprecia como la magnitud de viento reportada por el modelo MM5 es mayor a las medidas en el caso de la Merced.

Esta situación tiene importantes consecuencias cuando se trata de determinar el clima urbano mediante modelación y cuando se quiere incluir el modelo MM5 en estudios de calidad del aire.

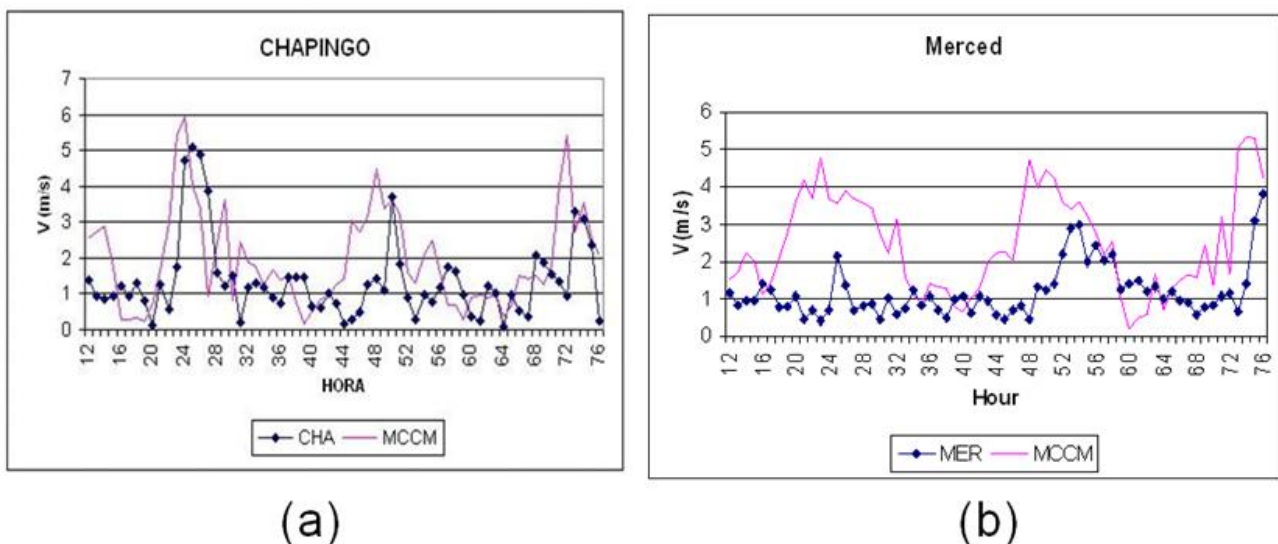


Figura 1.1 Serie de tiempo de magnitudes de viento (m/s) reportados por las estaciones de la RAMA (línea continua) y las obtenidas de simulación (línea con puntos) (Díaz, 2005). Nótese como en el caso de la Merced (b), la intensidad de viento reportada por MM5 está por arriba de la medición, mientras que en

**Chapingo (a) que está fuera de la zona urbana las intensidades de viento medidas y modeladas son comprobables.**

Diferentes estudios en el área de meteorología urbana indican que este fenómeno se debe en gran medida, a la falta de un término de arrastre en la ecuación de momento del modelo MM5 (Dupont *et al.*, 2004) y términos mencionados por Martili (2001) como el balance energético antropogénico y humedad entre otros. La presencia de edificios, árboles, calles y al uso de suelo urbano tiene que ser cuidadosamente parametrizados para incluir éstos efectos.

El modelo meteorológico conocido como MM5 urbano (uMM5) que simula con resoluciones de 0.5 a 1 km los flujos atmosféricos, introduce el término de arrastre, rugosidad, parametrizaciones de temperatura y humedad para un ambiente urbano.

El modelo uMM5 ha sido implementado exitosamente en las ciudades de Houston (Hitchcock, 2005) y Philadelphia en los EE.UU (Dupont *et al.*, 2004). Este modelo necesita datos de la morfología urbana como la altura de los edificios, área de las azoteas, área frontal, área pavimentada, altura de la vegetación, uso y cobertura de suelo entre otros (Burian, *et al.*, 2004, a, b).

En este trabajo se evalúa e implementa uMM5 por primera vez en México. Debido a la complejidad de obtención de datos para una zona como la Ciudad de México, se selecciona un dominio reducido de 3.5 por 3.5 km con una resolución de celda de 0.5 km, con el objetivo de:

## **1.2 Objetivos**

- Estudiar en forma localizada como opera el modelo ante los efectos que la morfología urbana tiene en los flujos atmosféricos en una zona.
- Comparar uMM5 con el modelo MM5 convencional mostrando su desempeño.

## Capítulo 2: Antecedentes

En este capítulo se da a conocer una reseña histórica de la modelación atmosférica en el Valle de México, así como una breve explicación sobre climatología urbana y como los modelos han evolucionado para incluir las parametrizaciones urbanas.

### **2.1 Modelación atmosférica en el Valle de México**

En el Valle de México se han usado los modelos meteorológicos desde 1991, con la implementación de HOTMAC que es un modelo tridimensional meteorológico, con el cual el laboratorio nacional de los Álamos en colaboración con el Instituto Mexicano del Petróleo realizó estudios de calidad del aire en la Ciudad de México (Cruz, *et al.*, 1992).

En 1998 Magaña y Pérez usan el modelo meteorológico a mesoescala MM5 para la predicción del tiempo, en estudios de clima regional (Pérez, 2001), y eventos de precipitación extrema sobre el Valle de México (Magaña *et al.*, 2003).

Bossert ha realizado estudios empleando el modelo RAMS, y en 1991 realizó una investigación detallada sobre estructura de los flujos a mesoescala sobre la Ciudad de México (Bossert, 1996).

Benjamín de Foy y Molina durante la campaña MCMA-2003 (De Foy, 2003), analizaron los efectos en los flujos atmosféricos al comparar diferentes superficies de suelo para un terreno complejo empleando el modelo MM5.

Durante Marzo y Abril del 2005 dentro del proyecto MIRAGE (Megacity Impacts on Regional and Global Environments), Jerome D. Fast empleando el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), realizó una evaluación de las características de capa límite y los contaminantes en la Ciudad de México (Fast, 2005).

El modelo de calidad del aire multiescala (MCCM) que incluye al modelo MM5 para determinar las variables meteorológicas ha sido utilizado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)

desde 1999. Fue implementado para la región central de México (García *et al.*, 2000), y fue usado para realizar trabajos de planeación urbana (Jazcilevich, 2002) y contaminación del aire en la Ciudad de México (Jazcilevich, 2003). Actualmente se usa como parte de un modelo de predicción.

Sin embargo ninguno de los modelos atmosféricos mencionados anteriormente incluye el tratamiento de la capa límite planetaria para ambientes urbanos, lo cual limita su funcionamiento. Los modelos meteorológicos a mesoescala requieren la parametrización de las variables físicas turbulentas como calor, humedad, arrastre y rugosidad en áreas urbanas para proporcionar una correcta modelación de la capa límite y de esta manera mejorar el cálculo de las variables meteorológicas como intensidad, dirección del viento, humedad y temperatura. A continuación se describe las particularidades de un clima urbano.

## **2.2 Climatología urbana**

Un área urbana es una zona que se distingue de sus alrededores por la presencia de obstáculos relativamente grandes (edificios y otras estructuras), y por lo tanto donde existe una fuerza de arrastre grande. También ahí se presenta la introducción del calor y de humedad por las actividades del hombre, la capacidad de retención de calor del concreto y otros materiales de los edificios y áreas pavimentadas. Estas condiciones generan un clima urbano (Oke, 1987) que se refleja en las temperaturas, la humedad, flujos de calor, etc.

Así se tiene que Bornstein (1987) ha observado que el flujo es desviado por encima y alrededor de un área urbana. El desplazamiento vertical del flujo es a veces visible cuando está marcada por la formación de una capa de nubes sobre el área urbana, apenas observado sobre las montañas.

La figura 2.1a representa una sección transversal de un área típica urbana, mostrando tres subcapas principales: la subcapa del dosel urbano (UCL) (urban canopy layer), la subcapa de rugosidad, y la subcapa inercial. La subcapa inercial es el área dentro de la capa de límite influenciado por la superficie urbana, y es tratada por las fórmulas analíticas de capa límite.



En la subcapa UCL el flujo es afectado directamente por los obstáculos locales, y en la subcapa de rugosidad el flujo todavía se está ajustando a los efectos de muchos obstáculos. La descripción de los flujos en la subcapa de rugosidad se basa en la teoría de similitud de la capa límite superficial, que asume que los flujos turbulentos son constantes con la altura. En la figura 2.1b se presenta los perfiles de viento en una zona rural y una zona urbana, donde se aprecia que los vientos a nivel de superficie disminuyen por la fricción que ejercen los edificios y los vientos de gradiente (aquellos que no son afectados por la fricción) alcanzan mayores altitudes, y en la zona rural los vientos en la superficie son mayores y los vientos de gradiente alcanzan menores altitudes (Martilli *et al.*, 2001).

Sin embargo, mediciones en campo (ej., Rotach, 1993) han demostrado que este acercamiento al problema no puede reproducir la estructura vertical de los campos turbulentos de la subcapa urbana (roughness subLayer [RSL]), que va del nivel de la calle hasta alturas de 50-100 m, para corregir este problema se toma en cuenta la fuerza de arrastre. En este caso se agrega un término en las ecuaciones de momento y energía cinética turbulenta (TKE) para tomar en cuenta la fricción del obstáculo, como se hace a menudo para las cubiertas de vegetación (Martilli *et al.*, 2001).

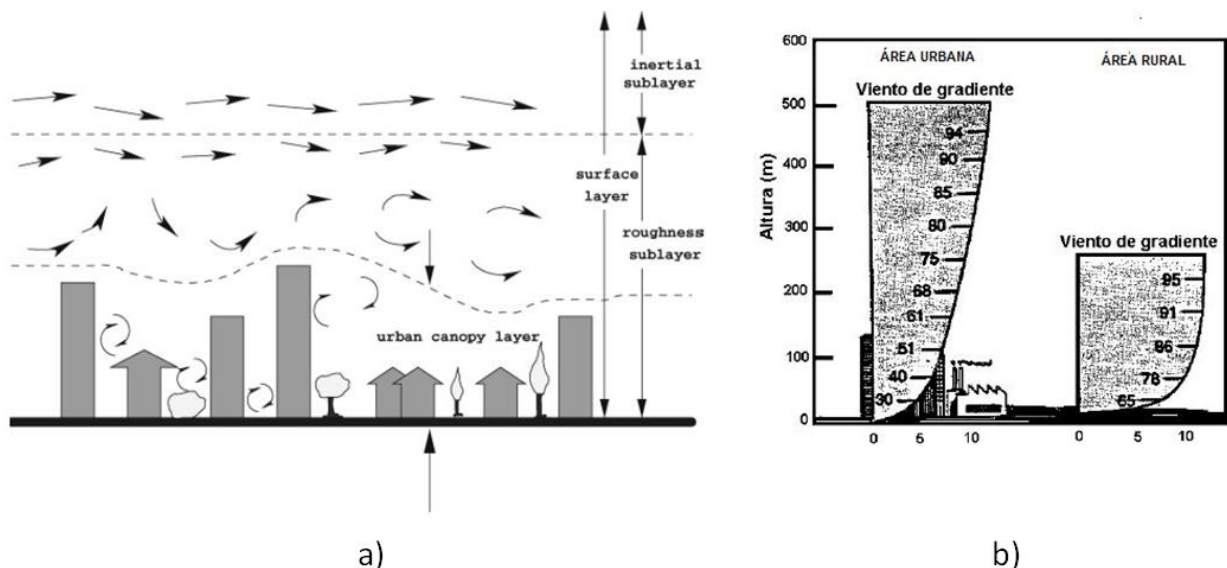


Figura 2.1 a) Esquema del flujo de viento a través y sobre un área urbana, b) perfiles de viento en un área urbana y otra rural. (Tomado de Hanna and Britter, 2003).

El balance energético en la superficie para un área urbana y sus alrededores están perceptiblemente afectados por las fuentes de calor y de la humedad por las actividades humanas. Estos flujos adicionales de calor y la retención de calor por parte de la superficie urbana conducen al fenómeno de isla de calor urbano (ICU).

Este fenómeno propicia la convergencia del viento en la horizontal y movimientos verticales sobre algunas ciudades (Bornstein R., 2000. Jazcilevich et al., 2005a). Además la profundidad de la capa de mezcla sobre la ciudad aumenta como resultado de los movimientos verticales así como del calentamiento de la superficie. La ICU causa que la capa límite sobre el área urbana sea más inestable por el incremento de la turbulencia térmica (Hanna and Britter, 2003).

También el transporte y dispersión de los contaminantes sobre el área urbana es alterado como resultado de incremento de la turbulencia mecánica causada por los grandes obstáculos sobre el cual viajan los contaminantes. Para el estudio de estos efectos en la meteorología y calidad del aire urbana, los investigadores emplean herramientas como son los modelos numéricos, algunos de los cuales se describen en la siguiente sección.

