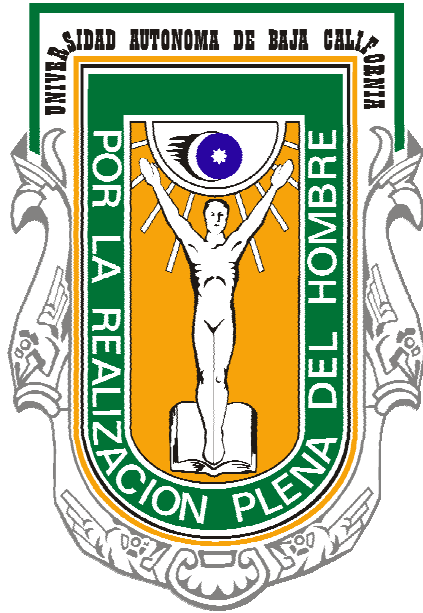


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“CLIMATOLOGIA DE LA ISLA URBANA DE CALOR EN MEXICALI, B.C. Y
SU RELACION CON EL USO DE SUELO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA
AFRICA CASILLAS HIGUERA**

**DIRECTOR
ONOFRE RAFAEL GARCIA CUETO.**

Mexicali, B. C.

Julio 2009.

INDICE Pagina

Lista de Figuras..... 6
Lista de tablas..... 9

CAPITULO I. Introducción

1. Introducción..... 11
1.1 Urbanización y modificaciones climáticas..... 11
1.2 Cambio de uso del suelo..... 17
1.3 Climatología urbana..... 17
1.4 Antecedentes de la problemática..... 19
1.4.1 Estudios de isla urbana de calor atmosférica..... 20
1.4.2 Estudios de isla urbana de calor superficial..... 23
1.5 Planteamiento del problema..... 26
1.5.1 Causas de la IUC..... 26
1.5.2 Área de estudio..... 28
1.5.3 Justificación..... 30
1.6 Objetivos..... 32
1.7 Hipótesis..... 32

CAPITULO II: Marco de referencia y conceptual.

2.1 La isla urbana de calor (IUC)..... 33
2.2 Tipos de IUC..... 35
2.3 Factores causales para la formación de la IUC..... 37
2.4 Efectos de la IUC..... 43
2.5 Intensidad de la IUC..... 44
2.6 Mitigación de la IUC..... 45
2.7 Intensificación de la IUC por el cambio climático global... 45

CAPITULO III: Materiales y métodos.

3.1 Climatología e intensidad de la IUC de dosel urbano.....	47
3.1.1 Estadística descriptiva e inferencial aplicada a datos horarios.....	48
3.1.2 Modelación con Stella para determinar intensidad y hora de IUC.....	50
3.2 Configuración espacial de la IUC de dosel urbano.....	51
3.2.1 Mapas isotérmicos para la ciudad de Mexicali.....	51
3.2.2 Identificación y creación de mapa usos de suelo a través de recorridos peatonales.....	52
3.3 Desarrollo histórico de la IUC y expansión urbana.....	54
3.3.1 Desarrollo histórico de la IUC de 1960 al 2005.....	54
3.3.2 Crecimiento de la mancha urbana.....	55
3.4 IUC atmosférica.....	55
3.4.1 Análisis de temperatura del aire 1993 y 2003.....	55
3.4.2 Diferencia térmica 1993-2003.....	57
3.5 Intensificación de la IUC por el cambio climático global....	57

CAPITULO IV. Resultados.

4.1 Climatología e intensidad de la IUC de dosel urbano.....	59
4.1.1 Estadística descriptiva e inferencial.....	59
4.1.1.1 Promedio anual.....	59
4.1.1.2 Promedio mensual.....	60
4.1.1.3 Promedio diario.....	64
4.1.1.4 Promedio horario.....	66
4.1.2 Modelación con Stella para determinar intensidad y hora de IUC.....	67
4.2 Configuración espacial de la IUC de dosel urbano.....	69
4.2.1 Mapas isotérmicos para la ciudad de Mexicali.....	70

4.2.2 Identificación y creación de mapa usos de suelo a través de recorridos peatonales.....	73
4.3 Desarrollo histórico y expansión urbana de la IUC.....	77
4.3.1 Evolución de la IUC 1960-2005.....	77
4.3.2 Crecimiento de la mancha urbana 1993-2003.....	78
4.4 IUC atmosférica.....	79
4.4.1 Análisis de regresión satelital del año de 1993.....	79
4.4.2 Análisis de regresión satelital del año de 2003.....	86
4.4.3 Diferencia térmica 1993-2003.....	92
4.5 Intensificación de la IUC por el cambio climático global.....	97
CAPITULO V. Discusiones.	
5.1. Climatología e intensidad de la IUC de dosel urbano.	100
5.2. Configuración espacial de la IUC se dosel urbano.....	101
5.3 Desarrollo histórico de la IUC y expansión urbana.....	102
5.4 Desarrollo de IUC atmosférica.....	103
5.4.1 Análisis de temperatura del aire y su relación con el uso del suelo 1993.....	103
5.4.2 Análisis de temperatura del aire y su relación con el uso del suelo 2003.....	104
5.4.3 Análisis de temperatura del aire normalizadas 1993-2003.....	105
5.5 Intensificación de la IUC por el cambio climático global.....	107
CAPITULO VI. Conclusiones.....	109
CAPITULO VII. Bibliografía.....	112
Apéndice A. Algoritmo genético.....	119

LISTA DE FIGURAS

1.1	Comportamiento de la temperatura del aire en una región constituida por diferentes coberturas de suelo...	14
1.2	Balance natural de la radiación.....	16
1.3	Temperaturas del verano 2006, Mexicali, B.C.....	26
1.4	Imagen satelital de Mexicali, B.C.....	28
1.5	Tendencias de población históricas y proyecciones para el condado de Mexicali y el condado imperial.....	30
2.1	Forma espacial de la IUC.....	34
2.2	Balance energético en la atmósfera baja	35
2.3	Tipos de islas urbanas de calor.....	36
2.4	Sombra de edificios sobre la ciudad.....	41
2.5	Geometría del efecto cañón.....	42
3.1	Ubicación espacial de estaciones meteorológicas.....	48
3.2	Modelo IUC.....	51
4.1	Promedios mínimos anuales de temperatura.....	60
4.2	Promedios mínimos mensual de temperatura.....	61
4.3	Temperaturas mínimas diarias, promedio Enero.....	64
4.4	Temperaturas mínimas diarias, promedio Febrero.....	64
4.5	Temperaturas mínimas diarias, promedio Marzo.....	64
4.6	Temperaturas mínimas diarias, promedio Noviembre	65
4.7	Temperaturas mínimas horarias, promedio del día 4 de Febrero (2000-2005).....	66
4.8	Temperaturas mínimas horarias, promedio del día de Noviembre (2000-2005).....	67
4.9	Resultados espaciales elaborados con Stella.....	69
4.10	Distribución isotérmica del 4 de febrero a las 23:00....	70
4.11	Distribución isotérmica del 4 de Noviembre a las 6:00 a.m.....	71

4.12	Distribución isotérmica del 26 de marzo a las 18:00 p.m.....	72
4.13	Distribución isotérmica del 5 de enero a las 6:00 a.m..	73
4.14	Mapa de uso de suelo COBACH.....	74
4.15	Mapa de uso de suelo UABC.....	75
4.16	Mapa de uso de suelo ITM.....	76
4.17	Crecimiento en la intensidad de la isla urbana de calor en la ciudad de Mexicali (1950-2000).....	78
4.18	Imagen Landsat 2003 desarrollo urbano de Mexicali 1993-2003.....	79
4.19	Modelo lineal TA vs TS, 6 abril 1993, 10:00 am.....	80
4.20	Transectos temperaturas estimadas del aire, imagen 1993.....	81
4.21	Perfil térmico del transecto 1, aplicado a la TA 1993....	82
4.22	Perfil térmico del transecto 2, aplicado a la TA 1993....	83
4.23	Perfil térmico del transecto 3, aplicado a la TA 1993....	84
4.24	Perfil térmico del transecto 4, aplicado a la TA 1993....	85
4.25	Modelo lineal TA vs TS, 12 mayo 2003, 10:00 am.....	86
4.26	Transectos y temperaturas estimadas del aire, imagen 2003.....	87
4.27	Perfil térmico del transecto 1, aplicado a la TA 2003....	88
4.28	Perfil térmico del transecto 2, aplicado a la TA 2003....	89
4.29	Perfil térmico del transecto 3, aplicado a la TA 2003....	90
4.30	Perfil térmico del transecto 4, aplicado a la TA 2003....	91
4.31	Imagen normalizada de diferencia positiva 2003-1993.....	92
4.32	Perfil térmico del transecto 1, aplicado imagen normalizada positiva.....	93
4.33	Perfil térmico del transecto 2, aplicado imagen	

	normalizada positiva.....	94
4.34	Perfil térmico del transecto 3, aplicado imagen normalizada positiva	95
4.35	Perfil térmico del transecto 4, aplicado imagen normalizada positiva.....	96
4.36	Diagrama de relación entre la presión del nivel del mar y la humedad específica de la superficie con temperatura.....	97
4.37	Grafica comparativa de temperaturas promedio mínimas, entre temperaturas observadas para el periodo 1961-1990 y modelos a1, a2 y b2 generados con downscaling.....	99

LISTA DE TABLAS

1.1	Tabla comparativa de elementos ambientales urbanos y rurales.....	18
2.1	Tipos de efectos de la IUC.....	44
2.2	Características de los escenarios socioeconómicos del IPPC (las cifras entre paréntesis corresponden a proyecciones para 2100).....	46
3.1	Ubicación de estaciones meteorológicas.....	48
3.2	Elementos para caracterizar coberturas de suelos.....	53
3.3	Usos de suelo más comunes encontrados.....	53
3.4	Usos de suelos y sus abreviaturas.....	54
3.5	Características de imágenes satelitales, Landsat 1993 y 2003.....	55
3.6	Características comunes de las imágenes Landsat 1993-2003.....	56
3.7	Estación y temperaturas usadas para estimar la TA en las imágenes 1993 y 2003.....	56
3.8	Trayectoria de transectos térmicos.....	57
4.1	Modelos de regresión lineal simple de Enero (promedio 2000-2005).....	62
4.2	Modelos de regresión lineal simple de Febrero (promedio 2000-2005).....	62
4.3	Modelos de regresión lineal simple de Marzo (promedio 2000-2005).....	62
4.4	Modelos de regresión lineal simple de Abril (promedio 2000-2005).....	62
4.5	Modelos de regresión lineal simple de Mayo (promedio 2000-2005).....	62

4.6	Modelos de regresión lineal simple de Junio (promedio 2000-2005).....	62
4.7	Modelos de regresión lineal simple de Julio (promedio 2000-2005).....	62
4.8	Modelos de regresión lineal simple de Agosto (promedio 2000-2005).....	62
4.9	Modelos de regresión lineal simple de Septiembre (promedio 2000-2005).....	62
4.10	Modelos de regresión lineal simple de Octubre (promedio 2000-2005).....	63
4.11	Modelos de regresión lineal simple de Noviembre (promedio 2000-2005).....	63
4.12	Modelos de regresión lineal simple de Diciembre (promedio 2000-2005).....	63
4.13	Meses y días en que aparece la IUC.....	63
4.14	Climatología de la IUC.....	67
4.15	Ubicación en matriz y coordenadas geográficas de estaciones urbanas.....	69
4.16	Intensidad y hora de la IUC obtenida con Stella.....	69
4.17	Comparación de los usos de suelo en las estaciones urbanas.....	69
4.18	TA y TS, a las 10:00 am.....	79
4.19	Escenarios contruidos (95% de confiabilidad) con un umbral de $> 2^{\circ}\text{c}$ basado en el promedio de temperaturas mínimas diarias en el periodo 1961-1990.....	98
5.1	Temperaturas máximas y mínimas de transectos 1993 y su uso de suelo.....	104
5.2	Uso de suelo y temperatura, imagen 2003.....	105

CAPITULO I.

INTRODUCCIÓN.

1.1 URBANIZACIÓN Y MODIFICACIONES CLIMÁTICAS

La transformación del paisaje natural, a nivel global, comenzó hace varios miles de años, cuando los pobladores de los primeros asentamientos humanos dieron inicio a la modificación del territorio para destinarlo a la producción agrícola, cuyo predominio se mantuvo hasta la primera mitad del siglo XX. Después de ese prolongado periodo, la dinámica de cambios se ha caracterizado por un acelerado proceso de urbanización que ha avanzado sin detenerse, imponiendo un nuevo uso del suelo que altera el funcionamiento de los sistemas ambientales. Esto es porque a medida que las ciudades crecen, imponen un nuevo medio, edificado sobre paisajes y ecosistemas naturales. Esta inercia de crecimiento y concentración demográfica en grandes urbes parece que continuará, al menos durante el presente siglo, pues el crecimiento demográfico esperado entre 2000 y 2025, de cerca de cuatro mil millones de habitantes en el mundo, al menos tres cuartas partes ocurrirá, como ha sido hasta ahora y desde los años setenta, en Asia, África y América Latina (Graizbord, 2007). De hecho, a principios de este siglo, un poco más de cuatrocientas ciudades habían ya rebasado el millón de habitantes, y solo entre ellas sumaban más que la población mundial al inicio del siglo XX, que era de 1400 millones. De esas ciudades, 122 se encontraban en el continente americano, y de éstas, 10 se encontraban en la República

Mexicana, a saber: México, Guadalajara, Monterrey, Puebla, Tijuana, Ciudad Juárez, León, Toluca, Torreón y San Luis Potosí.

Las ciudades, sin duda, han tenido un efecto polarizador y son reflejo de un producto social en donde se concentran la riqueza y la pobreza, y es allí donde se encuentran las oportunidades económicas, sociales y políticas; así pues, la ciudad, en términos de la OCDE (1994) es uno de los más poderosos símbolos culturales que ha creado la humanidad, pues su forma física y su presencia traducen de manera comprensible las más sofisticadas instituciones y propósitos sociales. En general, la urbanización puede expresarse en términos de concentración de población, cambios de materiales constituyentes de la superficie y expansión del espacio de vivienda sobre y bajo la superficie (Yamashita y Sekine, 1990/1991).

Es indudable que los beneficios de vivir en una zona urbana son numerosas, y como resultado el hombre ha logrado importantes progresos en todo el planeta; pero junto con esos beneficios han llegado también complicaciones no previstas, ya que la sustitución de superficies naturales por elementos urbanos han ido cambiando las propiedades físicas y químicas que toman lugar en la interfase Tierra-aire. Al reemplazar el campo, las granjas, el bosque y zonas agrícolas por ladrillo, concreto, cristal, etc., se han afectado los procesos aerodinámicos, térmicos, hidrológicos e intercambios de masa que tienen lugar en la capa límite (Oke, 1987). En consecuencia, las propiedades meteorológicas de aire en las áreas urbanas son profundamente modificadas para crear un tipo climático local distinto: **el clima urbano**. Cada elemento del clima, es decir, el flujo de aire, la química del aire, la temperatura, la humedad, la precipitación, la

visibilidad, etc., será diferente en las zonas urbanas si se compara con las rurales; por ejemplo, los vientos fuertes se debilitan y los débiles se aceleran a medida que se dirigen a las ciudades. Muchos estudios en diversas ciudades han mostrado que las velocidades promedio de viento son generalmente más bajas en áreas construidas que en áreas rurales (Chandler, 1965; Landsberg, 1956; Bornstein, 1972). La dirección del viento en el área urbana se controla por la forma de los edificios, el patrón de calles y espacios abiertos, así como por la topografía en la que la ciudad está construida. Las humedades relativas son con gran frecuencia inferiores, aunque las absolutas pueden algunas veces ser superiores en las zonas urbanas que en las rurales. La lluvia parece aumentar dentro o en el límite de las ciudades; la recepción de radiación solar también se ve disminuida por la capa de humo y por otros contaminantes existentes en la mayor parte de las ciudades. Una de las principales alteraciones que causa la ciudad sobre el clima, y que es el tema principal de esta tesis, es el incremento de la temperatura del aire y el desarrollo de una isla de calor o térmica, que se concreta en la mayor temperatura del centro urbano en relación con el espacio rural circundante (Oke, 1990; Arnfield, 2003). En la figura 1.1 se muestra un perfil de la isla de calor urbano en general la temperatura se eleva sensiblemente cerca de los límites de la ciudad y se estabiliza en las áreas suburbanas, residenciales y comerciales. Las temperaturas máximas se localizan típicamente en los centros urbanos, los cuales tienen una alta concentración de negocios y transporte, y también en áreas de alta densidad urbana.