### **2.3 Modelos numéricos de meteorología urbana**

La urbanización de los modelos comenzó con el modelo numérico de diagnóstico de ICU de Myrup (1969). Este modelo es de una dimensión y no incluye la divergencia del flujo radiativo, Los parámetros de longitud de rugosidad, capacidad calorífica del suelo y humedad relativa para el área urbana fueron especificados como una “losa de concreto”. Numerosos estudios extendieron este proyecto, por ejemplo, Tapper *et al.* (1981), quien incluyó la ecuación de difusión de calor en el suelo, calor antropogénico, mientras Ackerman (1977) introdujo los efectos radiativos de gases urbanos y partículas contaminantes.

Los efectos de los “cañones urbanos” en la energía de superficie fueron estudiados por Johnson *et al.* (1991) usando el modelo de 1-D SHIM, que considera flujos de calor de edificios y reflexión de la radiación infrarroja dentro de los cañones.

El primer modelo urbano en 2-D (plano vertical), consistió de soluciones analíticas simplificadas de las ecuaciones lineales, como por ejemplo, Vukovich (1971, 1973, 1975) quien usó un modelo con tres niveles, sin considerar la fuerza de Coriolis, con una fricción linear, y especificando las razones de calor.

Delage y Taylor (1970) fue el primero en usar un modelo no lineal de dos dimensiones, hidrostático con ecuaciones dinámicas de pronóstico, aunque sin topografía, sin balance de energía en la superficie y sin diferencias espaciales de rugosidad. Fue realizado para estudiar las circulaciones inducidas en una ICU.

El modelo de 2-D, hidrostático, con aproximación de Boussinesq, que incluye la vorticidad de la capa limite (URBMET) de Bornstein (1972, 1975) fue el primero en simular flujos sobre área urbana rugosa y caliente.

Vukovich *et al.*, (1976) fue el primero en usar un modelo hidrostático en 3-D para simular como la ICU induce circulaciones sobre un ciudad. Bornstein *et al.*, (1986) expandió el modelo URBMET de 2-D en un modelo 3-D no topográfico ligado un modelo de 3-D de dispersión de calidad del aire para la ciudad de Nueva York. El modelo incluía parametrizaciones de la turbulencia de alto orden y una ecuación de pronóstico de balance de energía con flujos de calor divididos entre la superficie y atmósfera.

Thunis (1990) incorpora la topografía natural y efectos de turbulencia dentro del Modelo de Vorticidad Topográfica (VTM) versión de URBMET, mientras Bornstein *et al.*, (1993) usa VTM con “bloques de edificios” urbanos. El modelo simulaba el retardo en el movimiento de un frente de brisa marina sobre la ciudad de Nueva York, así como la correspondiente convergencia en el día y la divergencia en la noche fuera de la ciudad.

El modelo a mesoescala, hidrostático e incompresible que usa ecuaciones básicas de momento, energía entre otras, de la Universidad de Colorado (CSUMM) (Pielke, 1974) fue usado para estudiar el albedo urbano (Taha, 1997) y los efectos de la vegetación sobre Los Angeles Basin. CSUMM también fue usado para investigar la humedad el suelo en Atlanta (Hafner and Kidder, 1999) y el impacto en la calidad del aire (Taha 1999).

Dupont *et al.* (2004) emplea por primera vez el modelo urbano a mesoescala llamado DA-SM2-U, para simular los campos meteorológicos dentro y sobre las coberturas rurales y urbanas en la ciudad de Philadelphia, EE. UU.

Para el trabajo que aquí se presenta se enfocará en modelar los efectos en las velocidades de los vientos y temperaturas, que se presentan en una zona no urbana y otra urbana dentro de un área estratégica de la Ciudad de México, empleando principalmente el modelo DA-SM2-U comúnmente llamado MM5 urbano o como aquí usamos uMM5. Este modelo se describe en detalle en el próximo capítulo.

## ***2.4 Clima de la Ciudad de México***

La Ciudad de México se ubica en el centro de la república Mexicana. Debido a que se encuentra en la zona Intertropical recibe alta insolación durante todo el año. La altura promedio es de 2240 msnm. Al noreste el clima es templado semiseco, en el centro es templado subhúmedo y en las regiones elevadas de las montañas a más de 2,800msnm, se considera semifrío subhúmedo. Su temperatura promedio anual oscila entre los 12°C en las partes más altas hasta los 18°C en las partes bajas. La precipitación pluvial total varía de 1,000 en el sur a 600mm en el norte por año, y el período en que se concentra es en el verano (SMA-GDF, 2005).



**Figura 2.2 Ubicación geográfica de la Ciudad de México. Localizada en el centro de la república con una extensión de 1,479 km<sup>2</sup> (mancha negra) (wikipedia, 2007).**

Al sur de la ciudad de México se encuentra ubicada la Ciudad Universitaria de la UNAM (C.U.), con temperatura media 15.6 °C, máxima promedio de 23.5 °C y mínima promedio de 9.1 °C. La precipitación total anual promedio es de 833 mm. La humedad relativa promedio es de 33% y la evaporación es de 4.3 mm por día (Filosofía y Letras, UNAM 2004).

## Capítulo 3: Metodología

### 3.1 Descripción del modelo MM5 urbano

El modelo MM5 se origina a principios de los años 70's y desde entonces ha tenido varias modificaciones y mejoras. Su funcionamiento está descrito en diferentes fuentes como por ejemplo, en Dudhia *et al.*, (2005), y cuenta con los módulos de procesamiento descritos en la figura 3.1.

En *TERRAIN*, que es el primer módulo del modelo, se configuran los dominios de cómputo y su posición. Los dominios se definen como sigue: ubicación geográfica (latitud y longitud) del centro del dominio madre, número de celdas, resolución horizontal, tipo de proyección geográfica, anidación de dominios, categoría de uso de suelo y cobertura vegetal entre otros.

*REGRID*, que es el segundo módulo, lee los datos de los campos meteorológicos proporcionados por modelos globales e interpola la información a los dominios de simulación definidos por *TERRAIN*.

El tercer módulo llamado *INTERPF* provee las condiciones iniciales y de frontera para la simulación meteorológica y realiza la transformación de datos generados por los módulos de análisis (*REGRID*) a los formatos requeridos por el módulo MM5.

*RAWINS/LITTLER* es un módulo alternativo que incorpora a las salidas de *REGRID*, las variables meteorológicas reportadas por estaciones en superficie y radiosondeos.

En el módulo de MM5 es donde se realiza la predicción de la meteorología resolviendo las ecuaciones primitivas de conservación de energía, masa y momento.

En *NESTDOWN*, que es el quinto módulo, se interpolan horizontalmente los datos en Coordenadas Sigma de una malla ya sea la principal o las anidadas. Las coordenadas Sigma tienen un rango de 0 a 1, toman en cuenta la topografía y están en función de la presión atmosférica. Si es necesario el número de niveles sigma se puede incrementar para aumentar la resolución vertical de una malla anidada.

El modelo MM5 es descrito en su totalidad en la guía del usuario (Dudhia, *et al.*, 2005).

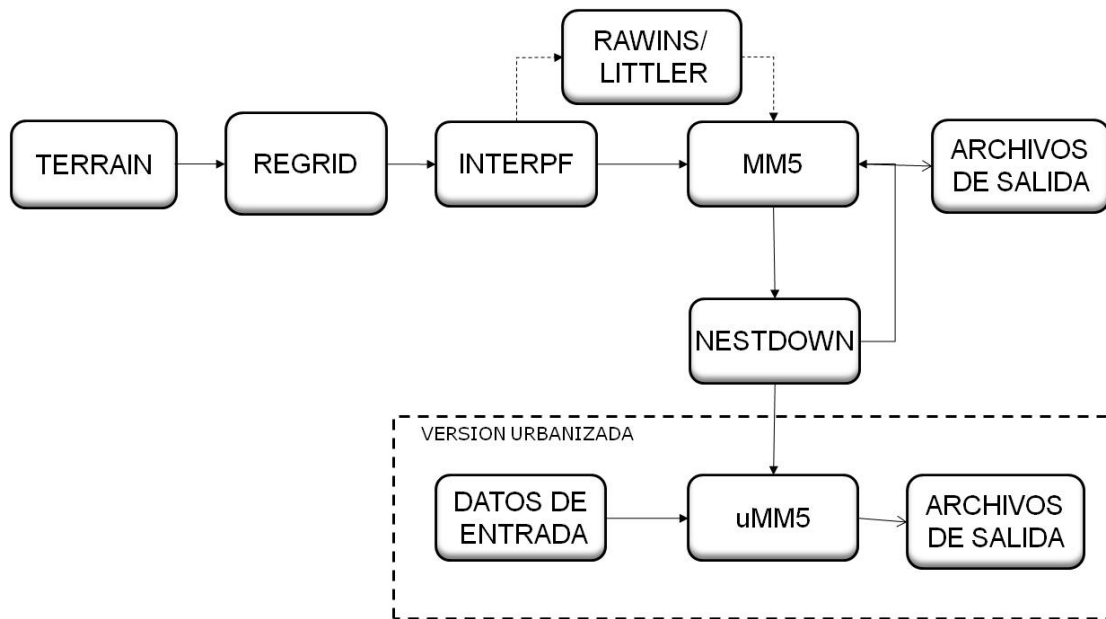


Figura 3.1 Diagrama de ejecución del modelo MM5 y uMM5

Los módulos enmarcados con líneas punteadas en el diagrama de la figura 3.1, son los que conforman la versión urbanizada de MM5, o bien, uMM5. Está descrito por Dupont *et al.*, (2004), y se basa en el incluir los parámetros de rugosidad, arrastre y de los diferentes usos de suelo presentes en un área urbana y rural.

Para considerar los efectos producidos por las edificaciones y la vegetación, las ecuaciones básicas de conservación que usa MM5 como la de momento, energía entre otras son modificadas. Las nuevas parametrizaciones usadas por uMM5, se resumen a continuación (Dupont *et al.*, 2004):

### Ecuación de momento

El flujo de momento es afectado por la vegetación y los edificios debido a las fuerzas de arrastre que estos producen, ver figura 3.2. La ecuación de momento usada por uMM5 es:

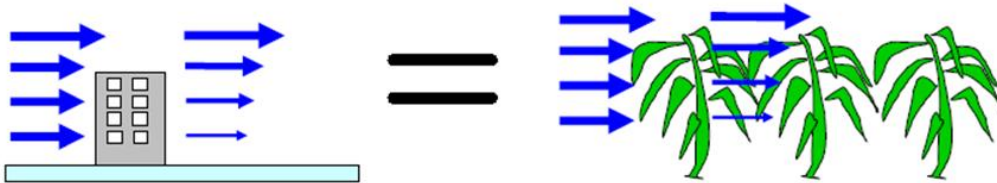


Figura 3.2 Representación de la fuerza de arrastre que produce la vegetación y los edificios.

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} = R_{ui} + F_{ui}^{bui} + \sum_j D_{ui}^j$$

donde  $u_i$  son las componentes horizontales del viento,  $\rho$  la densidad del aire,  $\langle \rangle$  denota el promedio de Reynolds,  $i, j$  las coordenadas  $(x, y)$ , y  $R_{ui}$  son las fuerzas reales en la ecuación (gravedad, presión y fricción),  $F_{ui}^{bui}$  es rugosidad de la superficie por los edificios y  $D_{ui}^j$  la fuerza de arrastre provocada por la vegetación y edificios.

La ecuación usada por MM5 es:

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} = R_{ui}$$

Como se aprecia el modelo MM5 no parametriza superficies urbanas u obstrucciones que se presentan en una zona tanto urbana como rural. El modelo uMM5 agrega el termino  $F_{ui}^{bui}$  para representar la rugosidad debido a la presencia de edificios en la superficie horizontal, y  $D_{ui}^j$  la fuerza de arrastre como consecuencia de la presencia de vegetación y de los edificios, en la vertical. La fuerza de arrastre fue inicialmente propuesta para cubierta vegetal, luego fue extendida para la cubierta de los edificios (Martilli, 2002).



### Ecuación de energía debido a la Turbulencia Cinética (TKE)

La forma más común de evaluar la turbulencia generada por la presencia de edificios y de la vegetación (Figura 3.3), es estimar su energía cinética mediante la ecuación siguiente:

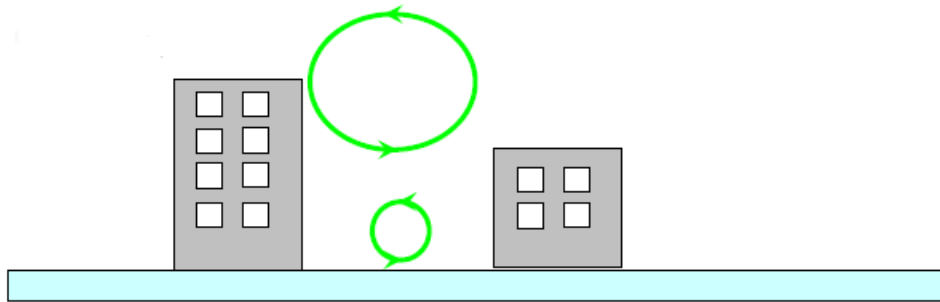


Figura 3.3 Turbulencia generada entre los edificios

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i}}_1 + \underbrace{\left\{ K_m \left[ \left( \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial z} \right)^2 \right] S_{air} + F_E^{buil} \right\}}_2 + \underbrace{\left\{ \frac{\varphi}{\theta_v} \langle \omega \theta_v \rangle + H_E \right\}}_3$$

$$- \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho \langle \omega E \rangle)}{\partial z}}_4 - \underbrace{\varepsilon}_5 + \underbrace{\sum_j W_E^j}_6 + \underbrace{\sum_j D_E^j}_7$$

La descripción de los términos de la ecuación son:  $E$  es la energía cinética en función del tiempo,  $\theta_v$  es la temperatura potencial virtual,  $\varphi$  es la aceleración gravitacional. Los términos de la derecha después de la igualdad, representan (1) la ecuación de energía cinética producida por la advección, (2) la energía cinética de origen mecánico asociada con la cizalladura (cizalladura es el corte dinámico que se produce por la diferencia en la velocidad del viento o su dirección en dos puntos de la atmósfera), y también incluye la cizalladura que se produce por las edificaciones presentes en la horizontal ( $F_E^{buil}$ ), (3) ecuación de la energía cinética debido a la flotabilidad (bouyancia) y  $H_E$  es la conversión de la energía potencial a energía cinética, proveniente de los flujos de calor de edificios, vegetación y antropogénicos, (4) ecuación de la energía cinética debido al transporte turbulento, (5) ecuación de energía

cinética perdida por la disipación, (6) la ecuación de energía cinética debido a la fuerza de arrastre, y (7) es la energía cinética perdida por los remolinos producidos por las superficies (edificios, vegetación, etc.).