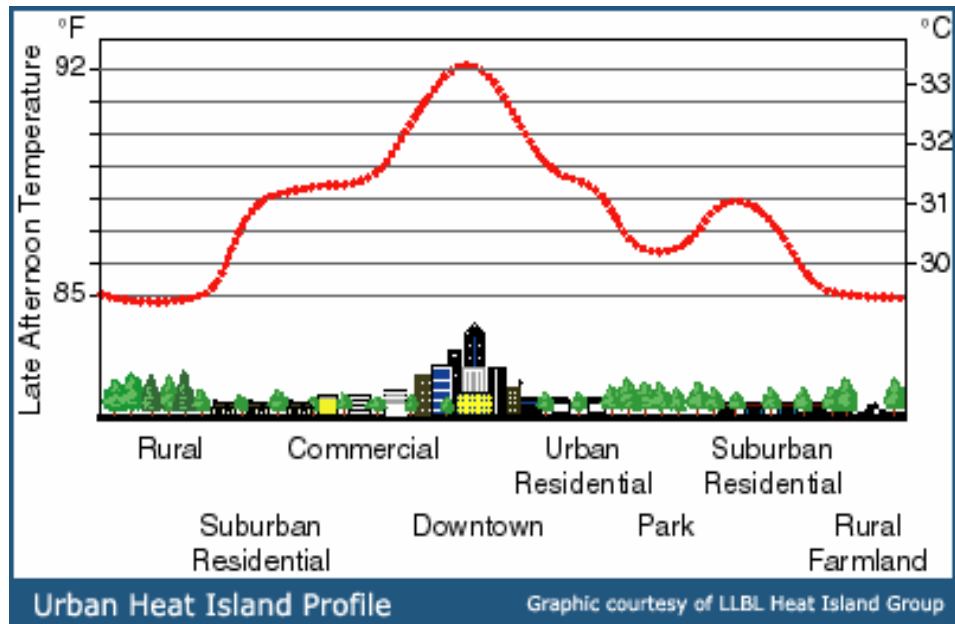


Figura 1.1. Comportamiento de la temperatura del aire en una región constituida por diferentes coberturas de suelo.

En síntesis, el acelerado crecimiento urbano está conduciendo a una degradación ambiental, originando alteraciones en el clima regional y conduciendo a la formación de un clima urbano, caracterizado por más estrés por calor, ventilación inadecuada y contaminación del aire entre otros factores negativos (Weihe, 1998).

IMPACTOS URBANOS EN LOS BALANCES DE RADIACIÓN Y ENERGÍA

Los principales parámetros de radiación que afectan el clima en cualquier lugar son:

- Radiación entrante de onda corta (solar), que se divide en componentes directa y difusa (dispersada)
- Fracción de energía de onda corta reflejada a la atmósfera llamada albedo (regularmente se da en porcentaje)

- Radiación de onda larga (terrestre) liberada desde la superficie a la atmósfera, que depende de la temperatura de superficie de la Tierra
- Radiación de onda larga liberada desde la atmósfera hacia la superficie, que depende de la temperatura de la atmósfera
- Radiación neta, esto es, el exceso ó déficit entre las componentes entrante (radiación solar) y saliente (radiación terrestre).

Esta radiación neta se divide entre las componentes del balance de calor:

- Calor sensible, representado por el cambio de temperatura
- Calor latente de evaporación, donde la energía se almacena en forma de vapor de agua
- Flujo de calor a la superficie inmediata por debajo de nivel del suelo
- Calor artificial liberado antropogénicamente (relevante solo a la ciudad)

La figura 1.2 presenta un diagrama esquemático que muestra como estos flujos interactúan en la atmósfera urbana, comparados con el ambiente rural (Bridgman et. al., 1995). Los materiales de construcción, y su orientación, permiten a las áreas urbanas actuar como almacenes de energía, creando importantes variaciones, tanto en la radiación, como en los balances de energía, comparados al área rural. Por conveniencia descriptiva la atmósfera urbana puede ser dividida en dos capas. Desde el suelo al nivel del techo de los edificios se le llama capa de dosel urbano (UCL por sus siglas en inglés). Las

medidas que se realicen en esta capa no son representativas de toda la ciudad, sino solamente de los lugares específicos donde se realicen tales mediciones. Desde el límite de la UCL hasta una altitud donde la influencia urbana ya no es notable en la atmósfera se le llama la capa límite urbana (UBL, por sus siglas en inglés). La altura de la UBL no es constante con el tiempo, durante el día cuando la superficie terrestre se calienta por la acción solar, hay una transferencia de calor hacia la atmósfera más fría. Esta vigorosa mezcla térmica, permite al espesor de la capa límite extenderse verticalmente de 1 a 2 km. Inversamente, en la noche, cuando la superficie terrestre se enfría más rápidamente que la atmósfera, hay una transferencia de calor hacia abajo. Esto tiende a suprimir la mezcla, y el espesor de la capa límite puede contraerse a menos de 100 m (Oke, 1987).

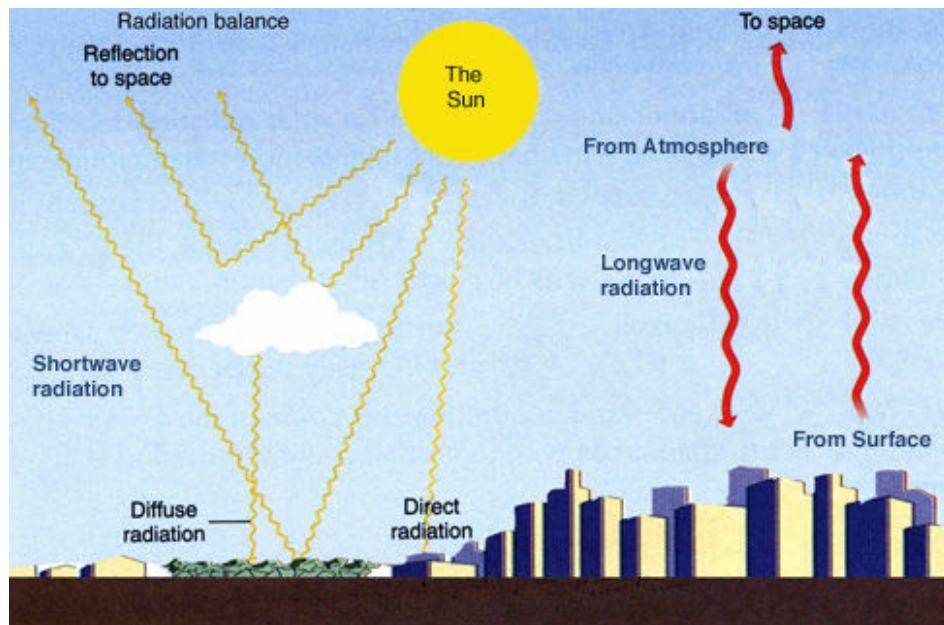


Figura 1.2 Balance natural de la radiación.

1.2 CAMBIO DE USO DEL SUELO.

La urbanización se construye de manera particular para cada ciudad, según la época, el clima, comportamiento, necesidades de su población entre otros factores, tal crecimiento urbano ejerce una presión sobre servicios prioritarios como el suministro de agua, manejo de desechos, educación y salud; Así el acelerado crecimiento urbano está conduciendo a una degradación ambiental que incluyen alteraciones en el clima regional relacionada con el estrés por el calor, ventilación inadecuada y contaminación del aire entre otros (Weihe, 1988). Weng (2001), la define como, la conversión de otros tipos de suelos para usos asociados con el crecimiento de población y economía; es el principal cambio de uso y cobertura del suelo en la historia del hombre, El monitoreo del cambio en el uso del suelo es esencial a nivel local y nacional, para plantear estudios y determinar las tendencias de la construcción urbana (Turker y Asik 2002).

1.3 CLIMATOLOGÍA URBANA.

La climatología urbana tiene interés en el estudio de las modificaciones climáticas ocasionadas por la urbanización y por tanto de que se usen los datos climáticos para mejorar la planeación urbana; la gran mayoría de las veces, sin embargo, los planificadores de las ciudades no toman en cuenta el recurso climático existente para lograr diseños acordes con el medio ambiente, ya sea por falta de conocimiento, o como sucede en nuestro país por un claro desinterés político hacia sus gobernados.

La climatología urbana busca evaluar las alteraciones climáticas inducidas por la urbanización (Tejada, 1994) como el cambio hidrológico, en la zona rural la precipitación cae directamente o indirectamente sobre un suelo de naturaleza permeable, reduciéndose el escurrimiento superficial; sin embargo en las ciudades, el hombre impermeabiliza las superficies (calles, banquetas, estacionamientos, etc.) haciendo que aumente el escurrimiento superficial, incluso después de una precipitación ligera. Por ejemplo si en un estacionamiento de 30 x 30m cae una precipitación de 1 cm, producirá 9 m³ de agua. Si el agua no se drena, el estacionamiento se inundara. Otra alteración es el cambio térmico, el efecto urbano ocasiona una notable modificación del clima, que contrasta significativamente con el entorno periurbano o rural circundante, En la tabla 1.1 se presenta un grupo de cambios que causan las ciudades en los elementos climáticos. A su vez, la configuración local del relieve, la estructura urbana y la diversidad de usos de suelo crean importantes cambios internos que se traducen en la formación de espacios climáticos bien diferenciados. La topografía es el factor más influyente en el reparto de las temperaturas, con un efecto negativo sobre las mismas (Cuadrat, 2005).

ELEMENTO	PARAMETRO	MEDIOAMBIENTE URBANO COMPARADO CON EL RURAL
Radiación	Sobre una superficie horizontal ultravioleta	-15% -30% (invierno); -5% (verano)
Temperatura	Media anual Máxima del invierno Estación de largas heladas	+0.7 °C +1.5°C +2 a 3 semanas (posible)
Velocidad Del viento	Medias anual Rachas extremas Frecuencia de calma	-20 a -30% -10 a -20% +5 a -20%
Humedad Relativa	Media anual Media estacional	-6% -2%(invierno); -8% (verano)
Nubosidad	Frecuencia de nubes y	+5 a -10%

	cantidad de niebla	+100% (invierno); +30% (verano)
Precipitación	Alcances Días (menos 5 mm) Días con nieve	+5% a -10% +10% -14%

Tabla 1.1 Tabla comparativa de elementos ambientales urbanos y rurales.

La radical transformación del espacio rural en urbano, caracterizada principalmente por las diferentes propiedades físicas y térmicas del sistema urbano en los que incluyen la capacidad térmica, las razones de calentamiento y enfriamiento, la generación de calor antrópico y rugosidad superficial disminuye el flujo de calor latente, e incrementa el calor sensible generando un mayor calentamiento del aire superficial y con ello la temperatura del sistema urbano se eleva, siendo mayor que en los alrededores rurales, apareciendo así la ***Isla Urbana de Calor (IUC)*** (Barradas, 1987; Grimmond y Souch 1994).

1.4 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE LA "IUC".

Aunque el problema lleva estudiándose más de 160 años, el fenómeno de la ICU aun no es entendido completamente (Hafner y Kidder, 1999). El efecto se ha afrontado desde los puntos de vista experimental y teórico (Landsberg 1981, López, 1993, Montavez, 2000). Muchos estudios del uso de monitoreo remoto han sido llevado a cabo en la detección y monitoreo del uso del suelo urbano (Li y Yhe 1998).

El tamaño de la ciudad juega un papel importante en la intensidad de la ICU. En las ciudades pequeñas se observan fuertes intensidades de la ICU en superficie, mientras que en el aire son más pequeñas (Valero 2000).

1.4.1 ESTUDIOS DE ISLA URBANA DE CALOR ATMOSFERICA.

Un estudio realizado en Tabasco, México (Cervantes, 2000), describe aspectos del clima urbano como la distribución de temperatura, humedad relativa, presión de vapor y un índice de bienestar térmico denominado temperatura efectiva. Para ello se tomaron en cuenta los meses de Junio, Julio y agosto por ser característicos del tipo de clima de la región calido-húmeda, con temperaturas promedio mayores a los 29°C. Las mediciones de temperatura y humedad relativa fueron extraídas durante la noche (10 p.m. en adelante) a fin de evitar efectos de radiación solar y calor vehicular. Las isotermas presentan un núcleo calido conocido como isla de calor urbana mas o menos coincidente con el centro comercial de la ciudad, también se observó que los valores mas altos de temperatura efectiva coinciden con la zona comercial y las alejadas de los cuerpos de agua y áreas verdes, mientras que los valores mas bajos se presentan alrededor de estas dos ultimas zonas, mostrando que actúan como islas frías en el ambiente urbano, a pesar de no mostrar un efecto tan pronunciado. La isla de calor urbana ocurre hacia las primeras horas de la mañana detectando una diferencia de 2°C entre el centro y sus alrededores. En conclusión la temperatura y la humedad relativa muestran como las zonas de alta densidad poblacional y construcciones de concreto muestran los valores más altos.

Un análisis estadístico de las diferencias diarias mínimas de temperatura registradas en dos observatorios meteorológicos, ubicados en el centro de Barcelona y otro en el aeropuerto fue realizado por Moreno (1994); ambos sitios tienen una altitud y

distancia del mar similar, La ciudad tiene un área de 478 Km², y una población aproximada de tres millones de personas. Se encontró que la diferencia mensual en el centro de la ciudad es de 2.9°C, más cálida en la noche, que en el aeropuerto, pero durante el día el centro es un poco más frío, 1.4°C, en comparación al aeropuerto; dicho estudio reveló el rigor del efecto de la isla del calor, que alcanza una intensidad máxima de 8°C en la zona centro de Barcelona.

En Kuwait (Brazel y Balling, 1989) estudiaron la IUC tomando en cuenta 23 años de temperaturas máximas y mínimas de la temperatura del aire; el resultado de una serie de análisis estadísticos reveló que el efecto de isla de calor crecía a la par con la rápida expansión de la mancha urbana. Las mediciones de temperaturas se tomaron de 3 estaciones, Roudatun un desierto local remoto, se encuentra a 93 km al norte de la ciudad; el aeropuerto internacional de Kuwait está localizado en el kilómetro 16.5 del centro de la ciudad, y Shuwaikh está localizada en la costa dentro de una zona residencial, a 7 km al sureste del centro. Las similitudes entre la cobertura del suelo urbana-rural de Kuwait es notable y se encuentran colindadas por un largo cuerpo de agua. El análisis muestra una modesta isla de calor urbano en el área metropolitana, la diferencia máxima entre las temperaturas mínimas del área suburbana y del desierto muestra que creció el efecto 0.027°C por año. Parece ser que la falta de contraste en las propiedades térmicas entre el desierto y el área urbana la ciudad de Kuwait minimizó la isla de calor urbano a pesar de substancial crecimiento en la población local.

Múltiples observaciones en Shangai (Shu, 1984), muestran que el área urbana es siempre más caliente que sus alrededores. Por

ejemplo, el 13 de diciembre de 1979, a las 20 hr (noche clara y en calma) la temperatura más alta (8.5°C) estuvo asociado con la densidad urbana más alta; en las estaciones rurales cercanas la temperatura del aire fue de solo 2-3°C. La variación diurna y estacional de las intensidades urbanas de islas de calor en Shangai son muy evidentes. Se encontró que la isla urbana de calor no se desarrolla en el día, pero en el intervalo de las 15 a las 17h, la diferencia de temperatura urbana rural se incrementa rápidamente. La intensidad de la isla urbana permanece de 2-4.5°C desde que oscurece hasta que amanece, de acuerdo con las medidas tomadas en verano bajo condiciones sinópticas claras, y en calma. También se ha podido ver que la temperatura urbana mínima mensual es grande a fines de otoño y principios de invierno (octubre-diciembre), cuando la cantidad de nubes y las velocidades del viento estuvieron en 0°C o cerca de sus valores mínimos. Durante las estaciones de primavera, verano la intensidad de la isla urbana de calor, llega a ser más débil, mientras que los vientos son más fuertes y hay nubosidad (García, 2006).

En Salamanca una ciudad de tamaño medio, con un clima extremado y focos industriales de poca actividad, se determinó la existencia de la isla urbana de calor (IUC), Con lo que se comprobó que el calentamiento urbano afecta a las ciudades de estas características. La existencia del fenómeno y su evolución en el tiempo se analizaron por medio de la comparación de temperaturas registradas durante el período 1996-1998 en una estación meteorológica situada en la ciudad y con los de otra estación fuera del radio de acción, se detectaron dos fenómenos: la isla de calor nocturna, cuando la diferencia térmica entre la ciudad y la zona rural es positiva, que presenta sus intensidad mas alta en otoño, y la isla de

calor diurna, que se da cuando la diferencia es negativa y se presenta en primavera. Realizando un estudio estadístico de la evolución anual de la isla de calor nocturna en Salamanca, se define una isla de calor débil si su intensidad es inferior a 2°C, moderada si se encuentra entre 2 °C y 4 °C e intensa si supera los 4 °C (Alonso, 2004).

1.4.2 ESTUDIOS DE ISLA URBANA DE CALOR SUPERFICIAL.

Una significativa Isla de Calor fue identificada por la noche en Tel-Aviv sobre un estable día de invierno (Saaroni, 2000). Con la técnica de teledetección, usando la temperatura superficial, se mostró una variación de 3-5°C; a nivel de las calles el fenómeno es más pronunciado, existe una variación de 10°C entre el centro de la ciudad y sus alrededores, el calentamiento del mar mediterráneo contribuye en el incremento de la temperatura. Por otra parte las diferencias térmicas de los vecindarios, la actividad urbana y los componentes urbanos fueron comparados, esto comprobó que la cobertura de las playas tiene un rol importante en la actividad térmica.

Para Cuba no es indiferente esta problemática (Álvarez, 2004) Los resultados de las investigaciones hechas a varias ciudades de este país estiman para el año 2013 exista incrementos térmicos hasta 1.5°C de temperatura. A escala de ciudad se manifiesta también el cambio climático a través del incremento de los valores de la "isla urbana de calor".

En el caso de la ciudad de Guanzhou, China, un estudio reveló que en la misma ciudad se encuentran 2 grandes islas de calor, 1 en el suroeste y la otra en el oeste de la ciudad; además se encontró que la

extensión de la isla de calor urbana cambia según la estación del año (Weng 2003).

Jo y Lee (2003), analizaron la temperatura superficial del área urbana usando GIS para encontrar su relación con el uso del suelo, por medio de una imagen satelital TM; clasificaron las temperaturas superficiales de los usos de suelo aplicando cuatro modelos diferentes, los datos obtenidos con la banda 6 muestran que el mes de junio el uso mas caliente es el industrial (30.38°C) y el mas frío son los cuerpos de agua (21.60°C).

En cambio, el estudio realizado en Andhra, India se aplicó una diferencia normalizada de índice de vegetación (NDVI) que indicó el porcentaje de vegetación contenido en cada píxel de una imagen NOAA-AVHRR, como resultados se encontró que las tierras de cultivo tienen una temperatura de 22.4°C mientras que en los lotes baldíos la temperatura haciende a 35.2°C. Asimismo se demostró que el potencial uso de NDVI sirve como un modulador de parámetros para la estimación de la temperatura del uso de suelo (Kant, 2000).

En la región metropolitana de Atlanta Georgia, a través de imágenes térmicas de alta resolución de la Nacional Aeronáutica y Administración Espacial (NASA) fueron utilizadas en conjunto con un nivel porcentual de registros para examinar la relación entre el diseño de un residencial familiar simple y la emisión de energía de calor radiante. El resultado fue que la ilustración de los patrones bajos de desarrollo residencial contribuyen más a la energía de calor radiante para la superficie de isla de calor, creando una alta densidad en los patrones de construcción de la región de Atlanta (Stone, 2001).

En Beijing, China, se detectó el patrón espacial de los fenómenos urbanos de la isla urbana del calor (IUC) y determinó la relación entre el patrón de IUC y el sistema de paisajes y variables demográficas. Los valores superficiales de la temperatura de la radiación de la tierra (SRT) fueron extraídos de una imagen de LANDSAT TM antes de 2001. El sistema del área urbanizada y del camino fue conseguido a partir de mapas topográficos de la escala de la 1:10,000. El mapa del índice de ANDVI fue extraído de la misma imagen. Los análisis múltiples de la correlación y de la regresión fueron utilizados para examinar la relación entre el patrón de IUC y los parámetros del uso y cobertura del suelo (es decir NDVI, densidad urbanizada y densidad del camino) y las variables demográficas (es decir densidad demográfica, densidad demográfica no-agrícola y densidad de las casas de familias) en el nivel del municipio. Se encuentra que el área seca de la cama del río a través de la ciudad era la más caliente; Las islas múltiples del calor emergieron sobre varias ciudades basadas en los satélites dentro de la metrópoli. El análisis estadístico indica que las intensidades de IUC tenían una relación negativa con NDVI, pero correlacionado positivamente con cociente urbanizado, densidad demográfica no-agrícolas y densidad del camino (Rongbo, 2002).

En el año 2002 se realizó un estudio en la ciudad de Mexicali, México, en el cual se observó que la Isla de Calor Urbana es mas acentuada en las estaciones de invierno y primavera, menos marcada en el otoño y prácticamente desaparece en verano. Asimismo, es mayor en las noches despejadas y vientos en calma y escasa humedad en el ambiente. Por supuesto que las principales diferencias encontradas entre el área urbana y el área rural afectan el confort humano, debido a las temperaturas del aire y velocidad del viento.

Estas diferencias parecen ser principalmente causadas por: 1) cambios en el balance de radiación del espacio urbano, 2) el intercambio de calor entre el piso y las construcciones, y 3) por la generación de calor dentro de la ciudad (García op. Cit., 2006).

En el verano del 2006 las temperaturas mínimas para Mexicali no descendieron lo climatológicamente esperado, aunado a esto se registraron 29 casos de defunciones por golpe de calor debido a la onda de calida originada en el microclima urbano. (García, 2007, comentario personal. figura 1.3).

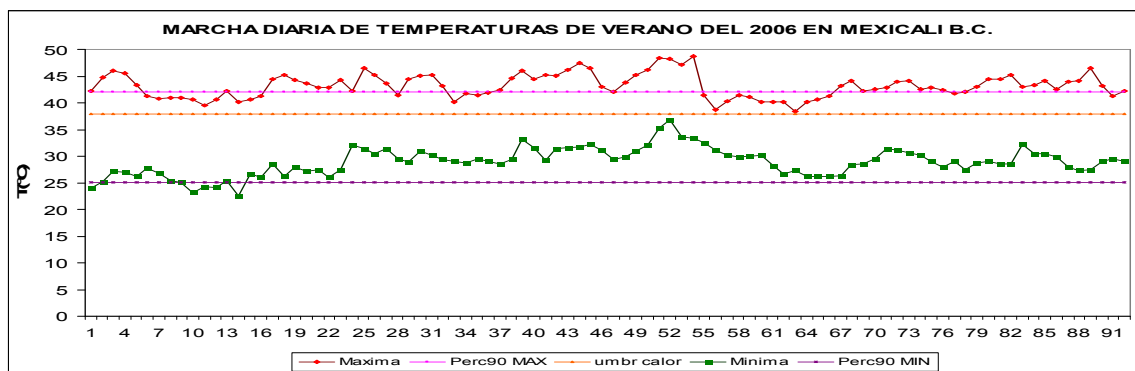


Figura 1.3 Temperaturas del verano 2006, Mexicali, B.C.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.5.1 CAUSAS DE LA IUC.

La "Isla Urbana de Calor" (IUC) se origina debido a que las ciudades se tienen una morfología diferente del área rural con diversas propiedades termo-físicas en los materiales usados para las coberturas y envolventes, grado de forestación, intensidad y características del transporte vehicular, plantas industriales y distintas fuentes de calor antropogénico, modificando el balance radiativo de las ciudades, (Pérez, García y Guerra, 2003); la carencia de la vegetación y de la

humedad del suelo, que absorbería normalmente la energía del sol para evaporar el agua o realizar la fotosíntesis es absorbida por las estructuras artificiales: caminos, estacionamientos y edificios. Con poco o nada de agua y plantas, la radiación solar aumenta la temperatura de dichas superficies. Después de que llega la noche, la ciudad es tan caliente que nunca refresca tanto como el campo que se encuentra en sus alrededores, por lo que las ciudades funcionan como acumuladores térmicos durante el día y liberan la energía almacenada en todo el entramado urbano por la noche; de esta manera se conserva el efecto de la IUC a lo largo de la noche y parte de la madrugada.

Este efecto presenta una incidencia directa en el consumo de energía y las condiciones de confort térmico de los espacios residenciales tanto en verano como en invierno. Se ha observado que en ciudades con más de 100,000 habitantes los consumos de energía en las horas pico se incrementan 1.5 a 2% por cada grado que se incrementa la temperatura (Avakari, et al. 1992). Además propicia el aumento de la contaminación ambiental pues mayores temperaturas urbanas funciona como catalizador de las reacciones de los gases de combustión presentes en la atmósfera generando mayor cantidad de smog; y el aumento de consumo de energía hace que las plantas generadoras liberen mayores cantidades de gases de combustión (CO₂, CO, NO_x, SO₂, vapor de agua y metano), gases responsables del calentamiento global (Correa et al., 2005) que aumentan la incidencia de enfermedades y muertes relacionadas al calor. De hecho, en un año promedio aproximadamente 1,100 americanos mueren por el calor extremo, la mayor causa de muerte relacionada con el clima en los EEUU (Kalkstein, LS, 1993).

1.5.2 AREA DE ESTUDIO.

La ciudad de Mexicali, se encuentra ubicada al noroeste de Baja California, México ($32^{\circ} 33''$ N, $115^{\circ} 28''$ E y con una altitud promedio de 4msnm., figura 1.4), en el desierto del noroeste mexicano atravesado por el Río Colorado que desemboca en el golfo de California, por su localización se beneficia de sus abundantes aguas; por otra parte el número de horas del sol al día es superior a la mayor parte del resto del país (Atlas de Mexicali, 2001). Tiene como ciudad vecina el Calexico, C.A., EUA. Debido a que una gran parte de la región se localiza bajo el nivel del mar y las montañas al oeste evitan que la humedad penetre, el promedio anual de lluvia es de 70 milímetros aproximadamente (INEGI, 1996). Su clima es cálido y seco con temperaturas medias anuales extremas, se presentan grandes contrastes térmicos ya que durante el verano la temperatura puede alcanzar los 50°C mientras que en invierno desciende por debajo de los 0°C (García, 1995).

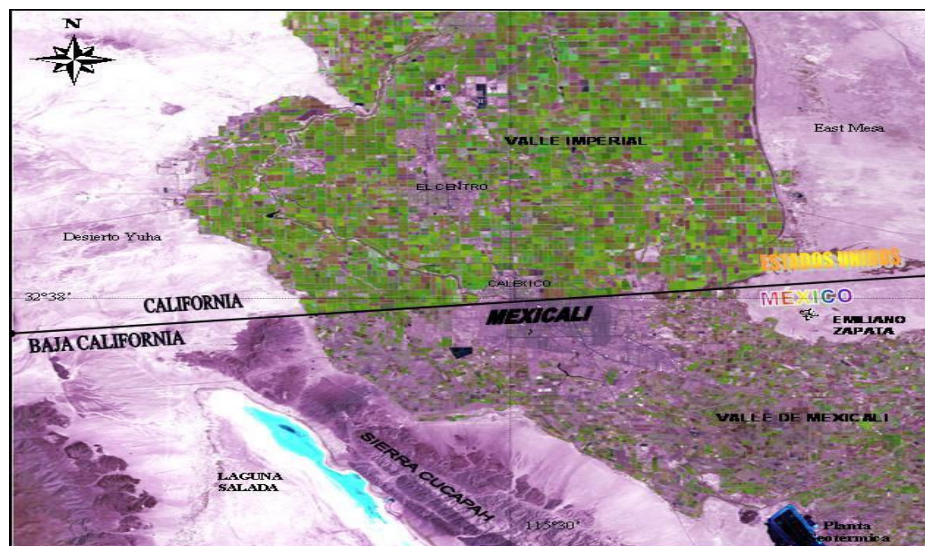


Figura 1.4 Imagen satelital de Mexicali, B.C.

En 1930 el condado imperial era dos veces mayor que el valle de Mexicali, con una población de 60,903 comparada con Mexicali, que tenía 29,895, figura 1.5. Desde 1950 las industrias se empezaron a instalar en Mexicali generando mas empleos, lo que la convirtió en una frontera no solo de paso sino en una ciudad en franco desarrollo, inmigrando gente de otros estados de la república y el mundo, aumentó su población a 124,362 habitantes, casi el doble que el contado en el valle imperial (62,975 personas). Durante la década de los 80's el gobierno del estado implanto un programa de oferta de predios urbanos para familias de bajos recursos, El programa desarrollo una serie de nuevos fraccionamientos en diferentes partes de la ciudad (como el robledo, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza) en donde se instalaron más de 15,000 familias Actualmente la tasa anual de crecimiento poblacional es de 2.7%, dos veces mayor que la tasa nacional de 1.4%; La vivienda a aumentado su tasa en 3.4% que es superior a la de 1990 (2.5%). Las proyecciones estiman un incremento de hasta dos millones de habitantes para el 2040, la construcción de viviendas, áreas de comercio, recreo, etc, al expandir la mancha urbana tanto la vegetación natural como tierras de cultivos, canales de agua incluso la tierra árida fue removida y remplazada por materiales artificiales como: metal, concreto, asfalto, los cuales absorben la radiación solar y no permiten el proceso de evapotranspiración.

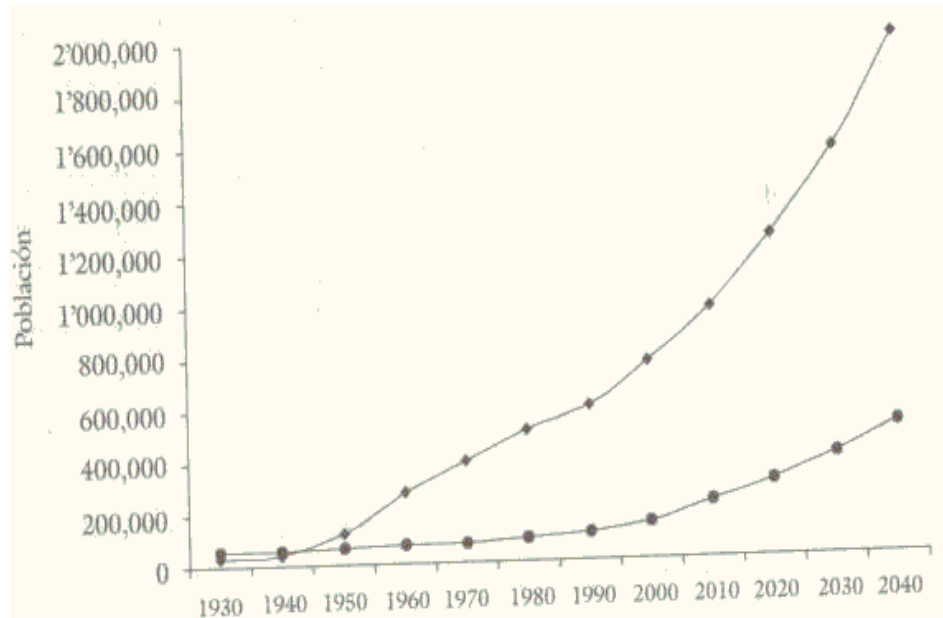


Figura 1.5. Tendencias de población históricas y proyecciones para el condado de Mexicali y el Condado Imperial (Quintero, 2005).

1.5.3 JUSTIFICACIÓN.

En nuestro país, cuya tendencia en el crecimiento de la población urbana se ha acentuado, con la consecuente expansión espacial de la mancha urbana y la cobertura del suelo así como su cambio de forma radical y rápida, provoca que el clima entre la ciudad y las regiones rurales que la colindan sean significativamente diferentes y creen su propio microclima interno, los cambios en el microclima urbano afectan el confort negativamente, se gasta mas dinero por consumo de energía eléctrica para lograr esa comodidad, estado de ánimo de la población se ve afectado, incluso provoca mayor contaminación ambiental, por lo que el estudio de la IUC es esencial para entender los cambios climáticos que ocurren dentro de las ciudades y los factores que influyen en él.

Si bien es cierto que la isla de calor urbana es un fenómeno climático que se da dentro de una ciudad, es importante no estudiarlas por separado (la urbanización y la IUC), sino estudiar de manera conjunta sus efectos para proponer estrategias de mitigación. Este problema puede ser visto en las siguientes partes:

I. Fenómeno de la isla de calor urbano, para ello se debe ver como un sistema compuesto por factores externos sin los cuales no puede vivir y a su vez aporta como resultado de su proceso interno calor a la ciudad.

II. La ciudad, es el lugar donde se da el fenómeno, no debe tomarse como un sistema pasivo en el problema sino como activo por que ella introduce ya sea de manera voluntaria (con su actividad) o involuntariamente (las condiciones del medio ambiente en las que se encuentra).

Se decidió estudiar la ciudad de Mexicali, por ser de uno de los climas más extremosos a nivel mundial, y porque la urbanización ha crecido de manera explosiva y heterogénea, por tanto la cobertura del suelo y sus usos parecen haber creado, al igual que en otras ciudades, se cree que la isla urbana de calor impacta negativamente a los habitantes por ello es urgentemente necesario que se evalúen estos patrones de crecimiento, el tipo de suelo y sus cambios en la cobertura del mismo para que se tomen en cuenta en futuros proyectos de construcción.

1.6 OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL:

Elaborar la climatología de la isla urbana de calor en la ciudad de Mexicali, Baja California, y analizar el papel que los usos del suelo tienen en este fenómeno.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- I. Evaluar el desarrollo de la isla urbana de calor en diferentes períodos temporales y espaciales.
- II. Realizar un análisis de uso del suelo alrededor de cada estación climatológica.
- III. Evaluar la evolución de la mancha urbana en un período de 10 años.
- IV. Elaborar futuros escenarios de tendencias térmicas promedio mínimas con el modelo CGCM1 y los escenarios socioeconómicos A1, A2 y B2, a mediano y largo plazo (2020's, 2050's y 2080's).