Los términos  $F_E^{buil}$ ,  $H_E$ ,  $W_E$ ,  $D_E$  son los que parametrizan la interacción del aire con los edificios y la vegetación que influyen en la generación y/o decaimiento de la energía cinética. Que están incluidos en la ecuación empleada por uMM5, mientras que MM5 no toma en cuenta estos parámetros.

### ***Ecuación de humedad***

La humedad que se presenta en las diferentes superficies, tanto de una zona rural como urbana (excepción de la tierra) afectan en los flujos de atmosféricos y en una zona urbana existe humedad proveniente de la evaporación del agua interceptada por las edificaciones. La ecuación representativa es:

$$\frac{\partial \rho(q_w)}{\partial t} = R_q + D_q$$

donde  $q_w$  es el contenido total de agua para la suma de la humedad específica y agua líquida en el aire,  $R_q$  son las fuerzas reales en la ecuación.

La usada por MM5 es:

$$\frac{\partial \rho(q_w)}{\partial t} = R_q$$

Nótese que el término adicionado en la ecuación de uMM5 es  $D_q$  que representa los flujos de humedad provenientes de los edificios y la vegetación, mientras que MM5 no los toma en cuenta.

### Ecuación termodinámica

Los flujos de calor presentes en una zona urbana (Figura 3.4), como calor sensible de las azoteas y de la vegetación, así como los flujos de calor antropogénicos, son agregados a la ecuación de temperatura potencial del agua en estado líquido.

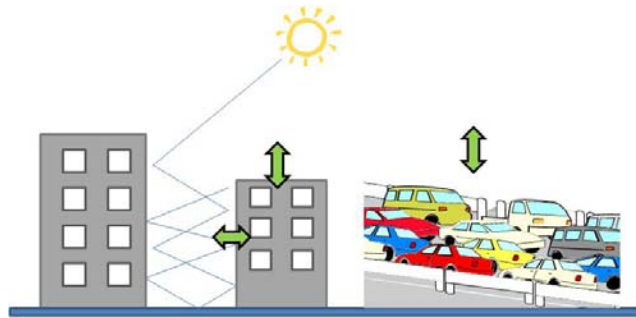


Figura 3.4 Esquema de los flujos de calor presente en una zona urbana, las flechas verdes son los calores sensibles que es emitido hacia la atmósfera las edificaciones, pavimentos, etc. y los antropogénicos como automóviles en este caso (Martilli, 2000).

La ecuación usada por MM5 es la siguiente:

$$\frac{\partial \rho(\theta_L)}{\partial t} = R_\theta$$

La utilizada por uMM5 es:

$$\frac{\partial \rho(\theta_L)}{\partial t} = R_\theta + D_\theta + A_\theta$$

donde  $\theta_L$  representa la temperatura potencial agua líquida [  $\theta_L = \theta - Lq_L / (C_p \pi)$  ] donde  $\theta$  es la temperatura potencial,  $L$  es el calor latente de evaporación,  $\pi$  es la función de presión de Exner,  $q_L$  la razón de mezcla agua-vapor, y  $C_p$  calor específico del aire],  $R_\theta$  representa los términos de fuerza real en la ecuación. El término  $D_\theta$  corresponde el calor sensible de las azoteas y vegetación, y  $A_\theta$  es el calor antropogénico emitido por ejemplo, vehículos, calefacción/enfriamiento residencial, etc. Obsérvese que la ecuación empleada por MM5 no parametriza los flujos de calores de una zona urbana (  $D_\theta, A_\theta$  ), y uMM5 si los incluye en su ecuación.

### Balance de energía radiativa

Para representar los efectos de la urbanización en la radiación solar, el modelo uMM5 realiza un balance energético tomando en cuenta el albedo, el impacto geométrico debido al “efecto cañón”, entre otros, ver figura 3.5. MM5 solo toma en cuenta la incidencia de la radiación solar, el albedo, y la emisividad, sin parametrizar los efectos que provocan la urbanización.

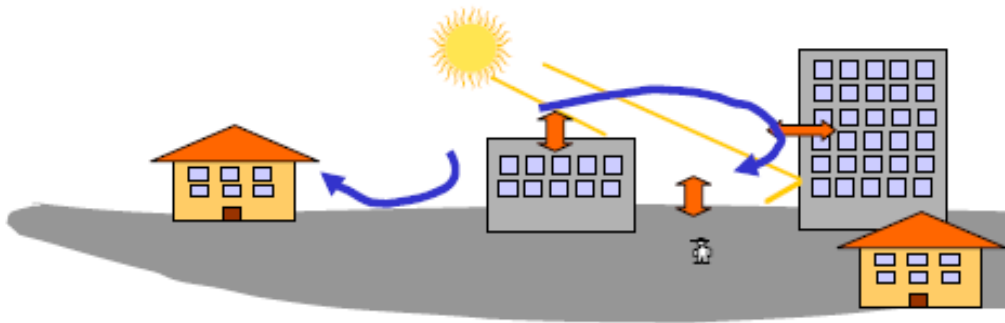


Figura 3.5 Esquema del balance de energía en muchas superficies con diferentes propiedades térmicas. Reflexiones múltiples en cañones urbanos por efecto de la radiación solar (Martilli, 2000).

La radiación neta inicialmente fue usada en superficies de vegetación y fue extendida para superficies urbanas (Dupont *et al.*, 2004). La ecuación correspondiente es:

$$R_{nj}(k) = [(1 - \alpha_j)R_G(k_{top}) - \varepsilon_j \sigma (T_{sj}(k)^4 - \varepsilon_a T(k+1)^4)] \times \exp \left[ \frac{-k_{ex} \sum_{p=k+1}^{k_{top}} [\sum_i f_i A_{pi}(p)] \Delta z(p)}{|\cos Z_\theta|} \right]$$

donde  $j$  e  $i$  son el conjunto de superficies urbanas como por ejemplo; edificios, pavimentación, y vegetación.  $R_G$  es la radiación solar directa y difusiva,  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann,  $\alpha_j$  y  $\varepsilon_j$  la albedo y la emisividad de la superficie,  $\varepsilon_a$  y  $T$  la emisividad del aire y la temperatura,  $k_{ex}=1.5$  el coeficiente de extinción radiativa, y  $Z_\theta$  el ángulo de zenit.

La implementación y codificación de todas estas parameterizaciones en uMM5, se localiza dentro de la subrutina del modelo llamada GSPBL (Gayno Seman Planetary Boundary Layer) (Dupont, 2004).

Este modelo fue implementado en la Ciudad Universitaria, un área reducida de la Ciudad de México que nos permite manejar la información necesaria para utilizar uMM5. Parte de la metodología fue seleccionar la zona de estudio que a continuación describimos.

### **3.2 Selección de la zona de estudio**

La selección de la zona de estudio dentro de la Ciudad de México se basó en la facilidad de obtener la morfología urbana necesaria para el modelo uMM5, eligiéndose el campus de Ciudad Universitaria, ver figura 3.6. Esta zona incluye dos diferentes tipos de suelo de interés para el caso de estudio. La primera es un área urbana que corresponde al centro cultural de C.U., con edificaciones con altura promedio de 25m, áreas pavimentadas y calles. La segunda es un área rural (jardín urbano) que comprende la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) que incluye desde pastizales hasta árboles de altura promedio de 10m. Estas zonas se muestran en la figura 3.7.



**Figura 3.6** Localización de Ciudad Universitaria. En el recuadro rojo se muestra la zona de la Ciudad Universitaria.

Así mismo en estas zonas se realizó una campaña de monitoreo atmosférico del 17 al 22 de febrero del 2006, correspondiente a la temporada de invierno seco. De esta manera se podrían observar capas de inversión durante las primeras horas del día y el desenvolvimiento de las variables meteorológicas en estos dos sitios.



**Figura 3.7** Zona de mediciones de parámetros meteorológicos, 1) zona correspondiente al Jardín Botánico que representa la parte jardín urbano, 2) zona correspondiente a la zona cultural que representa la parte urbanizada.

### **3.3 Campaña de monitoreo atmosférico**

La campaña se llevo a cabo del 17 al 22 de febrero del 2006, en la que se instaló sobre el techo de uno de los edificios de la zona cultural una estación meteorológica Davis (Figura 3.8).



**Figura 3.8 Estación meteorológica DAVIS ubicada en la zona urbanizada. La foto de la izquierda corresponde al edificio que en su parte superior se instaló la estación Davis que como se observa en la foto de la derecha cuenta con una veleta, anemómetro, sensor de humedad y pluviómetro.**

En el Helipuerto que se ubica dentro del jardín urbano, donde se fijó la unidad móvil del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), que cuenta con su estación meteorológica (Figura 3.9).



**Figura 3.9 Estación meteorológica de la unidad móvil del CCA situada en el helipuerto, se observa en la foto de la izquierda la zona del helipuerto, en la derecha la unidad móvil y su instrumentación.**

También durante estos días en las horas de 6 a 10 am, se lanzaron sondas cautivas equipadas con barómetro, anemómetro, termómetro y veleta. Dichas sondas fueron lanzadas al mismo tiempo en las dos zonas (Figura 3.10).



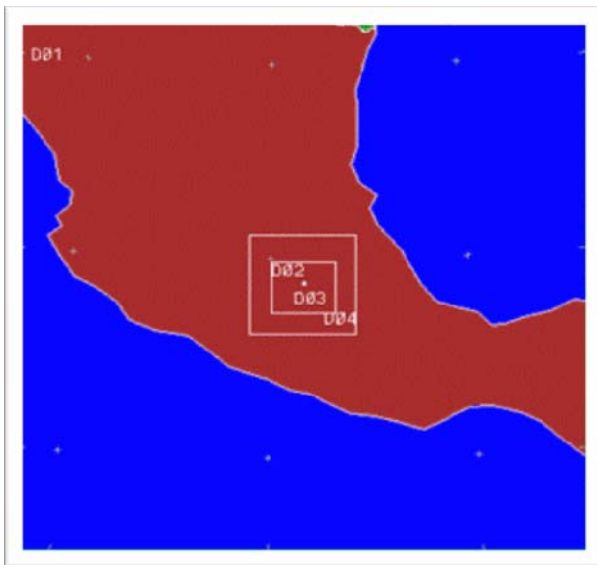
**Figura 3.10 Sonda cautiva empleada en ambas zonas, apréciase la instrumentación que cuenta con una veleta, sensores de temperatura, humedad y anemómetro.**

### ***3.3 Configuración del modelo***

La configuración empleada en los modelos para el caso de estudio con un énfasis en el aspecto meteorológico se describe a continuación.

Se utiliza la estrategia de dominios anidados (Figura 3.11), donde MM5 usa tres dominios mientras que uMM5 es usado solamente para el dominio interior de alta resolución, ver Tabla 3.1.





**Figura 3.11** Dominios de simulación, donde el dominio 1 tiene una resolución de 27 km, dominio 2 de 9 km, dominio 3 de 3 km, y el dominio 4 de 0.5 Km.

**Tabla 3.1** Dominios de simulación.

Dominio	X	Y	resolución (Km)	Modelos
1	60	60	27	MM5
2	34	34	9	
3	52	61	3	
4	7	7	0.5	uMM5

En los dominios de simulación del 1 al 3 se emplea 24 niveles sigma (niveles de presión con respecto a la superficie) con el nivel sigma mas bajó a una altura aproximada de 10 m. En el domino 4 se usaron 49 niveles sigma para mayor resolución cerca de la superficie. También se emplean datos globales meteorológicos, NCEP/NCAR para el mes de febrero con promedio de 6 horas de análisis final.

Las opciones seleccionadas para MM5 son:

- Esquema de cúmulos Grell para los 4 dominios, esquema empleado para mallas con resoluciones menores a 30 km.
- Esquema de radiación RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) en dominios 1 a 4, representa los efectos detallados del espectro de absorción, tomando en cuenta vapor de agua, dióxido de carbono, y ozono.
- Esquema de capa limite y difusión, ETA PBL en dominios 1 a 3, predice la energía cinética (TKE) y el mezclado vertical local.
- El esquema SM2-U incluido en el modelo urbanizado (uMM5) solo para el dominio 4, incluye las parametrizaciones de la morfología urbana.

- Esquema de capa limite Gayno-Seaman (únicamente para uMM5) en dominio 4, al igual que el esquema ETA se distingue por que opera adecuadamente en condiciones de humedad saturada.

Las siguientes propiedades de superficie asignada para cada categoría de uso de suelo (LU) y cobertura (LC) en los dominios 1-3 están internamente establecidas en el modelo:

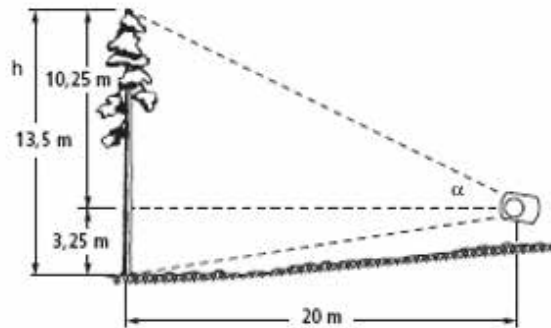
- Dominio 1-3: altura topográfica USGS (1.0, 0.5, 0.16, 0.08 grados de resolución)
- Dominio 1-3: esquema de 24 categorías de LU/LC USGS modificadas para la Ciudad de México (García, 2000).
- Esquema de 38 categorías correspondientes a LU/LC, únicamente en uMM5.

Para los datos de entrada del cuarto dominio, en ciertas zonas donde la morfología urbana es compleja de obtener manualmente, se toman datos de la zona urbana de Houston (Dupont *et al.*, 2004), acoplándolo a la zona en estudio considerando de que son estructuralmente similares.

A continuación se listan los datos acoplados y medidos de forma manual:

- Distribución de las diferentes coberturas para superficies pavimentadas, vegetación y azoteas.
- Porcentaje de superficies pavimentadas/áreas impermeables conectadas a la red de drenaje.
- Alturas promedio de los edificios y de la vegetación.
- Razón total del área de la superficie de la pared entre el área de cada celda.
- Razón entre la altura y ancho de los edificios.
- Densidad del área frontal de los edificios y la vegetación.
- Densidad del área de los techos de los edificios y vegetación.
- Densidad del área de los costados de los edificios y vegetación.

Para los datos de la zona del Centro Cultural, y de la Reserva Ecológica, como las alturas de los edificios y la vegetación se empleo un clinómetro Suunto PM-5/1520 su funcionamiento se basa en medir el ángulo de inclinación desde un punto fijo hasta el techo del edificio o árbol (Figura 3.12).



**Figura 3.12 Ejemplo de la utilización del clinómetro.**

Y empleando la relación trigonométrica siguiente se obtiene la altura real:

$$H = h \times \tan (\alpha)$$

Donde H es la altura real o corregida, h es la distancia entre el objeto y el punto de medición, α (alfa) es el ángulo de la pendiente del terreno.

Empleando el software Google Earth (Figura 3.13) se obtienen los datos restantes como son el ancho y largo de los edificios, el área de edificios y vegetación, así como identificar el tipo de uso de suelo en la zona.



**Figura 3.13 Edificios de la zona de estudio los recuadros en blanco representa como fueron representados los edificios en ancho y largo en la generación de los archivos de entrada para uMM5.**

Con los datos medidos y acoplados, se generaran los archivos de entrada para uMM5 los, que se enlistan a continuación:

- VEGCAT: porcentaje de área de uso de suelo en cada celda del dominio.
- LANDCOVER: porcentaje de tipo de suelo (pavimentado, azoteas, vegetación, cuerpos de agua) en cada celda del dominio.
- FRONT\_BUI: área frontal promedio de los edificios por celda.
- TOP\_BUI: altura promedio de los edificios por celda.
- PLAN\_BUI: área transversal promedio de los edificios por celda.
- FRONT\_VEG: área frontal promedio de la vegetación por celda.
- PLAN\_VEG: área transversal promedio de la vegetación por celda.
- TOP\_BUI: altura promedio de la vegetación por celda.

- GRID: razón entre altura y ancho de los edificios, razón total del área de la superficie de la pared entre el área de cada celda, razón del área total de las azoteas, pavimentaciones, aceras, etc., conectadas al alcantarillado, y la altura media de los edificios.

Las corridas del modelo MM5 son realizadas en una estación de trabajo del CCA con plataforma Linux y compilado en Intel fortran, mientras que u-MM5 fue implementado en la computadora central de un clúster de la sección de modelos climáticos del CCA con una plataforma Linux y compilado en Portland Group Fortran 90.

La parte importante de este estudio radica en la evaluación cualitativa y cuantitativa de los resultados obtenidos de las modelaciones, la evaluación cualitativa se realiza mediante la observación de las graficas donde se comparan los resultados de los modelos con las mediciones, y para evaluar cuantitativamente el desempeño de los modelos se aplica métricas estadísticas a los resultados.

### **3.4 Evaluación cuantitativa del desempeño de los modelos**

Para evaluar el desempeño del modelo se utilizaron métricas estadísticas como es la desviación estándar ( $\sigma$ ), error cuadrático medio (RSMD) e índice de concordancia (Ic). En un estudio realizado por Willmott para la evaluación de modelos numéricos concluye que estas son las adecuadas para dicho fin (Willmott, 1981).

Las métricas estadísticas se definen a continuación:

1. La desviación estándar ( $\sigma$ ).

$$\sigma_p = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 \right]^{1/2} \quad \sigma_o = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2 \right]^{1/2}$$

Donde  $\sigma_p$  y  $\sigma_o$  son las desviaciones estándar de los datos predichos y observados respectivamente, refiriéndome a datos predichos a los que son obtenidos de la modelación y datos observados aquellos arrojados por los equipos de medición, para un parámetro o

contaminante dado en las N ubicaciones o puntos de monitoreo. Los parámetros  $p_i$  y  $o_i$  fueron tomados como promedio por hora para cada punto o estación de monitoreo, donde  $\bar{p}$  y  $\bar{o}$  son los valores de las medias para las N ubicaciones. La desviación estándar muestra la distribución de los datos con respecto a la media, mientras más aproximada sea la  $\sigma_p$  a la  $\sigma_o$  el desempeño del modelo es alto.

2. El RMSD (root-mean-square-difference), es la raíz cuadrática de las diferencias medias entre los valores predichos y los observados. Se usa la formula:

$$RMSD = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2}$$

Con estas herramientas se puede determinar que el nivel de acierto del modelo, es considerado alto si la desviación estándar de los datos de predicciones similar y RSMD es menor a la desviación de los datos de observación

3. El índice de concordancia ( $I_c$ ) se define como:

$$I_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p_i - \bar{p}| + |o_i - \bar{o}|)^2}$$

Este índice compara las salidas de los valores de predicción con los valores observados. El rango posible para este índice es de 0 a 1, siendo el valor de 1 una concordancia perfecta.

## **Capítulo 4: Resultados**

### ***4.1 Días de simulación***

Se realizó una campaña del 17 al 22 de Febrero 2006. De acuerdo con un análisis preliminar de los resultados, los días que se estudiaron y modelaron fueron el 20, 21 y 22 de febrero. Esto debido a que los primero dos días los equipos de medición presentaron errores de lectura. A continuación se describen las condiciones meteorológicas sinópticas de los días estudiados y modelados.

### ***4.2 Condiciones sinópticas***

Las condiciones meteorológicas sinópticas para los días 20, 21 y 22 de febrero, indican la presencia de un sistema de alta presión sobre el Golfo de México provocando circulación anticiclónica. Estos sistemas son típicos en la temporada de invierno y son condiciones críticas para la poca dispersión de contaminantes al generar velocidad de vientos muy bajos y una atmósfera estable. Con el transcurso del día, la advección provocada por el calentamiento de la superficie debido a la radiación solar rompe esta estabilidad. Se presentan cielos despejados, y las condiciones meteorológicas presentes en la zona de CU son locales, permitiendo flujos de valle-montaña (Figura 4.1). Las figuras son visualizadas del modelo MM5, y la dinámica de los vientos solo son afectadas por las corrientes de aire provenientes de los polos (aire frío) o del trópico (aire caliente), al ser meteorología a escala global estas son bien representadas por el modelo.

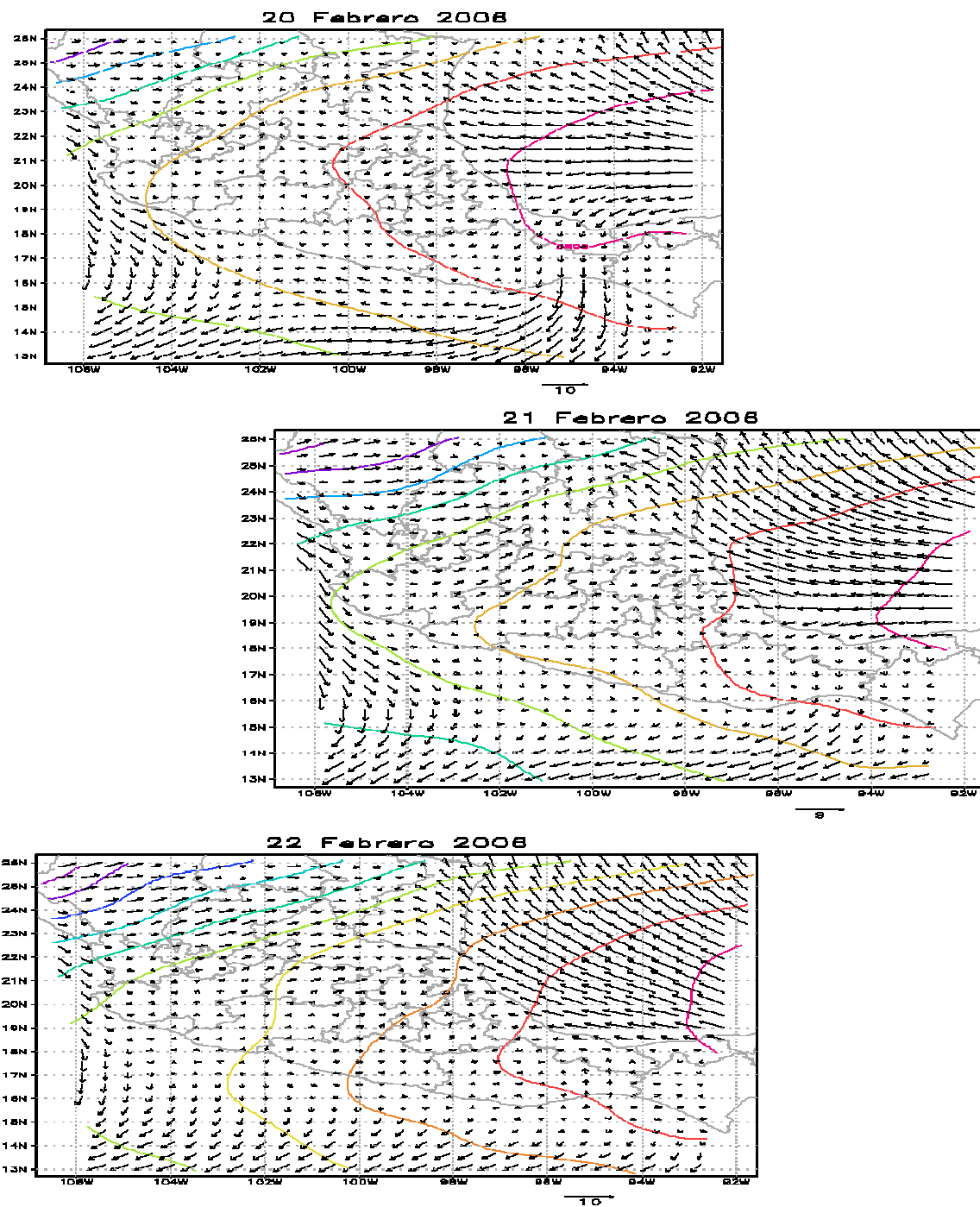


Figura 4.1 Condición sinóptica a 500 mb para los días 20, 21 y 22 de febrero promediado de las 6 a 12 hrs.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la campaña de monitoreo atmosférico en la zona urbana y la del jardín urbano



### 4.3 Resultados de la campaña de monitoreo atmosférico

En la figura 4.2 se muestran las lecturas de temperatura horarias en las dos zonas. Nótese como a las 7:13 LST la zona del jardín urbano es la más fría por 1° C, y las temperaturas van aumentando con forme pasan las horas debido al calentamiento por radiación solar en la superficie. La diferencia en temperaturas captadas por las mediciones idealmente debe ser reproducida por el modelo..