1.7 HIPÓTESIS.

El cambio de uso del suelo y el desarrollo urbano acelerado que se ha dado en Mexicali, sobre todo en estos últimos 10 años, ha originado una diferenciación térmica entre la ciudad y los alrededores, acentuado el efecto de la isla de calor urbano.

CAPITULO II.

MARCO DE REFERENCIA Y CONCEPTUAL.

2.1 LA ISLA URBANA DE CALOR (IUC).

Se refiere a la diferencia térmica entre la ciudad y sus alrededores propiciado por el cambio en los materiales nativos de la superficie del suelo por otros de naturaleza antropogénica (concreto, ladrillo, vidrio, etc.); de manera general se puede decir que el cambio en las propiedades térmicas de los materiales realiza a su vez una modificación en el balance energético de la baja atmósfera. Este efecto es más notorio en la madrugada pues mientras en los suburbios o los alrededores rurales está relativamente más fresco que en la ciudad.

La temperatura del área urbana usualmente es unos grados más alta que sus alrededores suburbanos y áreas rurales (Synnefa,2008). Recibe el nombre de Isla Urbana de Calor (IUC) por su aspecto espacial, es decir, las isotermas o líneas de igual temperatura forman un patrón similar a una isla (figura 2.1), misma que en el centro tiene el valor térmico más alto; el patrón espacial específico de la IUC depende en gran medida de la densidad urbana o tamaño de la ciudad (Voogt, 2002). La IUC es un ejemplo irrefutable de las modificaciones del clima local al alterar algunas propiedades radiativas como la admitancia térmica, la emisividad y el albedo, y de manera secundaria por la liberación de energía artificialmente generada en las ciudades; todos estos factores terminan modificando la estructura térmica superficial de la atmósfera inmediata creando efectos no deseables,

tales como un incremento en el discomfort térmico, mayor consumo de agua y energía, e indirectamente origina una mayor contaminación atmosférica (Tsuyoshi, Junichi, 2002; Patz and Olson 2006).

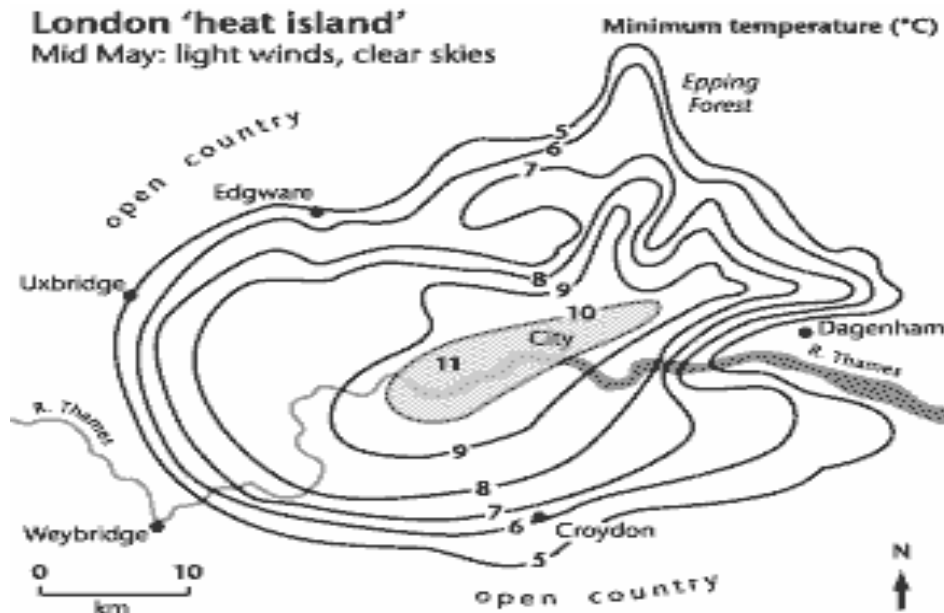


Figura 2.1 Forma espacial de la IUC (imagen tomada de [Http://www.metoffice.gov.uk](http://www.metoffice.gov.uk), 2008).

Ya que la IUC no es más que una expresión de la modificación del balance energético en la atmósfera baja, es conveniente mostrar a tal balance (figura 2.2), que en su forma más simple se puede establecer como:

$$R_n + F = H + G + A + LE$$

Donde R_n es la radiación neta de todas las longitudes de onda; F es el calor artificial o antropogénico generado dentro de la ciudad por combustión y metabolismo; H es la transferencia de calor sensible; G es el almacenamiento de calor en el tejido urbano (edificios, pavimento, etc.); A es la energía transportada por advección; y LE es la transferencia de calor latente.

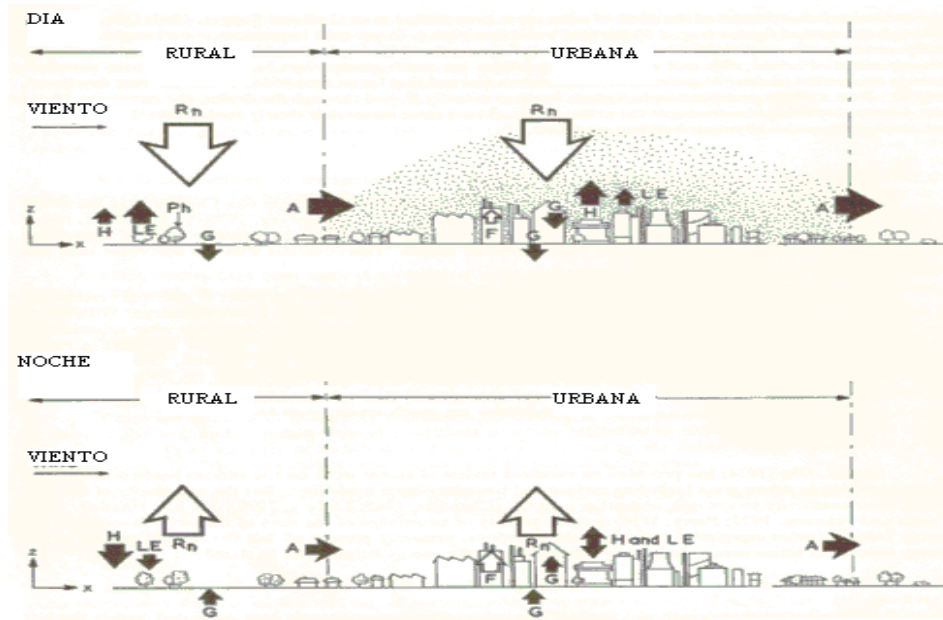


Figura 2.2 Balance energético en la atmósfera baja, Oke 1970

2.2 TIPOS DE IUC.

Existen tres tipos de IUC: a) en la capa de dosel urbano, b) de capa límite y c) superficial (Voogt, 2004).

Tanto la IUC en la capa de dosel urbano como la de capa límite consisten en el calentamiento del aire en la atmósfera baja, a diferencia de la IUC superficial la cual se origina en la superficie inmediata del suelo (figura 2.3).

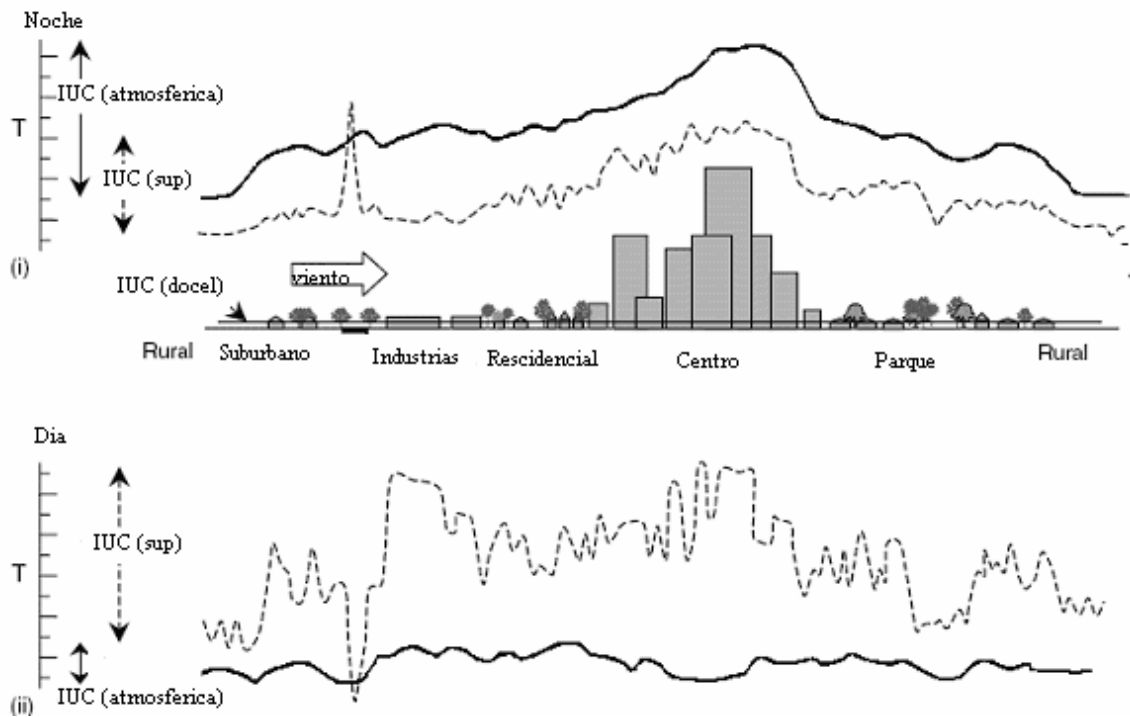


Figura 2.3 Tipos de Islas Urbanas de Calor (modificado por el autor).

Algunas de las características que las diferencian entre si son las siguientes:

La IUC en la capa de dosel urbano, se sitúa en la capa de aire más cercana de la superficie de la ciudad, extendiéndose hacia arriba aproximadamente a la altura promedio de las construcciones. Puede llegar a extenderse hasta un kilómetro de altura durante el día.

La IUC de capa límite tiene forma de domo; por consiguiente en el centro de la ciudad, o en el lugar espacial en que se encuentra ubicada, el calor radiante de la superficie del suelo alcanza una altura mayor mientras que en los límites de la ciudad que colindan con las áreas rurales tiende a desaparecer. Los vientos a menudo cambian el domo a una forma lineal o bien rompiendo la IUC (Ingegard, 2000).

El tercer tipo, la IUC superficial, consiste en un calentamiento diferencial de la superficie del suelo, ya que al cambiar las características naturales, por otro de naturaleza impermeable y con diferentes propiedades térmicas, la energía de onda corta absorbida por los materiales urbanos es liberada mas lentamente, principalmente como calor sensible, originando un aumento de temperatura que contrasta notablemente con los suelos nativos o rurales de la región (Voogt op. cit., 2004).

Tanto la IUC en la capa de dosel urbano como de capa límite se estudian analizando directamente las temperaturas del aire, mientras que la IUC superficial se estima mediante sensores remotos que llevan a bordo los satélites o aviones.

2.3 FACTORES CAUSALES PARA LA FORMACIÓN DE LA IUC.

Existen varios factores independientes que afectan la temperatura del aire en la zona urbana, particularmente cerca del nivel más próximo al suelo, que contribuyen al desarrollo de la IUC, a saber:

- Tiempo atmosférico.
- Ubicación geográfica.
- Hora del día.
- Estación del año.
- Forma de la ciudad.
- Función de la ciudad.

En los siguientes párrafos se describe cada factor que contribuye en la ocurrencia e intensidad de la IUC.

Tiempo atmosférico. De manera sobresaliente, el viento y las nubes influyen en la formación de la IUC. Las magnitudes son más grandes en condiciones de calma y cielo despejado. Varios estudios (Ackerman, 1985; Landsberg, 1981) han confirmado que la intensidad de la IUC disminuye cuando el cielo se encuentra nublado porque se reduce el enfriamiento radiactivo. Respecto al viento, cuando éste se incrementa, se produce un efecto de mezclado del aire en las capas bajas de la atmósfera y se crea un efecto convectivo que eleva el calor acumulado cerca de la superficie y reduce la diferencia espacial; de temperatura. La dirección del viento puede influir en la ubicación del fenómeno puesto que puede transportar la IUC de un lugar a otro, o incluso desaparecerla si introduce a la ciudad aire frío de los alrededores (Voogt, op. cit., 2002). La humedad atmosférica tienen un efecto similar al de las nubes, reduce la radiación neta y acelera el enfriamiento potencial de las superficies; con una humedad atmosférica alta se reduce la intensidad de la IUC.

Ubicación geográfica. Las ciudades alojadas en costas, áreas montañosas, desiertos, etc. Tienen un clima y topografía que puede ser diferente de sus alrededores rurales, y que juegan un papel importante en la aparición de la IUC. Las influencias locales o regionales de, por ejemplo, sistemas de viento pueden afectar las islas de calor. Las ciudades ubicadas en regiones costeras pueden experimentar enfriamiento de temperaturas urbanas en el verano, cuando las temperaturas de la superficie del mar son mas frías que la tierra y los vientos soplan hacia la costa.

Hora del día. Todas las islas de calor se forman a causa de las diferencias en las velocidades de calentamiento y enfriamiento de las ciudades relativas a sus alrededores. La isla de calor que se desarrolla en la capa de dosel urbano (ICDU), se incrementa con el tiempo, desde que se oculta el sol hasta un máximo, el cual puede ocurrir a cualquier hora antes de que amanezca. En el día, la intensidad de la ICDU tiene un valor pequeño en algunos casos negativo (que se llama isla fría) en algunas partes de la ciudad, sobre todo donde hay sombra por edificios altos u otras estructuras, y un retraso en el calentamiento debido al almacenamiento de calor por materiales urbanos. Respecto a la IUC en la superficie (IUCS) adquiere valores positivos tanto en el día como en la noche, debido a las superficies urbanas más calientes. La IUCS diurna es usualmente más grande porque la radiación solar contribuya a aumentar las superficies urbanas. Por otro lado, la IUC de capa límite es generalmente positiva tanto de día como de noche pero mucho mas pequeña en magnitud que la IUCD y la IUCS.

Estación del año. Las variaciones estacionales en los patrones de tiempo atmosférico afectan la frecuencia y magnitud de la IUC, p.e., en ciudades ubicadas en las altitudes medias son sustancialmente fuertes en las estaciones de verano o invierno. En climas tropicales, la estación seca puede favorecer grandes magnitudes de IUC.

Forma de la ciudad. Este término comprende los materiales usados en la construcción, las características superficiales de la ciudad, tal como dimensiones constructivas y espaciamiento, propiedades térmicas y cantidad de espacio verde. La IUC encuentra factores favorables para su formación tales como:

- Materiales de construcción relativamente densos que son lentos para calentarse y enfriarse, y almacenan una gran cantidad de energía; es decir las propiedades térmicas de materiales varían sustancialmente de aquellos materiales encontrados de manera natural en áreas rurales, por ejemplo, la capacidad de calor específico (capacidad calorífica por unidad de masa) de suelo húmedo es aproximadamente 50% más grande que el de asfalto y concreto (Oke, 1987).
- Reemplazo de superficies naturales por superficies impermeables, que conducen a un área urbana mas seca, donde hay menos agua disponible para evaporación, por lo que el aire se calienta más.
- Menor reflectividad de radiación solar, es decir albedos más pequeños. Las superficies oscuras como calles asfaltadas absorben más luz del sol y llegan a estar más calientes que las superficies naturales.
- Efecto de cañón. Debido a la topografía, como de cañón, en áreas urbanas, especialmente en lugares de edificios altos la radiación de onda corta es más eficientemente absorbida en las ciudades que en las áreas rurales. Esta topografía de cañón conduce a un incremento de las superficies absorbentes y permite reflexiones múltiples de radiación solar, con el efecto comentado anteriormente. Esta complicada geometría también permite mejor absorción de la luz solar durante periodos de altos ángulos cenitales, como en el amanecer y el atardecer, lo que tienen como consecuencia

disminuir el albedo de toda el área urbana (figura 2.4), independientemente de los albedos individuales de los materiales urbanos.



Figura 2.4 Sombra de edificios sobre la ciudad. (pasaporteblog.com, 2009)

- Decremento de vista de cielo. La geometría de cañón también decrece la eficacia con la que el área urbana puede radiar radiación de onda larga hacia la atmósfera y al espacio (figura 2.5). Las múltiples superficies permiten la reabsorción de la radiación terrestre, inhibiendo la pérdida de calor mediante el enfriamiento radiativo.