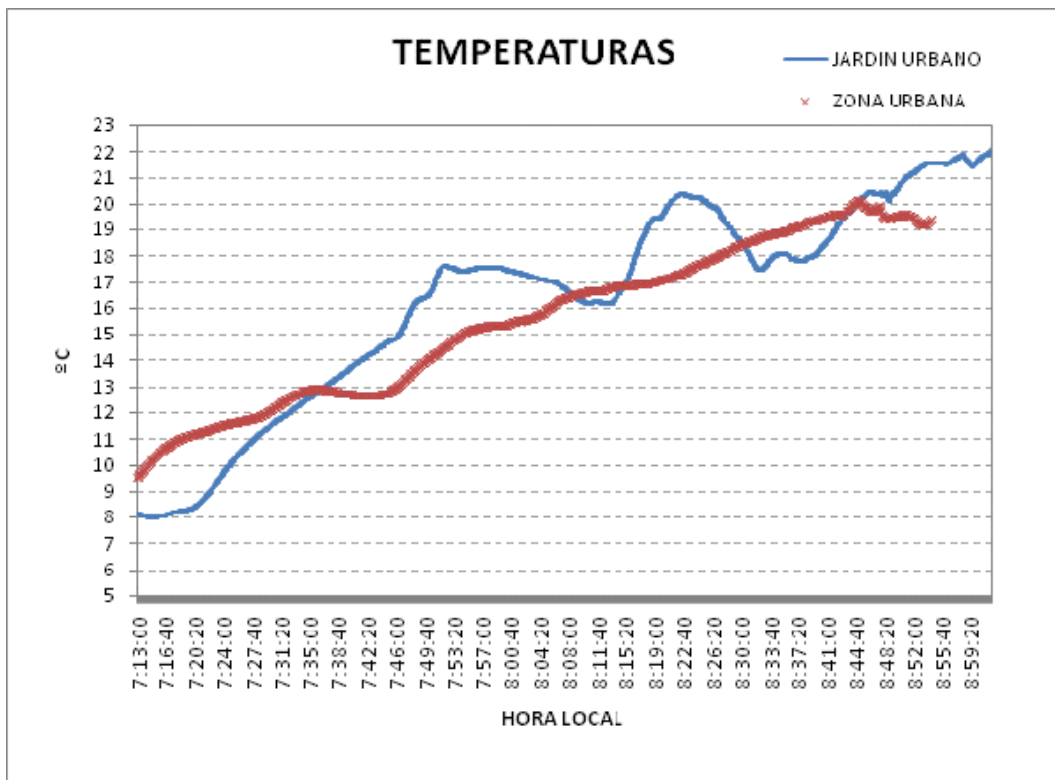
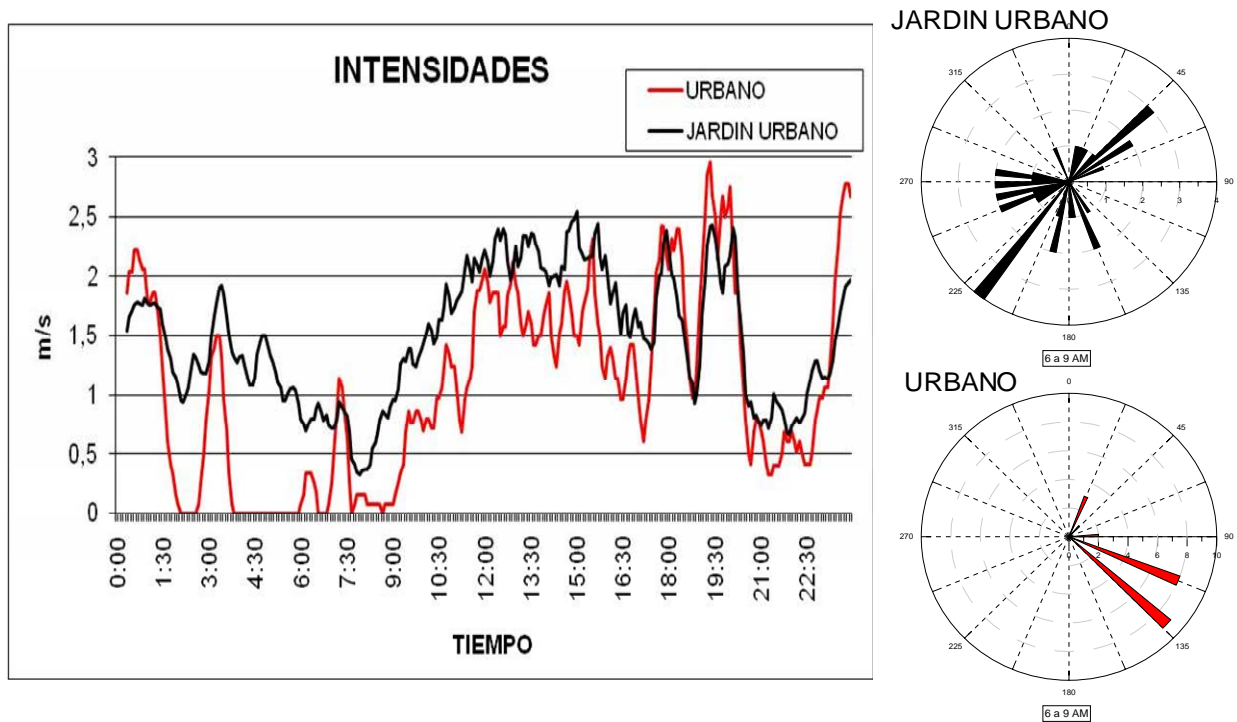


Figura 4.2 Gráfica de temperatura contra tiempo, la línea rosa representa la temperatura de la zona urbana y la línea azul es la correspondiente al jardín urbano, para las horas de 6 a 9 am donde observamos la diferencia de 1 a 1.5°C entre cada zona y siendo la zona del jardín urbano más fría que la zona urbana.

En lo que respecta a la intensidad de los vientos, los anemómetros empleados en las sondas cautivas no funcionaron por lo que no se tienen mediciones en la vertical. Los equipos a nivel de superficie tuvieron buena respuesta, como se muestra en la figura 4.3.



**Figura 4.3 Intensidades y dirección de vientos observados en las dos zonas de estudio.**

Apréciase que a partir de las 6:00 hrs. en la zona urbanizada las velocidades de los vientos provenientes de la montaña hacia el valle indicadas por las rosa de vientos, son reducidas debido al arrastre por la presencia de las edificaciones. Las velocidades van de 0 hasta 1.3 m/s en estas horas, en el jardín urbano al no existir estos obstáculos, los vientos son constantes y alcanzan velocidades entre 0.5 y 2 m/s.

A partir de las 20:00 hrs., se observan picos en la zona urbana que sobrepasan las velocidades del jardín urbano. Estas diferencias son esperadas porque en la noche la rugosidad no solo genera más turbulencia si no también fuerza a la atmósfera haciéndola menos estable. Aunado a esto, las actividades urbanas, edificaciones, pavimentos, etc., que retienen calor por el día y es liberado por la noche (emisividad), provocando advección de la capa rompiendo así la estabilidad de la atmosfera en esta zona.

#### 4.4 Problemas de ejecución del modelo uMM5

Los problemas en la implementación del modelo son principalmente en la compilación. Se modificaron las banderas de compilación para el lenguaje Portland Group Fortran 90 (PGF90) y esto se realiza en el archivo del modelo llamado *configure.user*. En este archivo también se especifica en número de celdas y los niveles sigma del dominio de alta resolución, quedando de la siguiente forma:

```
SHELL = /bin/sh
.SUFFIXES: .F .i .o .f
RUNTIME_SYSTEM = "PC_PGF77"
LIBINCLUDE = ${DEVTOP}/include
FC = pgf90
FCFLAGS = -g -I${LIBINCLUDE} -O2 -Mcray=pointer -tp p6 -pc 32 -Mnoframe
-byteswapio
CPP = /lib/cpp
CFLAGS = -O
CPPFLAGS = -I${LIBINCLUDE}
LDOPTIONS = -g -O2 -Mcray=pointer -tp p6 -pc 32 -Mnoframe -byteswapio
LOCAL_LIBRARIES =
MAKE = make -i -r
#-----
-----
AR = ar ru
RM = rm -f
RM_CMD = $(RM) *.CKP *.ln *.BAK *.bak *.o *.i core errs ,* *~ *.a \
.emacs * tags TAGS make.log MakeOut *.f !
GREP = grep -s
CC = cc
#-----
-----
#
# FDDAGD (integer) - "1" -> FDDA gridded run
FDDAGD = 0
#
# FDDA OBS (integer) - "1" -> FDDA obs run
FDDA OBS = 0
#
# MAXNES (integer) - Max Number of Domains in simulation
MAXNES = 1
#
# MIX, MJX (integer) - Maximum Dimensions of any Domain
MIX = 7
MJX = 7
# MKX (integer) - Number of half sigma levels in
model
MKX = 48
```

1

2

3

Figura 4.4 Estructura del compilador *configure.user*

donde 1 corresponde a las banderas de compilación del lenguaje PGF90, 2 los comandos propiamente del modelo que no se modifican, y 3 que indica las dimensiones del dominio a utilizar (*MIX, MJX, MKX*).

En la generación de los archivos de entrada se tuvo la necesidad de generar una rutina externa compilada en Fortran, para crear y acoplar los archivos correspondientes para uMM5. La estructura es la siguiente:

```

PROGRAM DATOS
REAL, ALLOCATABLE :: landco(:,:,:), LANDCOVER(:,:,:), LAND(:,:),LAN(:,:)
integer i,j,n
real k
!
!
!-----ARREGLO PARA LANDCOVER-----
!
print *, 'landcover'
OPEN (7, FILE='fort.7', form='unformatted', STATUS='OLD')
open (2, file='landcover', status='unknown',
action='write',form='unformatted')
n=5
allocate (LANDCOVER(133,141,n))
allocate (landco(7,7,n))
READ (7) LANDCOVER
do i= 1,7
do j= 1,7
do k=1,n
landco(i,j,k)=0.0

landco(1,1,1)=0.1
landco(1,1,2)=0.85
landco(1,1,3)=0.05
landco(1,2,1)=0.1
landco(1,2,2)=0.6
landco(1,2,3)=0.3
landco(1,3,1)=0.4
landco(1,3,2)=0.5
landco(1,3,3)=0.1

end do
end do
end do
write (2)landco
deallocate (LANDCOVER, landco)
close (7)
close (2)

```

Figura 0.5 Código fuente para acoplar e ingresar los datos en los archivos de entrada de uMM5.

Este solo es una parte del código fuente. Nótese que los datos para el modelo son colocados celda por celda a lo largo del dominio 4 y esto se realiza para todos los archivos de entrada.

#### **4.5 Resultados de la simulación**

Una vez implementado el modelo, se procedió a acoplarlo para la zona de estudio. Siguiendo el diagrama ejecución del modelo, ver figura 3.1, en primera instancia se visualizaron los

resultados del primer módulo del modelo (Terrain). El dominio 4 no captaba la elevación presente en la zona, que corresponde a un cerro de una altura aproximada de 150 mts, por lo que se modificó el dominio para incluir esta elevación, quedando como se muestra en la figura 4.6.

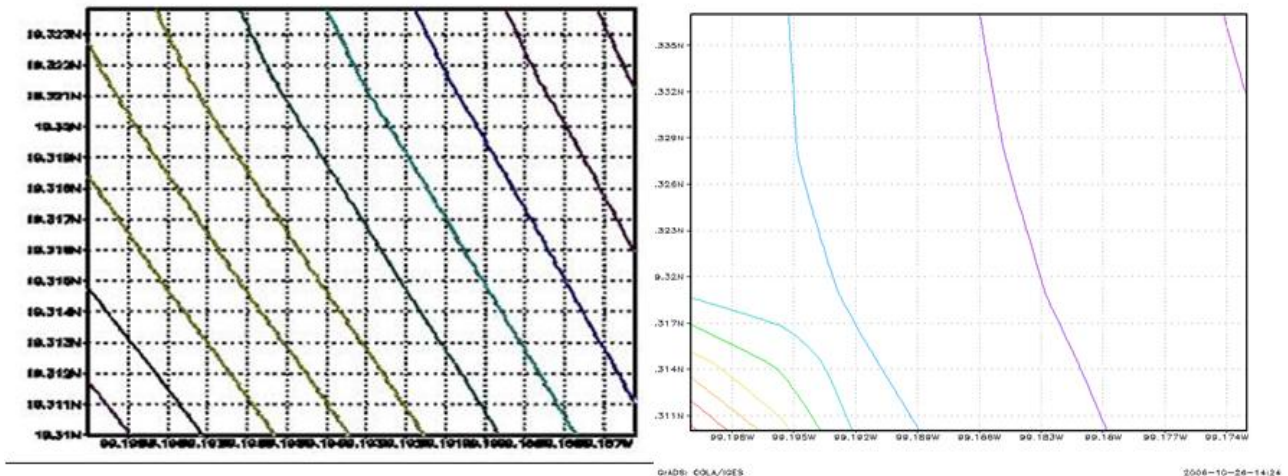


Figura 4.6 Terreno modificado, de la lado izquierdo se aprecia el terreno sin modificar, y del lado derecho el terreno modificado donde la elevación introducida se aprecia en la parte inferior izquierda.

En el mismo módulo se realizó el cambio en el uso de suelo detallando la zona de estudio, basándose en la tabla de uso de suelo de 38 categorías (ver Anexo) la cual contempla 8 categorías urbanas y 30 categorías de vegetación. Se realizaron las corridas correspondientes, y los resultados se describen a continuación.