Figura 2.5 Geometría del efecto cañón (www.rinnovabili.it/albedo-urbano, 2009)

Función de la ciudad. Tienen que ver con la actividad intra-urbana y por tanto, con importantes diferencias, respecto de las realizadas en áreas rurales, lo que suma un factor de los causales para el desarrollo de la IUC. Estas son básicamente tres: generalización de calor antropogénico, contaminación y evapotranspiración. Las fuentes de calor antropogénico incluyen, el desprendido por el uso de energía en el transporte, industria, calefacción, alumbrado (Serra, 2007). El uso de combustibles fósiles es importante para la formación de la IUC (Sailor y Lu, 2004), sobretodo en la estación de invierno de ciudades en clima muy frío (Taha, 1997). En otra condición, ciudades muy densamente pobladas puede tenerse calentamiento antropogénico que resulta de un alto consumo de energía para enfriamiento de los edificios. Por otra parte, la atmósfera de áreas urbanas típicamente tienen niveles de contaminación más altos que las áreas rurales de alrededor; particularmente, aerosoles pueden producir un pseudo-invernadero, absorbiendo y re-irradiando radiación de onda larga e

inhibiendo el enfriamiento radiativo superficial (streutker, 2003). Por otra parte, tenemos que en las áreas urbanas, en las que típicamente se reemplazan las superficies naturales por artificiales, hay una marcada carencia de vegetación en el ambiente urbano. Esto reduce la transpiración como una fuente de pérdida de calor latente relativo a áreas rurales. El uso de superficies impermeables y drenaje transportan rápidamente el agua superficial fuera del área urbana, reduciendo la pérdida de calor latente mediante la evaporación. El fenómeno combinado, la evapotranspiración, tiene un importante papel en el balance de energía en las áreas rurales, debido al alto calor latente del agua. Por comparación, el calor latente de vaporización de agua es de $2.3 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$, mientras el calor específico de la mayoría de los materiales urbanos es del orden $10^3 \text{ Jk}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$.

2.4 EFECTOS DE LA IUC.

La IUC puede ocasionar efectos en las ciudades, ya sea negativa o positivamente (tabla 2.1). Si la temperatura del aire en la zona urbana es mayor que en las zonas rurales, y se rebasa la capacidad del organismo humano por mantenerse en un espacio confortable, se recurre entonces al uso de acondicionadores mecánicos (ventiladores, secos o húmedos, sistemas de aire acondicionado, etc.) además se libera más calor al aire, así como emisiones de gases de invernadero, degradando la calidad del aire (Rosenteld et, al. 1995), por lo que se aumenta el consumo de energía eléctrica y se refleja en un mayor desembolso económico (Svensson and Eliasson 2002); por otra parte también tiene efectos en la salud ya que aumenta el riesgo de padecer deshidratación, insolación o golpe de calor e incluso la muerte (Palecki et al. 2001). También puede proveer condiciones adecuadas para la

dispersión de enfermedades ocasionadas por vectores (Changman, et.al., 1996). Pero no todos los efectos son negativos, se ha encontrado, por ejemplo, que el tiempo de desarrollo de las plantas se reduce (Pavao-Zuckerman, Coleman 2005) y en invierno, sobre todo en las latitudes altas, ayuda a que este sea menos frío, con lo que, también se reduce el tiempo de utilizar la calefacción (Voogt op. Cit., 2004).

Efecto	TIPO
Confort humano	Positivo (invierno), Negativo (verano)
Uso de energía	Positivo (invierno), Negativo (verano)
Calentamiento del aire	Negativo
Uso de Agua	Negativo
Actividad biológica	Positivo
Hielo y nieve	Positivo

Tabla 2.1 Tipos de efectos de la IUC. (voogt op.cit., 2002).

2.5 INTENSIDAD DE LA IUC.

La intensidad de la IUC se refiere a su magnitud, en unidades de temperatura. Cuando se combinan condiciones atmosféricas favorables y superficiales, el promedio de intensidades encontradas va de 3 a 4°C (Allen et al. 2003) aunque en casos aislados se encuentra una cantidad tan grande como 12°C (Garcia, op. cit. 2002); La magnitud está relacionada al número de habitantes, entre más pobladores tiene una ciudad incrementa la temperatura del aire (Bokwa,2008), pero su relación fundamental consiste en las características de superficie tal como el Factor de Vista de Cielo (SVF) o el tipo y uso del suelo (Eliasson, 1994), indicando la importancia del efecto del viento y las nubes. Estacionalmente, la IUC es mayor durante el verano y otoño cuando las condiciones del tiempo atmosférico son favorables. La IUC tiene principalmente un desarrollo nocturno que se intensifica como

resultado de las diferencias en las velocidades de enfriamiento entre las áreas rurales y urbanas, aunque la sincronización exacta del valor máximo puede variar dependiendo de condiciones atmosféricas y de la estación año (Landsberg 1981; Oke 1982).

2.6 MITIGACIÓN DE LA IUC.

La primer forma de mitigar la IUC es con un diseño adecuado de la superficie del suelo, crear superficies geométricas que obstruyan el cielo por edificios y otros objetos urbanos expresado como el SVF, así como aumentar las áreas verdes en la ciudad (Oke, 1991)

Otra forma de amortiguar la IUC es no construir edificios con materiales relativamente densos, ya que las propiedades térmicas de la superficie, especialmente el control de recepción térmica aumenta el calor en la superficie (Synnefa op. Cit., 2008)

Aunque factores como el viento y las nubes no se pueden controlar, tal vez un adecuado diseño urbano podría ayudar a liberar la cantidad de energía ganada, porque se ha observado que la intensidad de la IUC cede cuando el cielo está despejado en su totalidad y existen corrientes de vientos (Eliasson, 1994).

2.7 INTENSIFICACIÓN DE LA IUC POR EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL.

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y SO₂, principalmente) parece que tendrá implicaciones significativas en el clima a escala global y regional, particularmente en

el número de eventos extremos, así que existe la posibilidad de que el fenómeno de la IUC pudiera ser exacerbado por este cambio climático global (TPCC, 2007). La modelación de la IUC puede realizarse mediante modelos estadísticos de reducción de escala (Wilby y Dawson, 2007), bajo la propuesta de escenarios que dependerán del desarrollo socioeconómico regional en los que se toman en cuenta factores como el crecimiento de la riqueza (producto interno bruto) y variación demográfica. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) ha propuesto tres trayectorias distintas (tabla 2.2).

Escenarios del IPCC	A1	A2	B2
Nombre	Mercados múltiples	Empresa nacional	Tutela local
Crecimiento de la población	Bajo (7,000 millones)	Elevado (15,000 millones)	(Medio (10,000 millones)
Crecimiento del PIB mundial	Muy elevado, 3.5% anual (550 billones de dólares)	Medio, 2% anual (243 billones de dólares)	Medio, 2% anual (235 billones de dólares)
Grado de convergencia: cociente de la relación entre PIB per cápita de los países ricos y el de los países pobres.	Elevado (1.6)	Bajo (4.2)	Medio n(3.0)
Emisiones	Elevadas	Medias-elevadas	Medias-bajas

Tabla 2.2 Características de los escenarios socioeconómicos del IPCC (las cifras entre paréntesis corresponden a proyecciones para 2100)

CAPITULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio abordó la IUC con una metodología integral, a la cual se añadió como aportación para el entendimiento del fenómeno el diseño de un sistema dinámico; por tal motivo fue necesario contar con diferentes materiales para cada método que es el tema de este capítulo.

3.1 CLIMATOLOGÍA E INTENSIDAD DE LA IUC DE DOSEL URBANO

Con el propósito de conocer la climatología e intensidad de la IUC en Mexicali B.C., se construyó una base de datos con temperaturas horarias recolectadas en cinco estaciones meteorológicas (tabla 3.1) durante el periodo 2000-2005, las cuales tienen usos de suelo contrastantes a su alrededor; Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Instituto Tecnológico de Mexicali (ITM) y Centro de Bachilleratos (COBACH) son estaciones que forman parte de la red de calidad del aire en Mexicali, B.C; Las estaciones meteorológicas Grand street y Ethel se encuentran en Calexico, CA., USA., por lo que el estudio, como todos los que se deben realizar en las ciencias atmosféricas, no toma en cuenta la división política, pues el transporte de cualquier propiedad física ó química es independiente del territorio (Figura 3.1), así que se analizaron las temperaturas del aire de ambas ciudades para tener una idea de la distribución espacial del fenómeno.

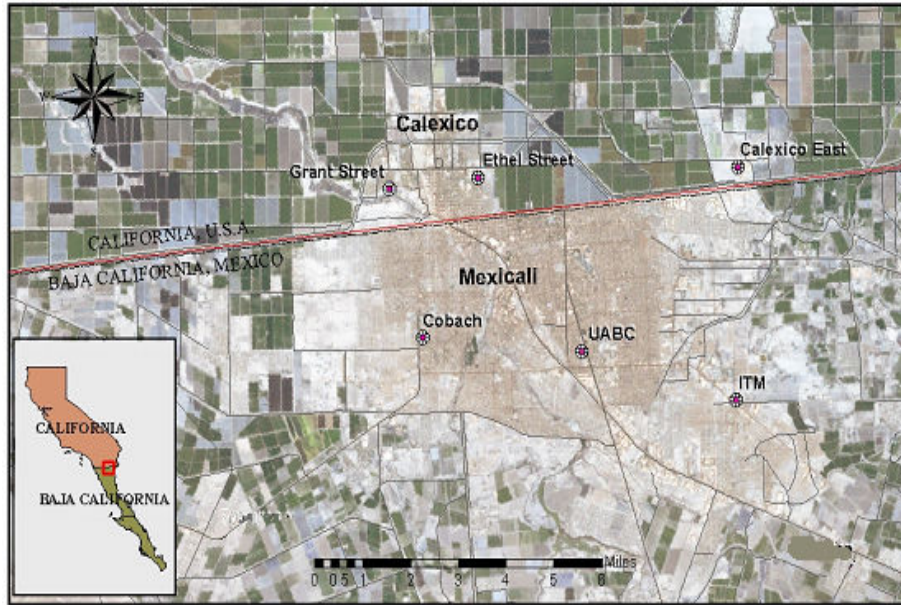


Figura 3.1 Ubicación espacial de estaciones meteorológicas.

Se utilizaron dos técnicas para validar la climatología e intensidad de la IUC, por un lado la estadística descriptiva y por otro un sistema dinámico matemático que fue modelado con *Stella*. En ambas técnicas fue necesario hacer una selección de datos promedios de las 24 horas del día con el periodo 2000-2005.

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
UABC	32.6291	-115.447
ITM	32.615	-115.392
COBACH	32.6336	-115.504
GRANT STREET	32.674	-115.515
EAST	32.6778	-115.39

Tabla 3.1 Ubicación de estaciones meteorológicas.

3.1.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA E INFERENCIAL APLICADA A DATOS HORARIOS.

De la información contenida en la base de datos se tomó la temperatura mínima horaria para ser procesada en los períodos temporales anual, mensual, diario y horario; los datos fueron

sometidos a un análisis exploratorio mediante la realización de gráficas (histogramas, cajas y ejes, graficas de dispersión) y el cálculo de estadísticas descriptivas básicas (análisis de frecuencias, cálculo de momentos estadísticos de primero y segundo orden, diferencias térmicas entre estaciones meteorológicas). Posteriormente se realizó un análisis térmico temporal para estimar tendencias y ciclos estacionales. Todo el procesamiento de datos se realizó mediante el software Statistica 6.0; dicho análisis permitió detectar la fenomenología temporal de la(s) isla(s) urbanas de calor que se presentan en la ciudad de Mexicali, B.C., y corroborar su presencia e intensificación a lo largo del tiempo analizado.

Con los promedios mínimos mensuales para cada estación meteorológica se procedió a generar un análisis de regresión simple con el modelo $y = mx + b$, donde "y" es la variable dependiente (temperatura), "m" la pendiente, "x" la variable independiente (año) y "b" el origen de la recta; se determinó la significancia de las tendencias con un error del 5% ($\alpha=0.5$) y se pudo observar el comportamiento de las temperaturas en su respectivo periodo. Para decidir que meses resultan convenientes estudiar de forma más profunda, se tomaron aquellos modelos en donde la pendiente (m) fuese mayor.

El análisis exploratorio del periodo temporal diario se efectuó con la misma metodología de temporalidad mensual. La elección de días a estudiar de manera horaria fue hecha a través de una gráfica de distribución de datos diarios que incluyó las 5 estaciones y con ello saber en que días se dieron las mayores diferencias térmicas.

Al definir los días con mayor intensidad de la IUC, se procedió a identificar la intensidad máxima del fenómeno para cada uno de los casos. En este punto se aplicaron dos técnicas: la estadística y el sistema dinámico; este último se realizó con el propósito de validar los resultados obtenidos con el primer método, puesto que el sistema dinámico es un modelo matemático ejecutado por medio de un computador elimina el error de sesgo al tomar en cuenta todos los decimales y así obtener resultados mas precisos.

- Proceso estadístico de determinación de intensidad de IUC

Para el proceso estadístico se elaboraron gráficas de distribución de datos con los puntos de muestreo (tabla 3.1), su eje Y = grados centígrados y el eje X = horas diarias, empezando con la hora 0 (12:00 a.m.) hasta llegar a la hora 23 (11:00 p.m.). Se hizo la comparación entre las estaciones urbanas y rurales, se determinó la IUC en el punto donde se encuentre la mayor diferencia térmica y fue tomada la hora correspondiente.

3.1.2 MODELACIÓN CON STELLA PARA DETERMINAR INTENSIDAD Y HORA DE IUC

Los días seleccionados en la etapa exploración del periodo temporal diario fueron adaptados a un sistema dinámico computacional (figura 3.2) desarrollado con Stella a fin de validar los resultados del párrafo anterior, el sistema denominado " IUC" fue dividido en dos subsistemas, el primero llamado "*Isotermas IUC*", cuyo proceso principal es interpolar temperaturas urbanas con las 3 estaciones urbanas por medio de la función algoritmo genético y el

segundo denominado "Intensidad y hora, que interactúa con el subsistema "isotermas IUC" al recibir como entrada la temperatura máxima del mismo, su objetivo principal arrojar como salida datos más detallados del fenómeno (ver apéndice A).

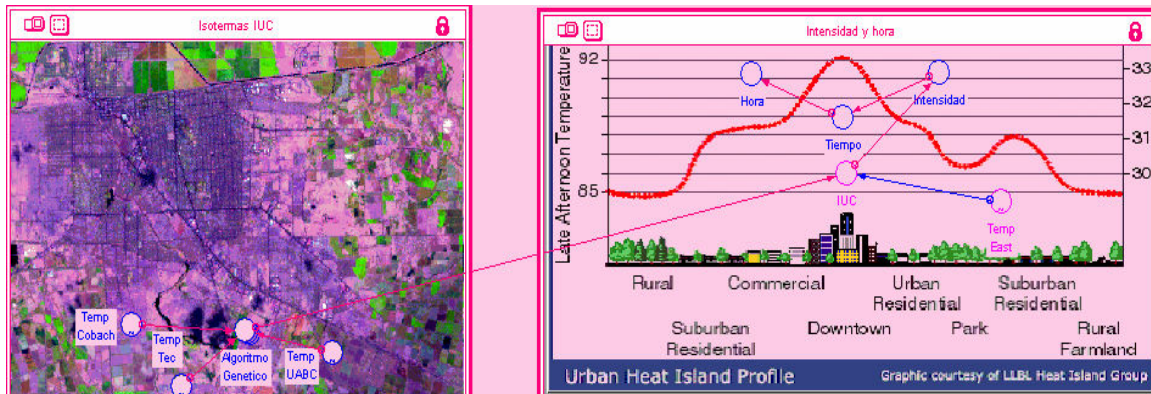


Figura 3.2 Modelo IUC.

3.2 CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA IUC DE DOSEL URBANO.

3.2.1 MAPAS ISOTÉRMICOS PARA LA CIUDAD DE MEXICALI.

Las isotermas fueron hechas utilizando los datos de la red de calidad del aire (tabla 3.7) y la información térmica procesada en el análisis estadístico; el contenido de las variables que se tomaron en cuenta fueron: latitud, longitud y temperatura mínima promedio. Se creó un archivo vector que contenía los puntos con unidad en metros, distancia de 1.0, en formato compatible con IDRISI 3.2 el cual es un software de sistemas de información geográfica que permite visualizar el comportamiento de las isoclinas de forma espacial, asimismo fue utilizado en este estudio como herramienta para extraer información

de las bandas visibles en ambas imágenes satelitales. Posteriormente se definirán un total de 110 columnas y 83 renglones bajo la fórmula:

Columnas = $\text{Maxx} - \text{Minx} / n$

Renglones = $\text{Maxy} - \text{Miny} / n$

Donde

Maxx: X máxima.

Minx: X mínima.

Maxy: Y máxima.

Miny: Y mínima.

n: Dimensión de matriz.

Se trazaron las isotermas georreferenciadas como archivo real-binario, a través de un modelo de elevación el cual fue encimado como una capa adicional en la imagen 2003 ya que es la más actual para inferir un cambio en la distribución espacial isotérmica y con ello detectar la IUC.

3.2.2 IDENTIFICACIÓN Y CREACIÓN DE MAPA USOS DE SUELO A TRAVÉS DE RECORRIDOS PEATONALES

Se identificaron los elementos característicos de usos de suelo más comunes y se compararon con un mapa de uso de suelo (2005) de la ciudad de Mexicali, proporcionado por el H. ayuntamiento de Mexicali, B.C.; el procedimiento para su identificación fue el que a continuación se describe.

Se tomó un radio de 1 km de cada estación meteorológica y se realizaron recorridos peatonales alrededor de cada estación, ya que

según Oke (1993) la mayor contribución a la temperatura ambiente se debe a la superficie que circunda a cada estación en un kilómetro a la redonda. Para caracterizar las distintas coberturas del suelo se tomaron en cuenta los elementos de la tabla 3.2.

ELEMENTO
Altura en pisos
Porcentaje de lote cubierto por la construcción
Porcentaje de suelo no cubierto (suelo desnudo)
Porcentaje de vegetación en el lote
Construcciones vecinas
Porcentaje de ventanas visibles
Materiales de construcción
Color de construcciones

Tabla 3.2 Elementos para caracterizar coberturas de suelos

Se anotaron los diferentes usos de suelo que se encontraron durante el recorrido peatonal alrededor de las estaciones meteorológicas; en la tabla 3.3 se muestra los usos de suelo urbano más comunes.

TIPO DE COBERTURA
Habitacional
Comercial
Oficinas
Áreas verdes
Plazas
Escuelas
Estacionamientos
Avenidas
Deportivas
Cuerpos de agua

Tabla 3.3 Usos de suelo más comunes encontrados

Los datos recolectados en el recorrido peatonal fueron comparados con un mapa de uso de suelo del año 2005 el cual fue actualizado con la herramienta MapInfo 9.0; la primera captura se hizo con polígonos para después estimar las áreas de cada uso de suelo

que se identificó por un color particular dentro del software de diseño. La tabla 3.4 contiene las abreviaturas designadas a cada uso de suelo.

TIPO DE COBERTURA	ABREVIATURAS
Habitacional	HA
Comercial	CO
Oficinas	OF
Áreas verdes	AV
Plazas	PL
Escuelas	ESC
Estacionamientos	EST
Avenidas	AVE
Deportivas	DE
Cuerpos de agua	CA

Tabla 3.4 Usos de suelos y sus abreviaturas.

3.3 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA IUC Y EXPANSIÓN URBANA

3.3.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA IUC de 1960 al 2005.

Se calcularon los promedios anuales con una segunda base de datos de temperaturas mínimas diarias de los años 1960 al 2005, las cuales corresponden a las estaciones climatológicas de Mexicali, B.C. (CNA) y Valle Imperial, C.A. (Distrito de Riego). A partir de esa información se realizó un análisis de regresión lineal simple con la variable año como independiente y la temperatura mínima del aire como variable dependiente, determinando la significancia de la tendencia con una confiabilidad de 95%. Este análisis permitió comparar las velocidades de calentamiento anual de ambos lugares.

3.3.2 CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA

Para estimar el crecimiento urbano en un periodo de 10 años, se realizó una composición en las imágenes Landsat 1993 y 2003 tomando como valores en Azul, Verde y rojo en las bandas 3, 4 y 5 respectivamente, las composiciones fueron recortadas y guardadas como .img para su importación al programa *MapInfo 9*, donde se trazó un polígono alrededor de la mancha urbana de forma discontinua en ambos casos, para posteriormente seleccionar el área con el cual se calculó la extensión en cada año (1993 y 2003).

3.4 IUC Atmosférica.

3.4.1 ANÁLISIS DE TEMPERATURA DEL AIRE 1993 y 2003.

Para el estudio de la expansión urbana y diferenciación térmica se utilizaron dos imágenes satelitales Landsat, cuyas características más sobresalientes se sintetizan en la tabla 3.5 Estas imágenes son de los años de 1993 y 2003, por lo que se tienen diez años de diferencia en su toma respectiva y ya que en esos años se tuvo un desarrollo urbano acelerado es probable que se encuentren diferencias térmicas interesantes.

Proyección	T. píxel	Banda	Sensor	Fecha y hora
UTM-9-n	60 mts.	1,2,3,4,5,6	TM	6 Abril 1993, 10:00
Us83tm11n	30 mts.	1,2,3,4,5,6-1, 6-2	ETM	12 Mayo 2003, 10:00

Tabla 3.5 Características de imágenes satelitales, Landsat 1993 y 2003.

Se utilizaron temperaturas de aire de diferentes estaciones (Tabla 3.7) correspondiente a los días 6 de Abril del 2003 a las 10:00 a.m. y 12 Mayo 2003 a las 10:00 a.m. momentos en que los satélites capturaron las imágenes de estudio.

El análisis espacial fue realizado utilizando las dos imágenes satelitales Landsat (tabla 3.5), ambas imágenes fueron igualadas tanto en proyección (US83) como en Datum (tm11n), tomando como punto de control las estaciones de calidad de aire y recortada solo en el área de estudio (tabla 3.6).

Sistema De referencia	Unidad	Ren.	Col.	Coodenada Superior Izquierda	Coodenada Inferior Derecha
US83TM11N	METROS	297	530	X=630315 Y= 3620265	X= 662115 Y= 3602445

Tabla 3.6 Características comunes de las imágenes landsat 1993-2003.

Los píxeles de la banda visible de ambas imágenes satelitales fueron transformadas a temperatura de superficie (TS); Se realizó un análisis de regresión entre la TS y la temperatura del aire (TA) obtenida de las estaciones correspondiente a cada píxel; con el modelo se recalcularon todos pixeles en cada imagen para convertirlas de TS a TA.

6 Abril 1993			12 Mayo 2003		
Estación (USA)	TA	TS	Estación	TA (°C)	TS (°C)
BLYTHE	20.5	23.8	UABC (México)	29	32.7
THERMAL	23.5	25.1	COBACH (México)	28.4	31.7
V.I.	21.6	24.9	ITM (México)	31	38.4
Calexico	22.2	25.70	ETHEL (USA)	28.9	32.3
			EAST (USA)	30	34.8

Tabla 3.7 Estación y temperaturas usadas para estimar la TA en las imágenes 1993 y 2003.

3.4.2 DIFERENCIA TÉRMICA 1993-2003

Debido a que las imágenes no son del mismo mes no es representativo hacer una comparación directamente entre ambas, por ello se efectuó la normalización de ambas aplicando la relación $T_i - T_M / DT$ en cada píxel, donde: T_i = valor del píxel, T_M = Media de la imagen y DT = Desviación estándar de la imagen.

Con las imágenes normalizadas se estimó la diferenciación térmica entre la de 2003 y 1993; la imagen resultante se reclasificó tomando el valor 0 todos los elementos que tuviesen valores de negativos o iguales a 0, y los datos positivos se agruparon por unidad.

A fin de conocer la diferencia térmica en la ciudad y sus alrededores se propuso analizar 4 transectos (tabla 3.8), y se generaron gráficas de perfiles térmicos para cada uno de ellos en las tres imágenes: 1993, 2003 y diferencia _ positiva 03-93.

Transecto	Orientación
1	Noroeste-Sureste
2	Suroeste-sureste
3	Noroeste-sureste
4	Oeste-este

Tabla 3.8 Trayectoria de transectos térmicos.

3.5 INTENSIFICACIÓN DE LA IUC POR EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

La generación de futuros escenarios se realizó mediante técnicas de regresión contra predictores estadísticamente seleccionados usando conjuntos de datos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), se calibraron las ecuaciones de regresión

resultante, en la que se encontró una igual dispersión de los residuales en toda la serie de valores del predictor modelado. Posteriormente se verificó la precisión de las ecuaciones resultantes con el escenario base (1961-1990) de Mexicali, B.C. reducido de escala y se comparó con los valores observados encontrándose buen ajuste. Ya con los modelos validados se construyeron series de proyecciones de temperatura mínima "reducida de escala". Para la generación de futuros escenarios en Downscaling se usó el modelo de circulación CGCM1 y se experimentó con los escenarios A1, A2 Y B2. Con ello se produjeron 20 ensambles de datos diarios, proyectado por el SDSM (Statistical Downscaling Model, por sus siglas en inglés) con 10950 datos. Estos escenarios de tendencias térmicas se elaboraron para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, también llamados 2020's, 2050's y 2080's, respectivamente.

CAPITULO IV.

RESULTADOS

4.1 CLIMATOLOGÍA E INTENSIDAD DE LA IUC DE DOSEL URBANO

La ciudad de Mexicali parece tener un clima térmico muy diverso, es por ello que se propuso realizar análisis mediante métodos de estadística descriptiva e inferencial de la temperatura del aire con el propósito de entender su comportamiento climatológico y encontrar el desarrollo de la isla urbana de calor; este análisis fue elaborado con la base de datos del periodo 2000-2005.

4.1.1 ESTADISTICA DESCRIPTIVA E INFERENCIAL

4.1.1.1 PROMEDIO ANUAL.

Como primer paso para la elaboración de la climatología de la IUC se analizaron los promedios mínimos anuales de las estaciones de calidad del aire de las ciudades de Mexicali, B.C. y Calexico, CA., a fin de tener un comparativo general de la tendencia que han tenido las temperaturas registradas durante el periodo 2000-2005; en la figura 4.1 se muestra claramente que la tendencia térmica anual existente no es similar en todas las estaciones, por ejemplo, para ITM la temperatura promedio mínima anual más alta fue en el 2003, con un valor de 19.0°C y el valor más bajo se presentó en el 2001, con un valor de 17.2°C, mientras que ETHEL tuvo su temperatura promedio

mínima anual más alta en el 2005, con 18.6°C, y la mas baja en 2001, con 15.9°C.

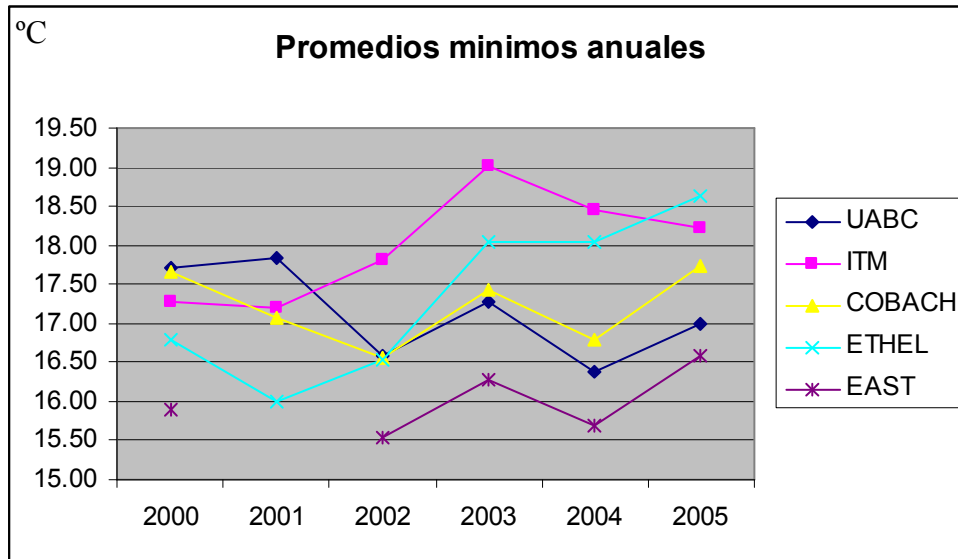


Figura 4.1 Promedios mínimos anuales de temperatura.

4.1.1.2 PROMEDIO MENSUAL.

Con el propósito de comparar las tendencias que han tenido las temperaturas mensualmente se realizó una grafica de dispersión con los promedio mensual del 2000 al 2005 (figura 4.2), se observar notablemente la diferencia que existe entre EAST, una estación rural, e ITM estación urbana, a lo largo del año.

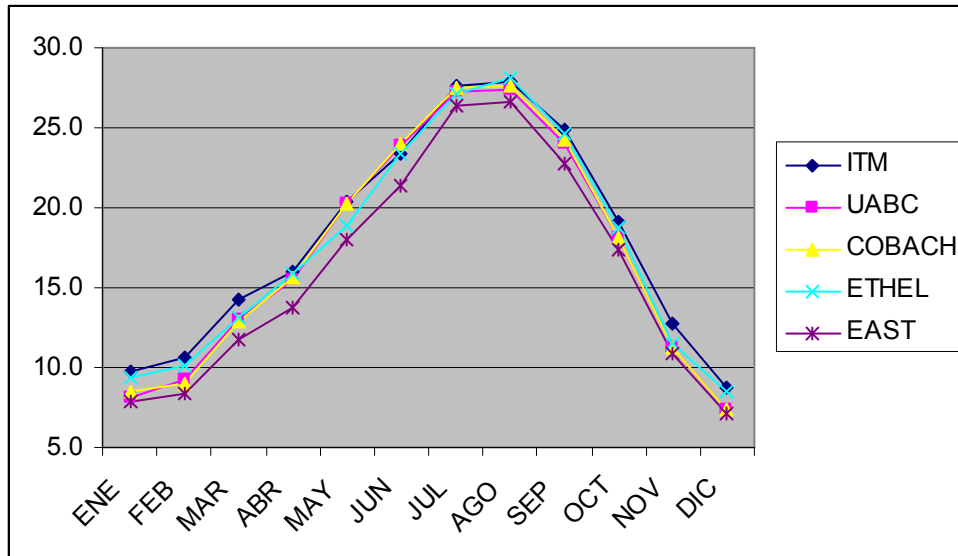


Figura 4.2 Promedios mínimos mensual de temperatura.

Con los datos agrupados en promedios mínimos mensuales para cada estación se generaron análisis de regresión simple, y se determinó la significancia de la tendencia con un error del 5% ($\alpha=0.5$).

Debido a que el incremento en la temperatura es reflejada en tendencias positivas, para decidir las estaciones climáticas donde se forma la IUC se tomó como indicador la variable m , que es la pendiente de la línea de regresión, (tablas 4.1 al 4.12); este análisis se realizó mensualmente; los meses que mostraron un incremento mayor fueron Enero, Febrero, Marzo y Noviembre, como consecuencia se determinó que la aparición del fenómeno ocurre en las estaciones de otoño, invierno, es mínima prácticamente nula en primavera y cabe destacar que en los meses de junio y julio, correspondientes al verano, el modelo no es de orden lineal por lo que no es posible estudiarlo con este método.

ESTACION	MODELO Enero (invierno)	m
UABC	TEMP = -657.9 + .33258*AÑO	+ .33258
ITM	TEMP = -1623. + .81548 * AÑO	+ .81548
COBACH	TEMP = -779.0 + .39328 * AÑO	+ .39328
ETHEL	TEMP = -624.5 + .31653 * AÑO	+ .31653
EAST	TEMP = -277.8 + .14267 * AÑO	+ .14267

Tabla 4.1. Modelos de regresión lineal simple de Enero (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO febrero (invierno)	m
UABC	TEMP = 634.97 - .3125 * AÑO	- .3125
ITM	TEM = 9.1038 + .60920 * AÑO	+ .60920
COBACH	TEMP = 334.32 - .1625 * AÑO	- .1625
ETHEL	TEMP = -178.8 + .09430 * AÑO	+ .09430
EAST	TEMP = -6.156 + .00732 * AÑO	+ .00732

Tabla 4.2 Modelos de regresión lineal simple de Febrero (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO marzo (primavera)	m
UABC	TEMP = -219.6 + .11613*AÑO	+ .11613
ITM	TEMP = -1485. + .74884 * AÑO	+ .74884
COBACH	TEMP = -1060. + .53567 * AÑO	+ .53567
ETHEL	TEMP = -1733. + .87184 * AÑO	+ .87184
EAST	TEMP = -850.1 + .43035 * AÑO	+ .43035

Tabla 4.3 Modelos de regresión lineal simple de Marzo (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO abril (primavera)	m
UABC	TEMP = 1011.7 - .4974*AÑO	- .4974
ITM	TEMP=-291.7 + .15362* AÑO	+ .15362
COBACH	TEMP= 344.20 - .1641 * AÑO	- .1641
ETHEL	TEMP=-153.0+.08433 * AÑO	+ .08433
EAST	TEMP=1011.7 - .4974 * AÑO	- .4974

Tabla 4.4 Modelos de regresión lineal simple de Abril (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO mayo (primavera)	m
UABC	TEMP = 286.92 - .1332*AÑO	- .1332
ITM	TEMP = -56.21 + .03825 * AÑO	+ .03825
COBACH	TEMP = 286.92 - .1332 * AÑO	- .1332
ETHEL	TEMP = -2147. + 1.0815* AÑO	+ 1.0815
EAST	TEMP= -36.73 + .02737 * AÑO	+ .02737

Tabla 4.5 Modelos de regresión lineal simple de Mayo (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO junio (verano)	m
UABC	TEMP = 1806.3 - .8901*AÑO	- .8901
ITM	TEMP = -714.3 + .37051 * AÑO	+ .37051
COBACH	TEMP = 941.94 - .4584 * AÑO	- .4584
ETHEL	NO APLICA	NA
EAST	TEMP = 166.72 - .0726 * AÑO	- .0726

Tabla 4.6 Modelos de regresión lineal simple de Junio (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO julio (verano)	m
UABC	TEMP = -115.9 + .07152*AÑO	+ .07152
ITM	TEMP = 708.08 - .3419 * AÑO	- .3419
COBACH	TEMP = -575.4 + .30105 * AÑO	+ .30105
ETHEL	NO APLICA	NA
EAST	TEMP = 328.69 - .1509 * AÑO	- .1509