#### 4.5.1 Velocidades de vientos en la zona urbana

Para la zona urbana se obtienen las gráficas de velocidad del viento modeladas usando MM5 y uMM5, así como las medidas que se aprecian en las figuras 4.7,4.8 y 4.9. En la figura 4.7 se promedian los resultados cada 5 minutos, en la figura 4.8 el promedio se realiza cada 20 minutos y en la figura 4.9 cada hora.

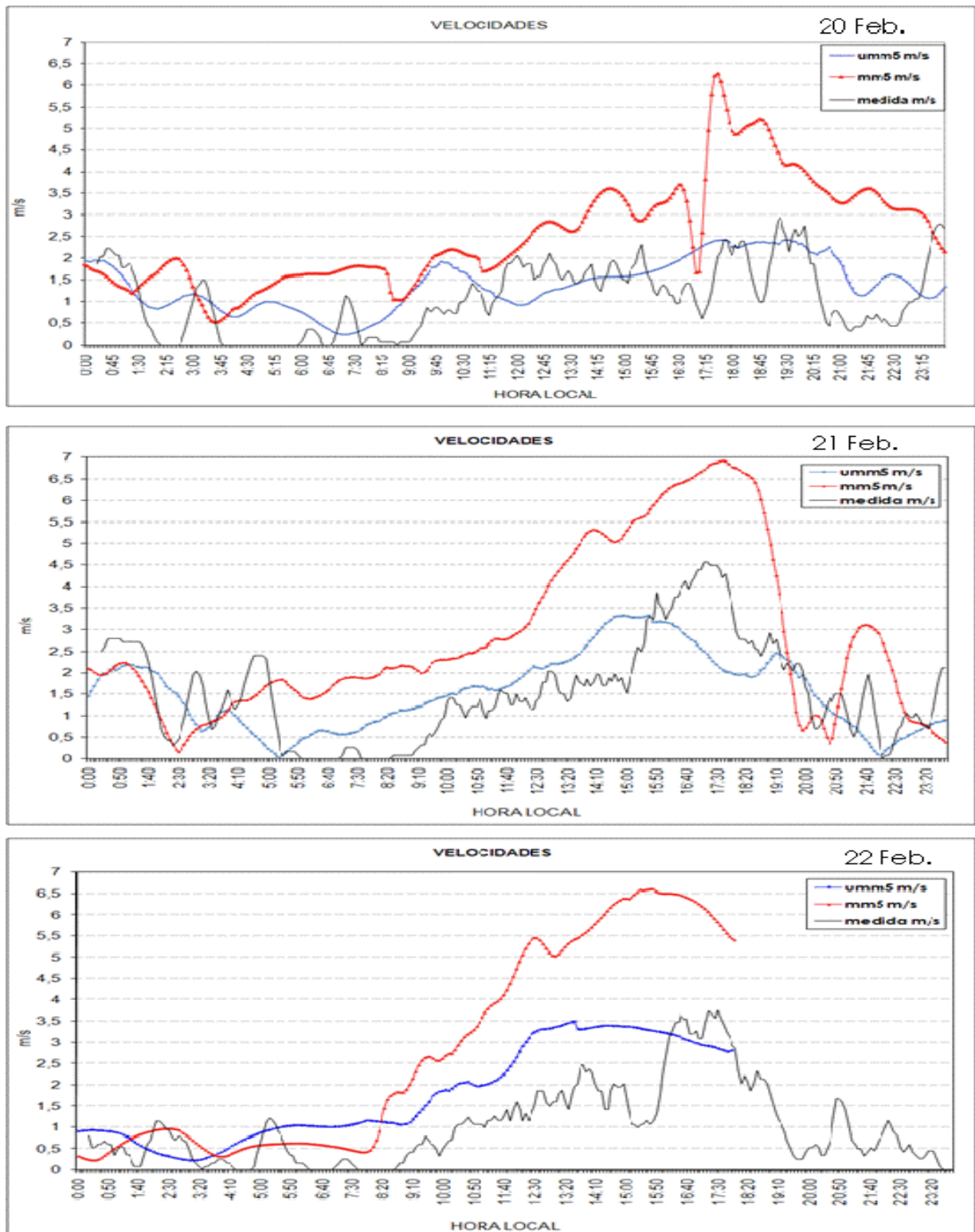


Figura 4.7 Variación horaria de las velocidades de los vientos modelados por MM5 línea roja, por u-MM5 línea azul y medidos línea negra. Se promedia cada 5 minutos en la zona urbana para los días 20,21 y 22 de febrero respectivamente.

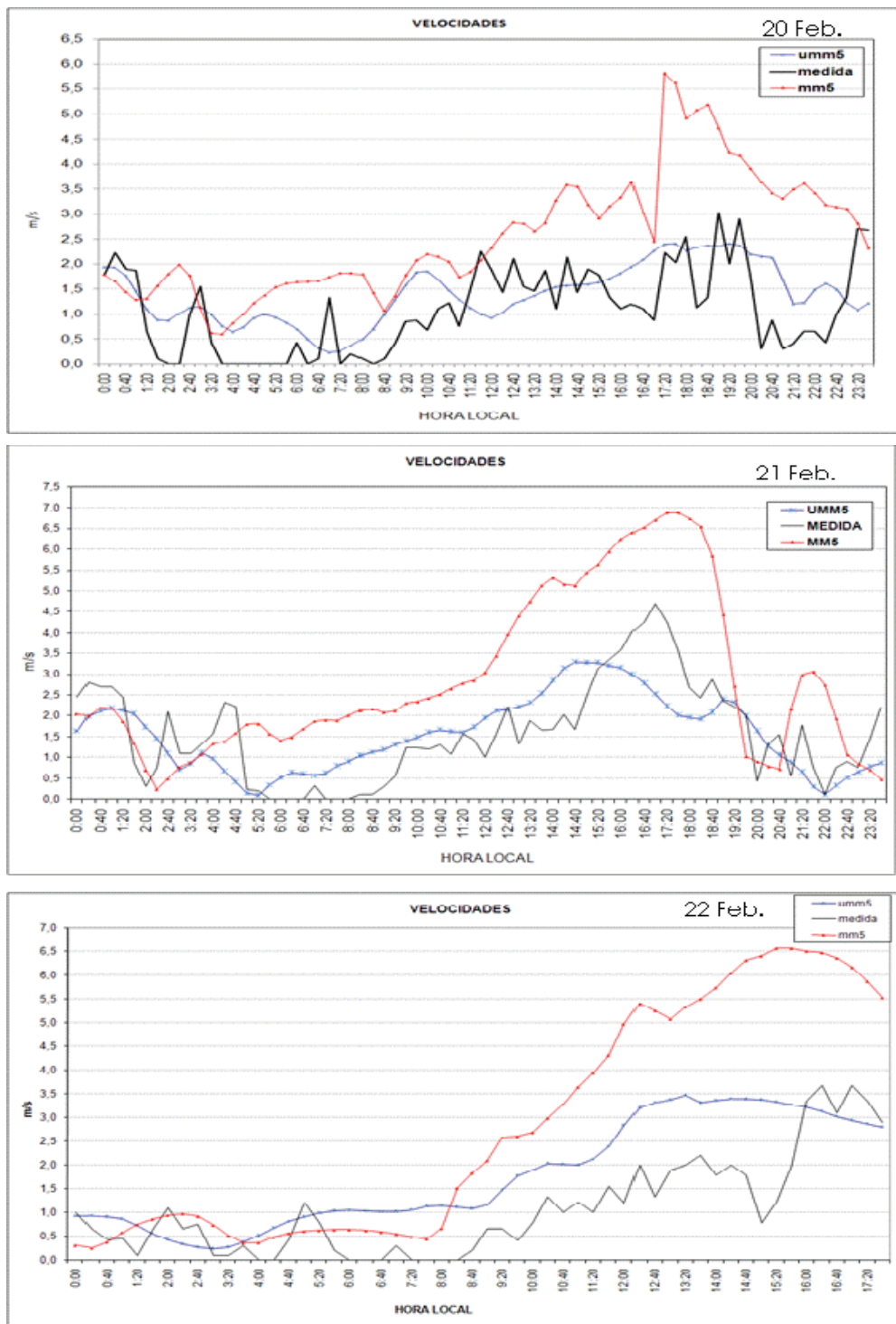


Figura 4.8 Variación horaria de las velocidades de los vientos promediados cada 20 minutos en la zona urbana para los días 20,21 y 22 de febrero respectivamente.

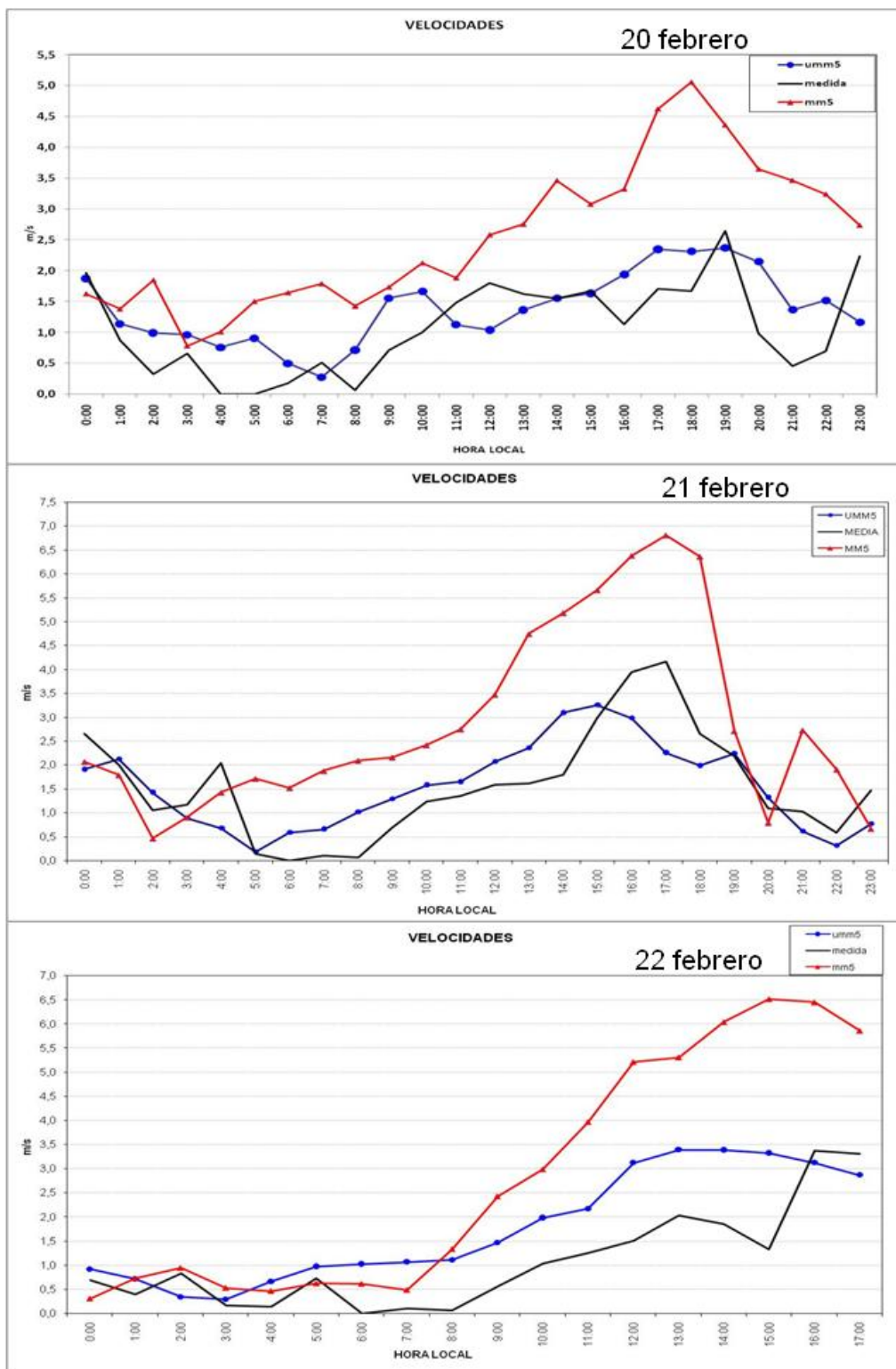


Figura 4.9 Variación horaria de las velocidades de los vientos promediados cada hora en la zona urbana para los días 20,21 y 22 de febrero respectivamente



Para las gráficas correspondientes al día 20 de febrero de la figura 4.9, observamos que en las primeras horas de simulación los modelos MM5 y uMM5 tienen un comportamiento similar a las mediciones, pero conforme va avanzando el tiempo se observa una discrepancia entre los valores arrojados por MM5 (línea roja) y los medidos (línea negra). Esto se atribuye a que MM5 no incluye parametrización detallada de la morfología urbana, mientras que uMM5 (línea azul) que al incluirlos, los resultados arrojados tienden a los valores medidos. Para los días 21 y 22 de febrero se presentan las mismas tendencias.

La finalidad de promediar los datos cada 20 minutos y cada hora son con el objetivo de suavizar las señales, además de que son los promedios comúnmente empleados para diferentes estudios. En las gráficas correspondientes a estos casos se observa con mayor claridad las tendencias antes descritas.