Tabla 4.7 Modelos de regresión lineal simple de Julio (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO agosto (verano)	m
UABC	TEMP = 184.44 - .0784 *AÑO	- .0784
ITM	TEMP = -151.9 + .08977 * AÑO	+ .08977
COBACH	TEMP = 403.80 - .1879 * AÑO	- .1879
ETHEL	TEMP = -458.3 + .24288 * AÑO	+ .24288
EAST	TEMP = --216.3 + .12133* AÑO	+ .12133

Tabla 4.8 Modelos de regresión lineal simple de Agosto (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO septiembre (otoño)	m
UABC	TEMP 949.53 - .4622*AÑO	- .4622
ITM	TEMP = 144.27 - .0596* AÑO	- .0596
COBACH	TEMP = 532.16 - .2536 * AÑO	- .2536
ETHEL	TEMP = -332.6 + .17843 * AÑO	+ .17843
EAST	TEMP = -86.32 + .05433 * AÑO	+ .05433

Tabla 4.9 Modelos de regresión lineal simple de Septiembre (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO octubre (otoño)	m
UABC	TEMP = 597.26 - .2892*AÑO	- .2892
ITM	TEMP = -364.6 + .19161 * AÑO	+ .19161
COBACH	TEMP = 31.647 - .0067 * AÑO	- .0067
ETHEL	TEMP = -811.6 + .41461 * AÑO	+ .41461
EAST	TEMP = -356.7 + .18667 * AÑO	+ .18667

Tabla 4.10 Modelos de regresión lineal simple de Octubre (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO noviembre (otoño)	m
UABC	TEMP = 352.68 - .1705 *AÑO	- .1705
ITM	TEMP = -888.4 + .45000 * AÑO	+ .45
COBACH	TEMP = -315.4 + .16317 * AÑO	+ .16317
ETHEL	TEMP = -1461. + .73524 * AÑO	+ .73524
EAST	TEMP = -155.1 + .08283 * AÑO	+ .08283

Tabla 4.11 Modelos de regresión lineal simple de Noviembre (promedio 2000-2005)

ESTACION	MODELO diciembre (invierno)	m
UABC	TEMP = 372.127-0.1821*AÑO	-0.1821
ITM	TEMP = -703.7 + .35576 * AÑO	+ .35576
COBACH	TEMP = -72.41 + .03983 * AÑO	+ .03983
ETHEL	TEMP = -326.6 + .16734* AÑO	+ .16734
EAST	TEMP = -617.8 + .31192 * AÑO	+ .31192

Tabla 4.12 Modelos de regresión lineal simple de Diciembre (promedio 2000-2005)

4.1.1.3 PROMEDIO DIARIO.

A partir del análisis mensual se realizó un estudio más detallado en los meses resultantes con mayor tendencia al incremento de temperaturas que fueron Enero, Febrero, Marzo y Noviembre; con el promedio mínimo diario (2000-2005) se elaboraron gráficas para cada mes y de esta manera visualizar los días en que la diferencia térmica se intensifica (gráficas 4.3 a 4.6).

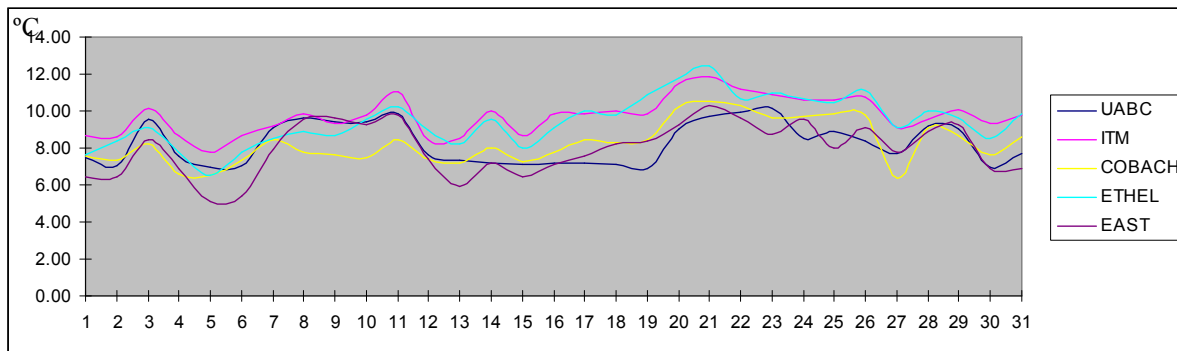


Figura 4.3 Temperaturas mínimas diarias, promedio de Enero (2000-2005)

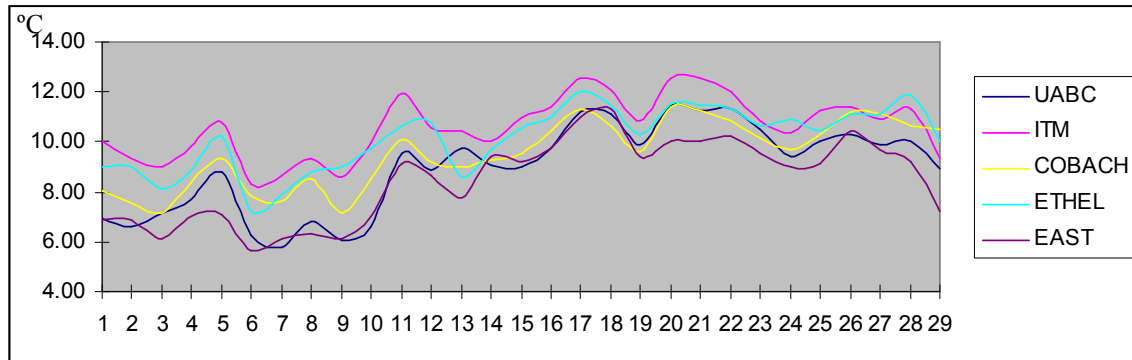


Figura 4.4 Temperaturas mínimas diarias, promedio de Febrero (2000-2005)

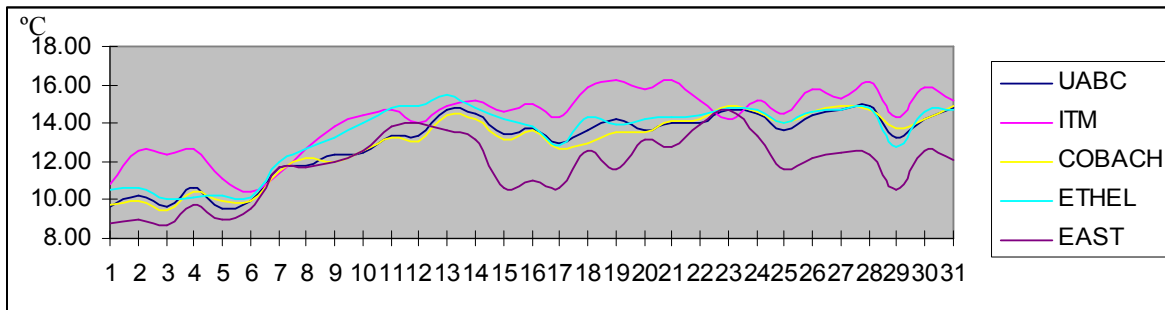


Figura 4.5 Temperaturas mínimas diarias, promedio de Marzo (2000-2005)

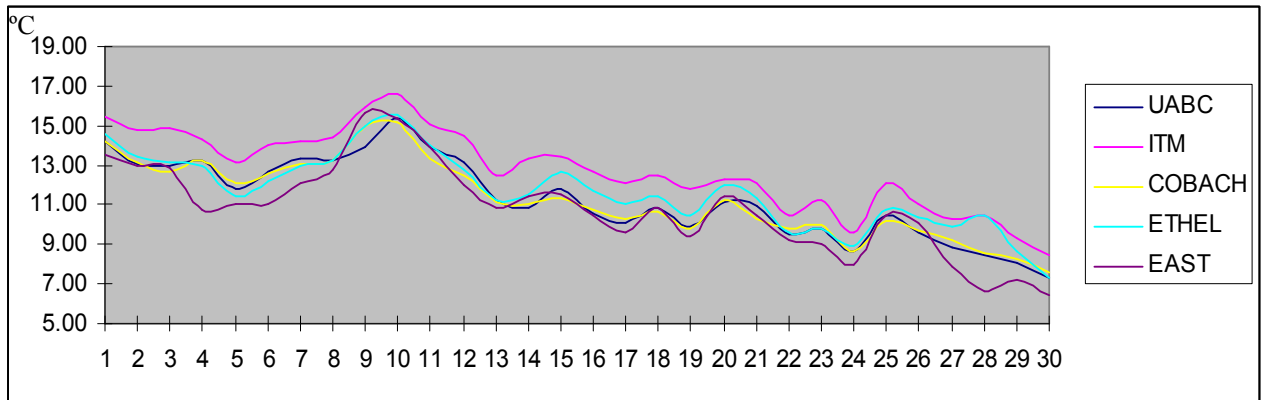


Figura 4.6 Temperaturas mínimas diarias, promedio de Noviembre (2000-2005)

Como resultado del análisis climatológico diario efectuado se encontró (tabla 4.13) que en el mes de enero la IUC aparece el día 5 prolongando su efecto hasta el día siguiente; para los días 19 y 27 vuelve a presentarse el fenómeno.

En febrero se volvió a presentar la IUC los días 4, 5 y 9; en contraste en el mes de marzo que es el mes con mayores ocurrencias se presentaron tanto a principios del mes como a mediados y finales (días 2, 3, 15, 16, 25, 26, 27 y 29); por ultimo en noviembre, un mes característico de otoño, la IUC solo sucedió durante dos días, el primero a principios de mes y el segundo al final del mismo (días 4 y 28, Tabla 21).

MES	DIAS
Enero	5, 6, 19, 27
Febrero	4, 5, 7, 9
Marzo	2, 3, 15, 16, 25, 26, 27, 29
Noviembre	4, 28

Tabla 4.13 Meses y días en que aparece la IUC.

4.1.1.4 PROMEDIO HORARIO.

Finalmente con los resultados del análisis diario se efectuó un estudio estadístico más detallado a nivel horario tomando los promedios de temperatura en cada estación, con el propósito de encontrar tanto la hora en que aparece la IUC, como su intensidad.

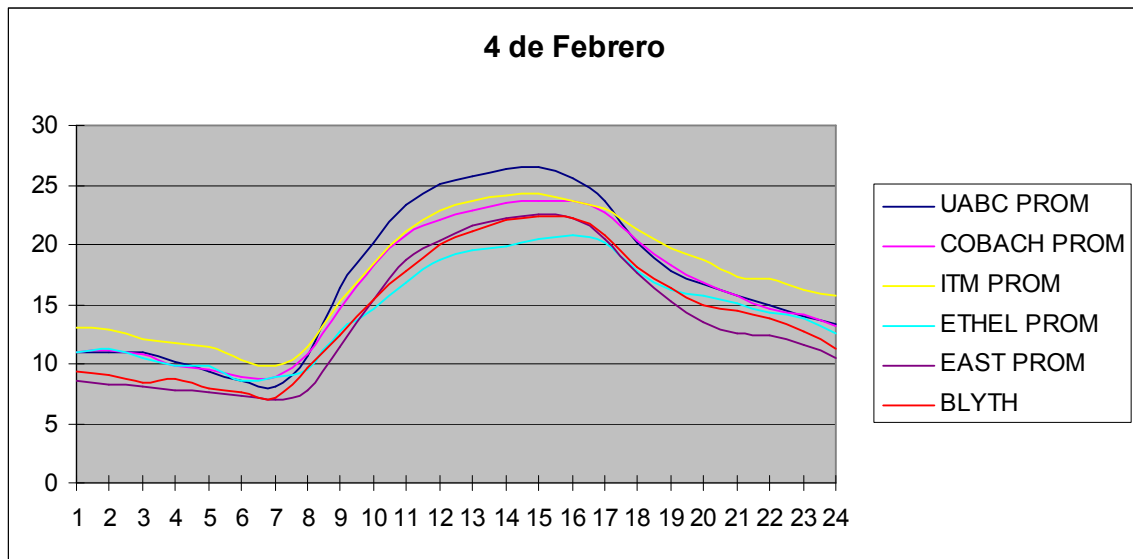


Figura 4.7 Temperaturas mínimas horarias, promedio del día 4 de Febrero (2000-2005)

En base a lo explicado con antelación, la Isla Urbana de Calor más intensa se presentó el 4 de febrero a las 23:00 horas con una intensidad promedio de 5.3°C (figura 4.7); en segundo lugar apareció a las 6:00 horas una IUC promedio de 5.2°C el día 4 de Noviembre (figura 4.8); Con respecto a primavera, el 26 de Marzo el fenómeno tuvo una magnitud promedio de 5.1°C que es manifestado a las 18:00 horas, por ultimo a las 6:00 horas del 5 de Enero la IUC es de 4.8°C promedio (tabla 4.14).

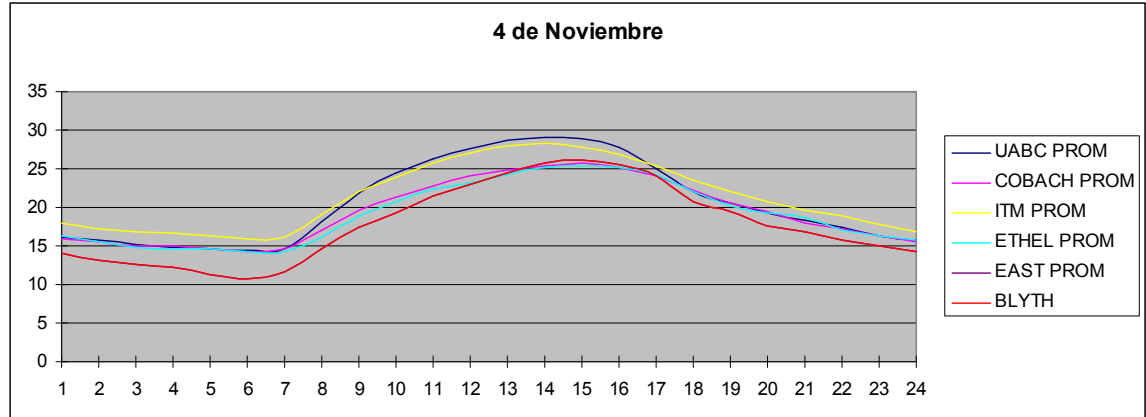


Figura 4.8 Temperaturas mínimas horarias, promedio del día de Noviembre (2000-2005)

Mes/día	Hora	Intensidad °C
Enero 5	6:00	4.8
Enero 6	7:00	3.7
Enero 19	7:00	1.2
Enero 27	6:00	1.7
Febrero 4	23:00	5.3
Febrero 5	4:00	2.6
Febrero 9	7:00	2.6
Marzo 2	6:00	3.6
Marzo 3	2:00	4.3
Marzo 15	5:00	4.2
Marzo 16	5:00	3.4
Marzo 25	12:00	4.9
Marzo 26	18:00	5.1
Marzo 27	4:00	4.2
Marzo 29	24:00	4.9
Noviembre 4	6:00	5.2
Noviembre 28	9:00	4.4

Tabla 4.14 Climatología de la IUC.

4.1.2 MODELACIÓN CON STELLA PARA DETERMINAR INTENSIDAD Y HORA DE IUC

A fin de validar tanto las horas de ocurrencia del fenómeno como la intensidad del mismo, se ejecutaron tres experimentos en el submodelo "Intensidad y hora" desarrollado en Stella, con

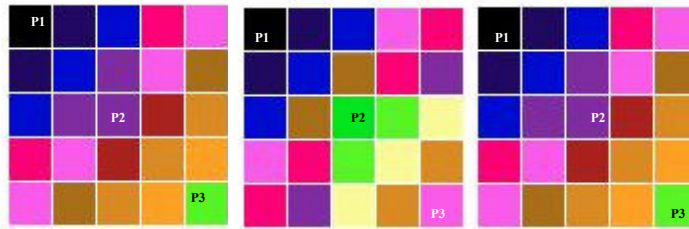
temperaturas reales promedio anual 2000-2005 para los días 4 de Febrero, 27 de Marzo y 4 de Noviembre.

Los estudios de casos realizados con el módulo "Isotermas IUC" fueron ejecutados con las temperaturas reales promedio anual 2000-2005. Con las estaciones ciudadanas se construyó un mapa de 25 puntos ordenados de acuerdo a su ubicación geográfica dentro de Mexicali, (ver tabla 4.15) formando con ellos una matriz de 5X5. Para cada experimento, se ejecutó el algoritmo genético en intervalos de una generación hasta llegar a 23, que es el número de simulaciones en Stella. De estos puntos se tomaron los mejores ajustes presentados por los individuos más aptos.