#### **4.5.2 Velocidad de viento el Jardín urbano**

Nótese que no se tienen resultados para el día 22 de febrero en la zona del jardín urbano, esto debido a una falla eléctrica en la zona y los equipos no cuentan con energía de respaldo los datos se perdieron. En las gráficas de la figura 4.10 se presenta la distribución horaria de las velocidades de los vientos promediados cada hora, en la zona del jardín urbano

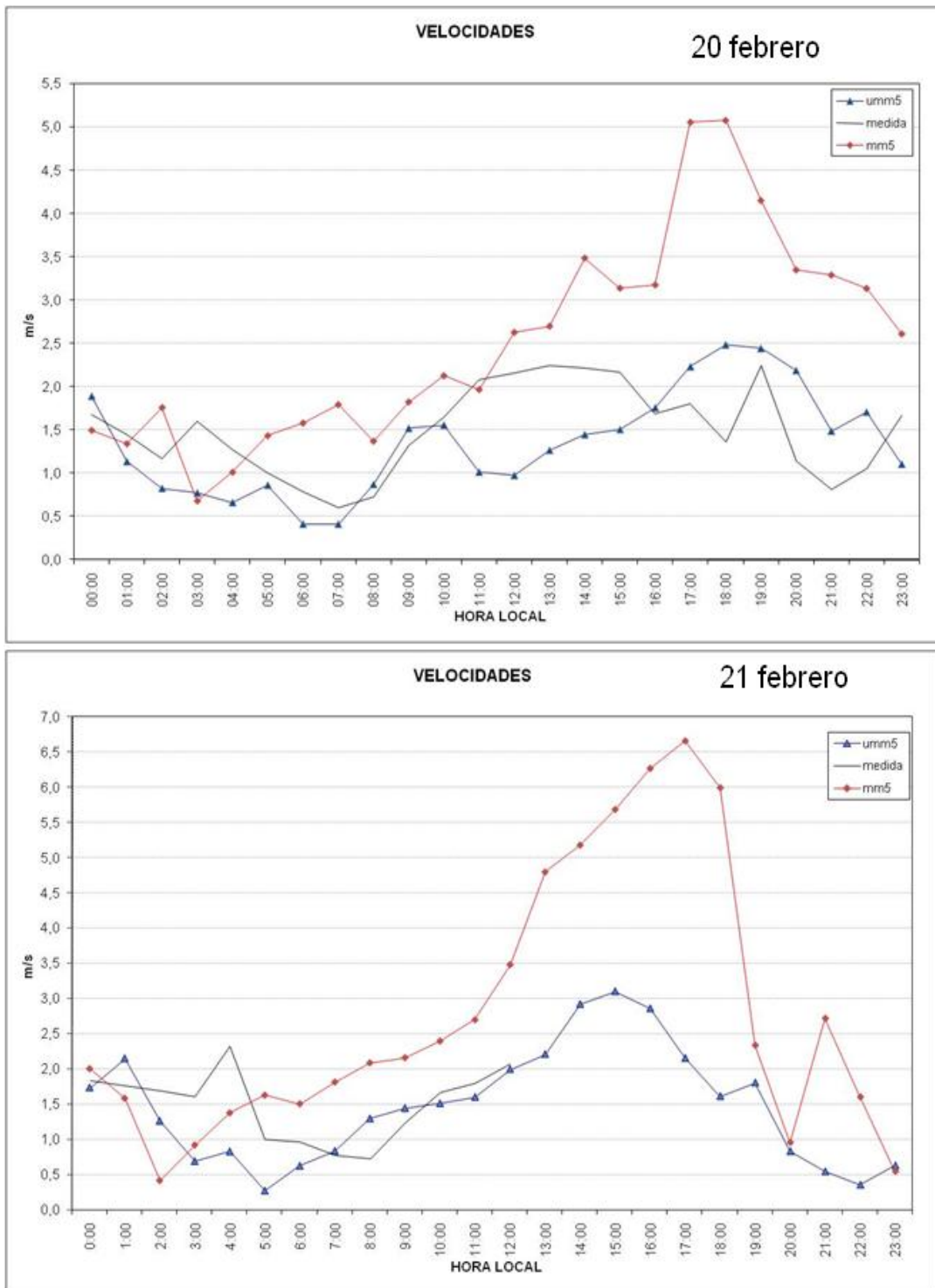


Figura 4.10 Comparación de las velocidades de vientos modelados con uMM5/MM5 y los observados en el jardín urbano, para los días 20 y 21 de febrero del 2006 respectivamente.

### 4.5.3 Evaluación cuantitativa de los resultados de velocidades de viento en la zona urbana y el jardín urbano

Para cuantificar el desempeño de MM5 y uMM5, se aplicaron las métricas estadísticas de acuerdo a lo descrito en el capítulo 3 sección 3.4, a los resultados de los datos promediados cada hora, resumiéndolos en la tabla siguiente:

**Tabla 4.1 Métricas estadísticas en la zona urbana para las intensidades de viento promediadas cada hora.**

DIA	MODELO	Ic	$\sigma_{pred}$	RMSD	MAX.	MIN.	PROM.
20 Febrero	MM5	0.48	1.17	1.735	5.054	0.781	2.545
	uMM5	0.74	0.58	0.648	2.367	0.278	1.385
	Mediciones		0.75		2.42	0.175	1.080
21 Febrero	MM5	0.66	1.94	1.861	6.813	0.464	2.860
	uMM5	0.84	0.89	0.740	3.256	0.187	1.554
	Mediciones		1.13		4.167	0.108	1.569
22 Febrero	MM5	0.59	2.45	2.383	6.518	0.305	2.821
	uMM5	0.79	1.15	0.984	3.393	0.291	1.775
	Mediciones		1.03		3.375	0.100	1.077

Se observa como uMM5 mejora todas las métricas estadísticas. Para MM5 el índice de concordancia (Ic) oscila entre 0.48 a 0.66, mientras que para uMM5 oscila entre 0.74 a 0.84, con una desviación y un RMSD menor a la desviación observada, esto indica que los datos predichos tienden a los observados, mientras que para MM5 sus desviaciones estándares y los RMSD son mayores a las observadas, mostrando una clara sobreestimación. Para el jardín urbano la evaluación estadística obtenida se describe en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2 Métricas estadísticas en la zona urbana para las intensidades de viento promediadas cada hora.**

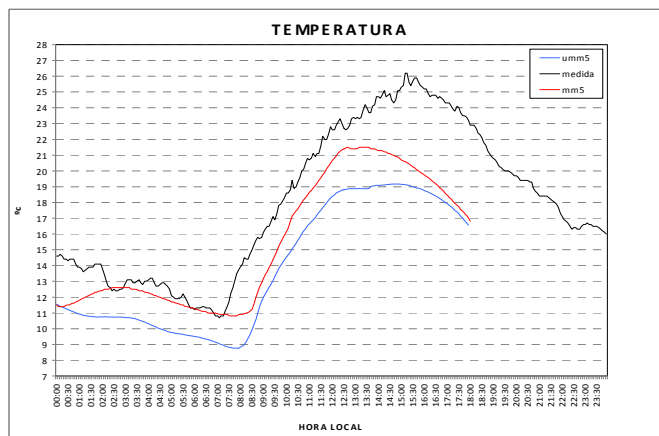
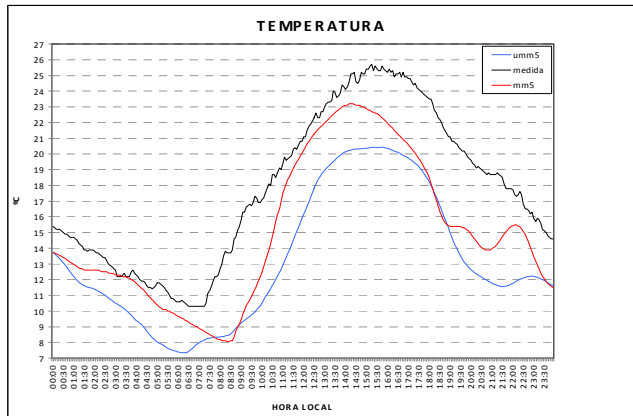
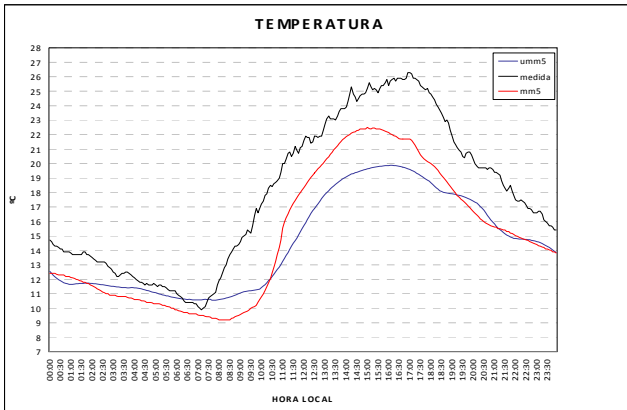
DIA	MODELO	Ic	$\sigma_{pred}$	RMSD	MAX.	MIN.	PROM.
20 Febrero	MM5	0.409	1.212	1.575	6.301	0.445	2.506
	uMM5	0.586	0.606	0.748	2.601	0.228	1.352
	Mediciones		0.631		3.496	0.267	1.496
21 Febrero	MM5	0.379	0.686	0.915	3.520	0.137	1.788
	uMM5	0.545	0.456	0.777	1.980	0.228	0.986
			0.551		2.647	0.169	1.477

Se tiene que para uMM5 el índice de concordancia oscila entre 0.5 a 0.6, la desviación y el RMSD menor a la desviación observada. Mientras MM5 el índice de concordancia oscila entre 0.3 y 0.4, con una desviación y un RMSD mayor a lo observado. Nuevamente la métrica estadística ratifica de como uMM5 se acerca más a las mediciones mientras MM5 los sobreestima

#### **4.5.4 Temperatura superficial en la zona urbana y el jardín urbano**

Ahora analizaremos los valores de temperaturas obtenidas por las mediciones y modelaciones en cada una de las zonas. En la figura 4.11 se muestran las gráficas de las temperaturas para las dos zonas modeladas.

a) Zona urbanizada.



b) Jardín urbano.

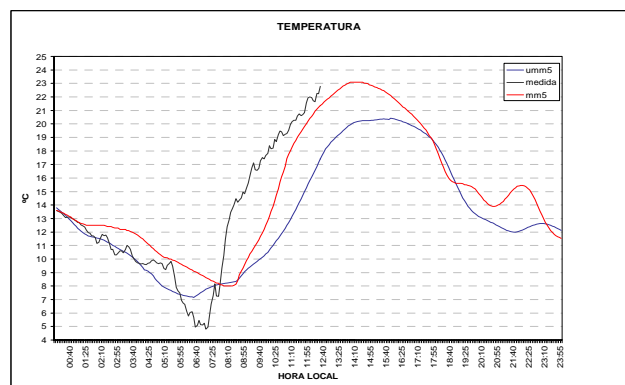
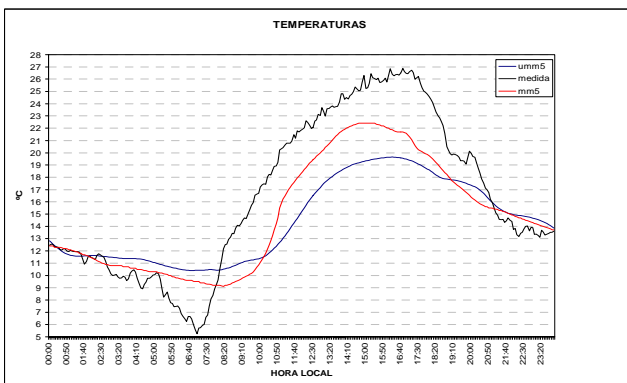


Figura 4.11 Variación horaria de la temperaturas para los días 20, 21 y 22 de febrero respectivamente, a) son las graficas correspondientes a la zona urbana y b) son las graficas correspondientes al jardín urbano.

Las graficas de temperaturas superficiales muestran los resultados de los modelos MM5 (línea roja) y uMM5 (línea azul) y podemos observar que amabas líneas están por debajo de los datos reales (línea negra).

El desfaseamiento que se presenta, para el modelo uMM5 es atribuido a que el modelo necesita datos como albedo, emisividad, coeficientes de transferencia de calor, capacidades caloríficas, etc., todo esto para cada uso de suelo y material presente en el zona, al no contar con ellos, el modelo tiene asignado los valores originales para la zona de estudio de una zona de estudio similar, en el cual los materiales empleados para las viviendas por así mencionarlo la mayor parte es madera en tanto en nuestra zona este material es concreto y las capacidades caloríficas entre cada material son diferentes, y esto ocasiona que los resultados de temperatura no sean acorde a lo observado.

Se resume que a pesar de que los parámetros para la zona del jardín urbano están elaborados por observación en campo y otros acoplados a nuestro dominio, el modelo uMM5 presentó mejor desempeño que el modelo MM5 con respecto a la variable de velocidades de vientos. Para la temperatura, al no contar con la paremetrización adecuada uMM5 genera subestimaciones en los resultados.

# Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

- El objetivo de este trabajo que fue modelar adecuadamente la meteorología de una zona urbana ha sido alcanzado por lo menos para las velocidades de viento, como se mostró al comparar cuantitativa y cualitativamente las mediciones con los resultados de la modelación.
- El modelo uMM5 tuvo un mejor desempeño que el modelo MM5 ya que el modelo urbanizado cuenta con una parametrización para un ambiente urbano y una mayor resolución. Esto se puede apreciar en los resultados obtenidos. El modelo uMM5 representa adecuadamente las velocidades de viento en una zona urbana, resolviendo este problema de la modelación con MM5.
- Al incluir en uMM5 datos de la zona de estudio de albedo, emisividad, reflectividad, humedad, calor antropogénico, entre otros, se espera que los resultados de temperatura superficial mejoren. Esto incidirán en la mejora de los resultados de otras variables como son transporte vertical turbulento, advección, bouyancia, disipación, difusividad, entre otros.

## **5.2 Recomendaciones**

- Para emplear el modelo uMM5 en la Ciudad de México, se recomienda crear una base de datos de la morfología urbana de alta resolución. Esto se debe realizar haciendo uso de herramientas como sistemas de percepción remota, cartogramas, etc.
- Se recomienda para un próximo estudio acoplar un módulo foto químico al modelo uMM5, de modo que el modelo sea capaz de emplearse como herramienta en estudios de ozono troposférico.
- También en un futuro realizar una comparación entre el modelo uMM5, y uWRF (urban Weather Research and Forecasting) que está siendo desarrollado.



## Bibliografía.

- Ackerman, T. P., 1977. "A model of the effect of aerosols on urban climate with particular attention to the Los Angeles Basin", *Journal Atmospheric Science*.
- Bornstein, R., 1972. "Two dimensional non-steady numerical simulations of nighttime flow of a stable planetary boundary layer over a rough warm city". Preprints, Conference on Urban Environment, American Meteorology Society.
- Bornstein, R., 1975. "The 2-D URBMET urban boundary layer model", *Journal Appl. Meteorology*.
- Bornstein, R., 1986. "Application of linked three-dimensional PBL and dispersion models to NYC", *Air Pollution Modeling and its Applications*.
- Bornstein, R., 1987. "Mean diurnal circulation and thermodynamic evolution of urban boundary layers", *American Meteorological Society*.
- Bornstein, R., 1993. "Simulation of urban barrier effects on polluted urban boundary layers using the three dimensional URBMET/TVM model with urban topography", In *Air Pollution*, Elsevier Science, NYC.
- Bornstein, R. and Craig J., 2001, "Urbanization of Numerical Mesoscale Models", *International Symposium on Environmental Hydraulics*.
- Bossert, James E., 1996. "An investigation of flow regimes affecting the México City region", *American Meteorological Society*.
- Burian, S; S. W. Stetson, W. S. Han, J. K. S. Ching, and D. W. Byun., 2004a. "High resolution dataset of urban canopy parameters for Houston, Texas", *Fifth Conference on Urban Environment. American Meteorological Society*.
- Burian, S; M.J. Brown, J. K. S. Ching, M. L. Cheuk M. Yuan, W.S. Han, and A. T. Mckinnon, 2004b. "Urban morphological analysis for mesoscale meteorological and dispersion modeling applications: current issues", *Fifth Conference on Urban Environment. American Meteorological Society*.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2006. "Tamaño, dinámica y estructura de la población: tendencia y desafíos", CONAPO.
- Cruz Xochitl, et al., 1992. "Development and Testing of an Air Quality Model for Mexico City", *IMP-Los Alamos*.

- De Foy, B., 2003. "Land surface comparison for complex terrain flow", Atmospheric and planetary science.
- Delage, Y., 1970. "Numerical studies of heat island circulations", Boundary Layer Meteorology.
- Díaz, E., 2005. "Modelación de partículas PM10 emitidas por erosión eólica en el valle de México", Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, 84pp.
- Dudhia et al., 2005. "PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3", NCAR,
- Dupont, S., Otte, T. and Ching, J., 2004. "Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5), EPA.
- El Universal, 2007. "La alerta ambiental solo fue el primer aviso", <http://www.eluniversal.com.mx/noticias.html>, martes 17 de abril del 2007.
- Fast, J.D., 1998. "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin", Journal of geophysical research atmospherics.
- Fast J. D., 2005. "Evaluation of the boundary layer characteristics and pollutants in Mexico city predicted by WRF". WRF/MM5 user's workshop.
- Filosofía y letras de la UNAM, 2004. "Tendencias de las variables meteorológicas del observatorio del colegio de geografía", [http://www.filos.unam.mx/OBSERVATORIO/tendencias\\_anomalias.htm](http://www.filos.unam.mx/OBSERVATORIO/tendencias_anomalias.htm), agosto 2006.
- García, A. 2002a. "Evaluación de Escenarios Utilizando el Modelo Regional de Calidad del Aire Multiscale Climate Chemistry Model". Tesis de Doctorado. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 111 pp.
- Hann S., Britter R., 2003. "Flow and dispersion in urban areas", University California.
- Hafner, J. y Kidder, S., 1999. "Urban heat island modelling in conjunction with satellite derived surface/soil parameters". Journal appl. Meteorology.
- Hitchcock, D. et al, 2005. "Evaluating meteorological impacts of urban forest and albedo changes in the Houston-Galveston region: A fine resolution (UCP) meso-urban modeling study of the August-September 2000 episode", Houston Advanced Research Center.

- Jáuregui E., 2005. "Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México". *Atmósfera*, p. 247.
- Jazcilevich, A., Garcia A. and Ruíz, G., 2002b. "A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico", *Atmospheric Environment*, Volume 36, Issue 14, pp 2297-2307
- Jazcilevich, A., Garcia A. and Ruíz, G., 2003. "A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico", *Atmospheric Environment*, Volume 37, Issue 2, pp 183-193
- Jazcilevich, A., García, A. and Caetano E., 2005a. "Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico", *Atmospheric Environment*, Volume 39, Issue 30, pp 5481-5489
- Jazcilevich, A., García, A., Caetano E., 2005b. "Meteorology and pollution modeling in the Valley of Mexico". Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Johnson, G. Steyn, D., and Watson, I., 1991. "Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night", *Boundary Layer Meteorology*.
- Magaña, V., Pérez, J.L., 1998. "Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México". GEO UNAM.
- Magaña V., Pérez J.L., Méndez, M., 2003. "Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin". *Geofísica Internacional*.
- Martilli A., 2001, "Modelización de los efectos urbanos en modelos meteorológicos". CIEMAT.
- Martilli A., 2002, "An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models". *Boundary-Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers.
- Michel J. Brown, 2000. "Energy and environmental analysis (TSA-4)", *Mesoscale Atmospheric Dispersion*, Capítulo 5.
- Molina L., 2002. "Air quality in México megacity: an integrated assessment", *alliance for global sustainability bookseries*.
- Myrup, L., 1969. "A numerical model of the UHI", *Journal Appl. Meteorology*.
- Pielke, R., 1974. "A three-dimensional numerical model of the sea breeze over South Florida", *Mon. Wea. Rev.*,
- Oke T.R., 1987. "Boundary Layer Climates". London, UK. Routledge.

- Rotach M. W., 1993. "Turbulence closet o rouge urban surface. Part 1: Reynolds stress". Boundary-Layer Meteorology.
- Secretaría del Medio Ambiente-GDF, 2005. "Informe climatológico ambiental del Valle de México 2005", Cap. 1.
- Taha, H., 1997. "Modeling the impacts of large scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin", Atmospheric Environment.
- Taha, H., 1999. "Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: bulk parameterisation approach", Journal Appl. Meteorology.
- Tapper, N., 1981. "Modeling the winter urban heat island over Christchurch, New Zealand", Journal Appl. Meteorology.
- Thunis, P and G. Schayes, 1993. "Simulation of urban barrier effects on pol-luted urban boundary layers using three-dimensional URBMET/TVM model with urban topography", Computational Mechanics Publications.
- Velasco, E., Pressley, S., Allwine, e., Westberg, H. and Lamb, B.,2005a. "Measurements of CO2 fluxes from the Mexico City urban landscape", Atmospheric Environment.
- Velasco, E., Lamb, B., Pressley, S., Allwine, E.,Westberg, H., Jobson B. T., Alexander, M., Prazeller, P., Molina, L. T., and M. J. Molina., 2005b. "Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape", Geophysical Research Letters.
- Vukovich, F. M., 1971. "Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat is-land circulation characteristic of an urban complex", Mon. Wea. Rev.
- Vukovich, F. M., 1973. "A study of the atmospheric response due to a diurnal heating function characteristic of an urban complex", Mon. Wea. Rev.
- Vukovich, F. M., 1975. "Study of the effect of wind shear on a heat island circulation characteris-tic of an urban complex", Mon. Wea. Rev.
- Vukovich, F., J. Dunn, and B. Crissman, 1976. "A theoretical study of the St. Louis heat island: the wind and temperature distribution", Journal Appl. Meteorology.
- Willmott, C. J.: 1981, "On the validation of models". Phys. Geography.
- Wikipedia, 2007. "México D.F.", [http://es.wikipedia.org/wiki/Ciudad\\_de\\_M%C3%A9xico#\\_ref-3](http://es.wikipedia.org/wiki/Ciudad_de_M%C3%A9xico#_ref-3), abril 2007.

- Zitacuaro A., 2004. "Circulación atmosférica local en el Valle de México durante el experimento CAM-MIT 2002: análisis de diagnóstico", El clima, entre el mar y la montaña: aportaciones presentadas al IV Congreso de la Asociación Española de Climatología, Santander, 2-5 de noviembre de 2004.

## Anexo

### 38 usos de suelos empleados por uMM5

38,2,	'ALBD	SLMO	SFEM	SFZO	THERIN	SCFX	SFHC	
1,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Residential'
2,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Commercial and Services'
3,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Industrial'
4,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Transportation, Communications and Utilities'
5,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Industrial and Commercial Complexes'
6,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Mixed urban or Built-up Land'
7,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Other urban or Built-up Land'
8,	17.,	.30,	.92,	15.,	4.,	.60,	25.0e5,	'Cropland and Pasture'
9,	18.,	.25,	.92,	14.,	4.,	.60,	25.0e5,	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Ornamental Horticultural Areas'
10,	18.,	.25,	.92,	14.,	4.,	.60,	25.0e5,	'Confined Feeding Operations'
11,	18.,	.25,	.92,	14.,	4.,	.60,	25.0e5,	'Other Agricultural Land'
12,	19.,	.15,	.92,	12.,	3.,	.60,	20.8e5,	'Herbaceous Rangeland'
13,	22.,	.10,	.88,	10.,	3.,	.62,	20.8e5,	'Shrub and Brush Rangeland'
14,	20.,	.15,	.90,	11.,	3.,	.60,	20.8e5,	'Mixed Rangeland'
15,	16.,	.30,	.93,	50.,	4.,	.56,	25.0e5,	'Deciduous Forest Land'
16,	12.,	.30,	.95,	50.,	4.,	0.,	29.2e5,	'Evergreen Forest land'
17,	13.,	.30,	.94,	50.,	4.,	.54,	41.8e5,	'Mixed Forest land'
18,	8.,	1.0,	.98,	0.01,	6.,	0.,	9.0e25,	'Streams and Canals'
19,	8.,	1.0,	.98,	0.01,	6.,	0.,	9.0e25,	'Lakes'
20,	8.,	1.0,	.98,	0.01,	6.,	0.,	9.0e25,	'Reservoirs'
21,	8.,	1.0,	.98,	0.01,	6.,	0.,	9.0e25,	'Bays and estuaries'
22,	8.,	1.0,	.98,	0.01,	6.,	0.,	9.0e25,	'Gulf'
23,	14.,	.35,	.95,	40.,	5.,	.58,	41.8e5,	'Forested Wetland'
24,	14.,	.60,	.95,	20.,	6.,	.55,	29.2e5,	'Nonforested Wetland'
25,	25.,	.20,	.85,	10.,	2.,	.58,	18.9e5,	'Dry Salt Flats'
26,	25.,	.20,	.85,	10.,	2.,	.58,	18.9e5,	'Beaches'
27,	25.,	.20,	.85,	10.,	2.,	.58,	18.9e5,	'Sandy Areas Other than beaches'
28,	25.,	.20,	.85,	10.,	2.,	.58,	18.9e5,	'Bare Exposed Rock'
29,	25.,	.20,	.85,	10.,	2.,	.58,	18.9e5,	'Strip Mines, Quarries, and Gravel Pits'
30,	18.,	.10,	.88,	50.,	3.,	.52,	18.9e5,	'Transitional Areas'
31,	25.,	.02,	.85,	10.,	2.,	.62,	12.0e5,	'Mixed Barren Land'
32,	15.,	.50,	.93,	30.,	5.,	.60,	9.0e25,	'Shrub and Brush Tundra'
33,	15.,	.50,	.92,	10.,	5.,	.60,	9.0e25,	'Herbaceous Tundra'
34,	25.,	.02,	.85,	10.,	2.,	.62,	12.0e5,	'Bare Ground'
35,	15.,	.50,	.92,	15.,	5.,	.60,	9.0e25,	'Wet Tundra'
36,	15.,	.50,	.92,	15.,	5.,	.60,	9.0e25,	'Mixed Tundra'
37,	55.,	.95,	.95,	5.,	5.,	0.,	9.0e25,	'Perennial Snowfields'
38,	55.,	.95,	.95,	5.,	5.,	0.,	9.0e25,	'Glaciers'