Estación de Monitoreo	Ubicación Matriz	Coordenadas Geográficas
COBACH	P1 (x1, y1)	32° 38" N, 115° 30" O.
UABC	P2 (x3, y3)	32° 37" N, 115° 26" O.
ITM	P3 (x5, y5)	32° 36" N, 115° 23" O.

Tabla 4.15 Ubicación en matriz y coordenadas geográficas de estaciones urbanas.

La siguiente tabla (Figura 4.9) muestra a grosso modo las diferentes intensidades encontradas para la isla urbana de calor; se puede destacar que en dos de los resultados (4 de Febrero y 5 de Noviembre) la IUC esta presente en la zona sureste de la ciudad mientras que en el día 25 de Marzo, la diferencia térmica es encontrada en el centro de Mexicali.



4 de febrero 25 de marzo 5 de noviembre
Figura 4.9 Resultados espaciales elaborados con Stella.

La tabla 4.16, muestra las diferentes intensidades encontradas para la isla urbana de calor en los estudios de caso; se puede destacar que en dos de los resultados (4 de Febrero y 5 de Noviembre) el fenómeno se encuentra cuando el sol ya se ha ocultado mientras que en el día 25 de Marzo no ocurre lo mismo, siendo su mayor incremento durante el día, esto puede deberse a la influencia de los vientos que ocurren durante este mes, que se dan con mayor frecuencia durante la noche (Enrique Dávalos, comentario personal, 2008), rompiendo así el efecto de calor nocturno en la ciudad.

Día	TMax Urbana °C	TRural(East) °C	Intensidad ($\Delta T_c - \Delta T_r$) °C	Hora
4 Feb.	15.75	10.44	5.31	23:00
25 Mar	30.57	25.7	4.87	12:00
4 Nov.	16.00	10.78	5.22	6:00

Tabla 4.16 Intensidad y hora de la IUC obtenida con STELLA.

4.2 CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA IUC DE DOSEL URBANO.

Después de determinar la climatología en los días en que existe mayor diferencia térmica entre la ciudad y sus alrededores, fueron elaboradas isotermas con registros del periodo 2000-2005, para

conocer la distribución de las temperaturas en la ciudad y saber el lugar o lugares en el que existe el mayor contraste térmico.

4.2.1 MAPAS ISOTÉRMICOS PARA LA CIUDAD DE MEXICALI

Espacialmente, el 4 de Febrero, la IUC tuvo lugar alrededor de la estación ITM con un valor de 15.7°C (Figura 4.10) el resto de la ciudad tuvo temperaturas homogéneas, claramente se puede distinguir la diferencia que existe con respecto a ETHEL (estación rural, 10.40°C) de Calexico, CA.

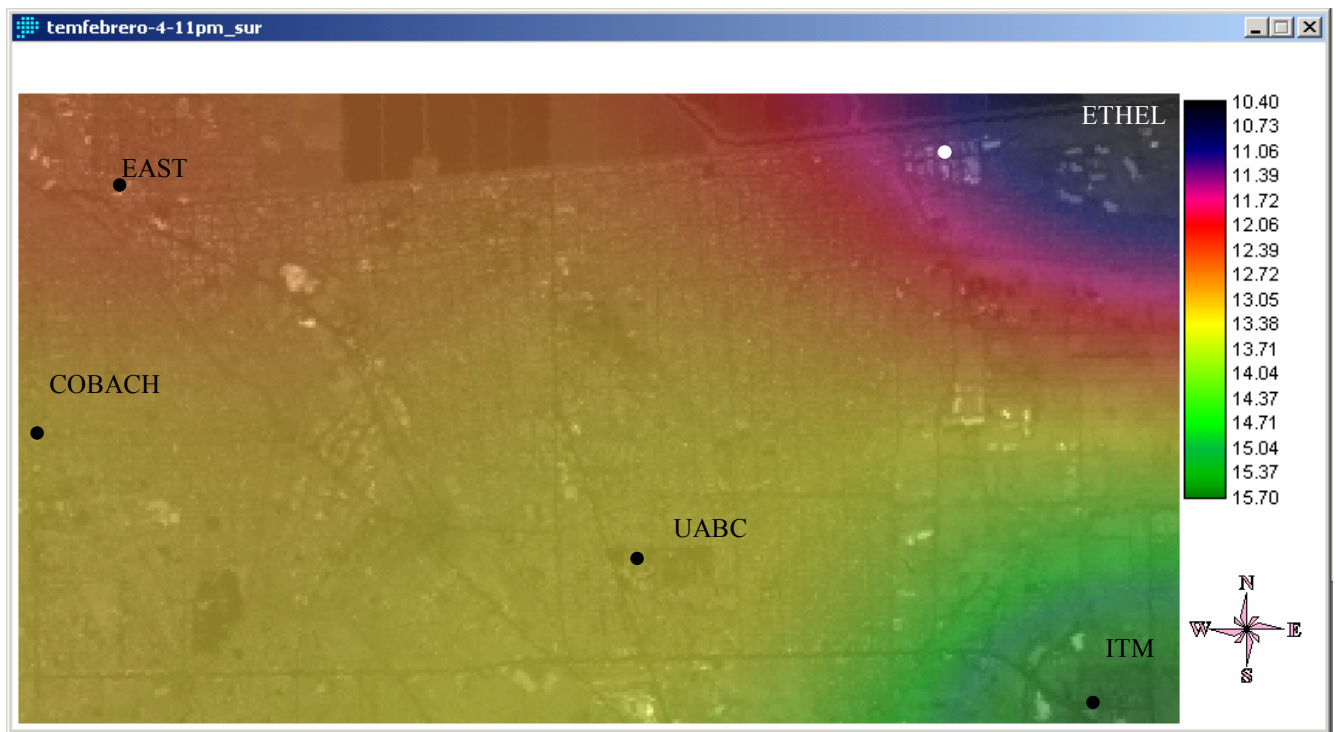


Figura 4.10 Distribución isotérmica del 4 de febrero a las 23:00.

Para el día 4 de Noviembre nuevamente la estación ITM tuvo la temperatura más alta, 16.3°C (Figura 4.11), en el resto de la ciudad las temperaturas no fueron muy variables entre sí, y nuevamente existió una discontinuidad térmica importante en la estación rural (ETHEL, 10.7°C).

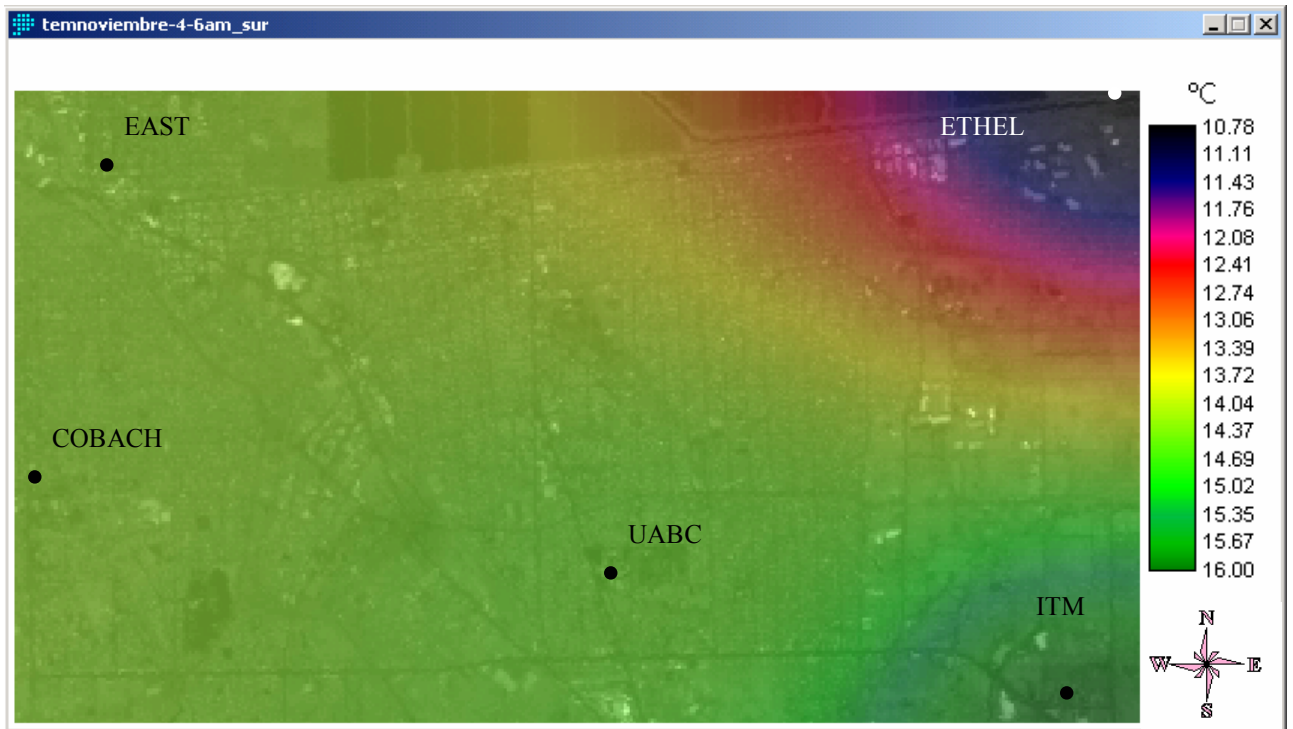


Figura 4.11 Distribución isotérmica del 4 de noviembre a las 6:00 a.m.

Con respecto al 26 de Marzo el fenómeno continuó apareciendo sobre ITM con una temperatura máxima promedio de 26.7°C (Figura 4.12), en el resto de la ciudad las temperaturas aunque aparentemente homogénea tuvo un descenso alrededor de estación meteorológica del campus UABC; la parte noroeste de la ciudad que corresponde a las afueras (ETHEL) tuvo el registro mas bajo con 21.5°C.

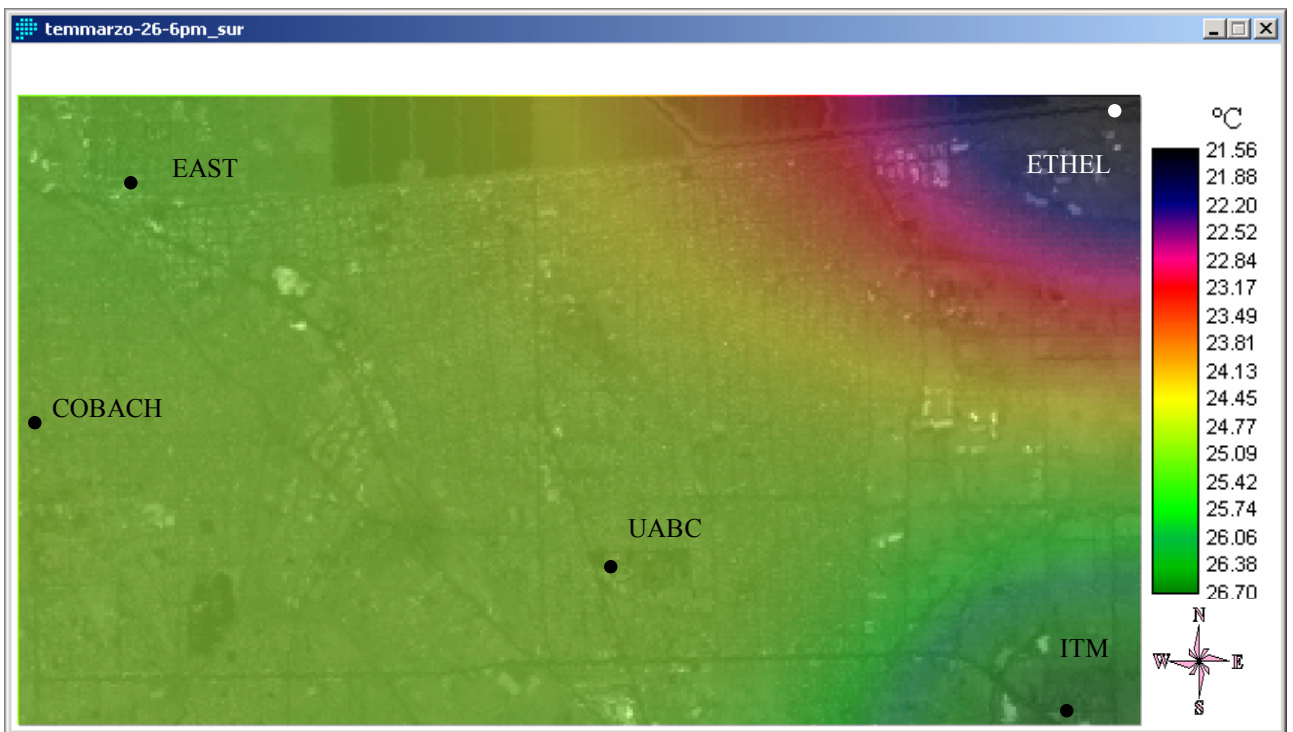


Figura 4.12 Distribución isotérmica del 26 de marzo a las 18:00 p.m.

Por ultimo, el 5 de Enero el fenómeno térmico modificó su comportamiento; a pesar de que ITM continúa con la presencia de la IUC (10.23 °C) aparece dentro de la ciudad una segunda IUC alrededor de COBACH, por otra parte UABC siguió manteniéndose relativamente fresco y ETHEL sin duda tuvo el valor mas bajo (5.5°C, figura 4.13).

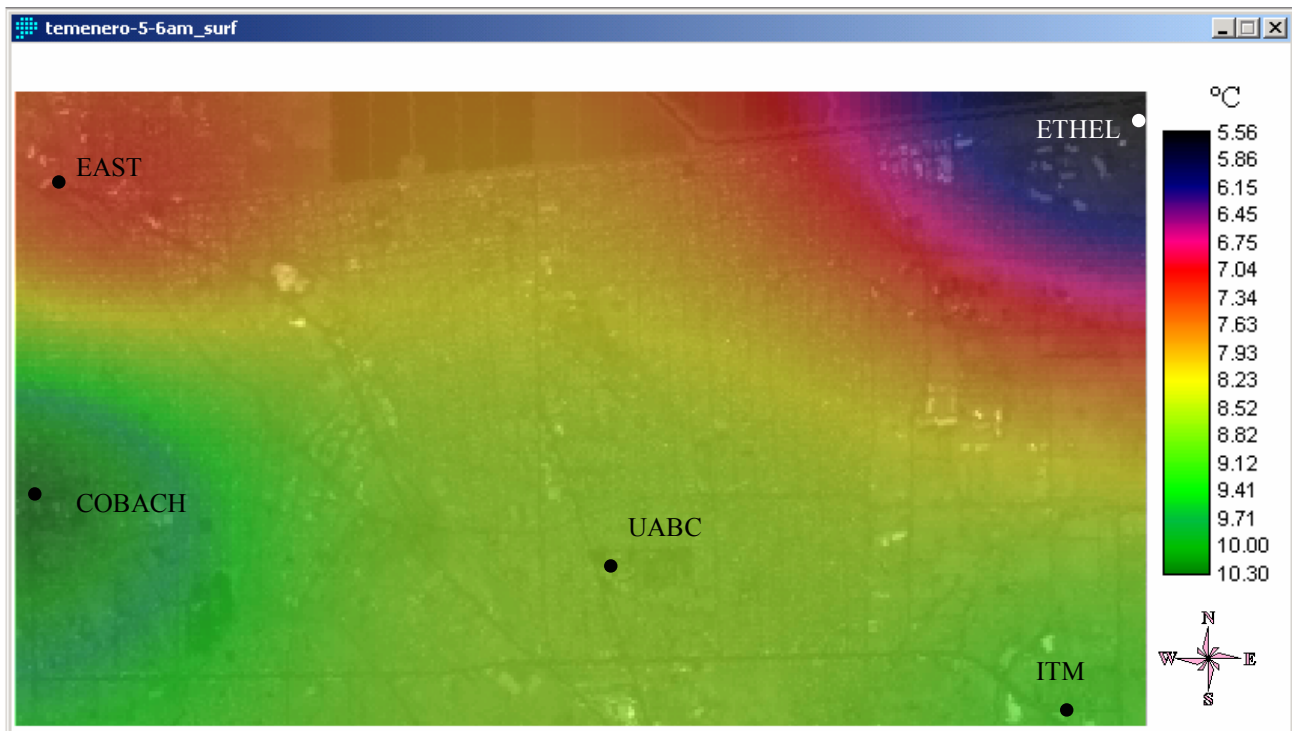


Figura 4.13 Distribución isotérmica del 5 de enero a las 6:00 a.m.

4.2.2 IDENTIFICACIÓN Y CREACIÓN DE MAPA USOS DE SUELO A TRAVÉS DE RECORRIDOS PEATONALES

Por otra parte el estudio de uso de suelo alrededor de cada estación de calidad del aire (UABC, COBACH e ITM) dio como resultado en términos generales lo que a continuación se describe.

COBACH, se localiza en la parte oriente de la ciudad, dentro del Colegio de Bachilleres; el porcentaje mayor es habitacional (69.11%) y escolar (18.9%), mientras que su porcentaje de área verde es solo 2.45% (Figura 4.14).

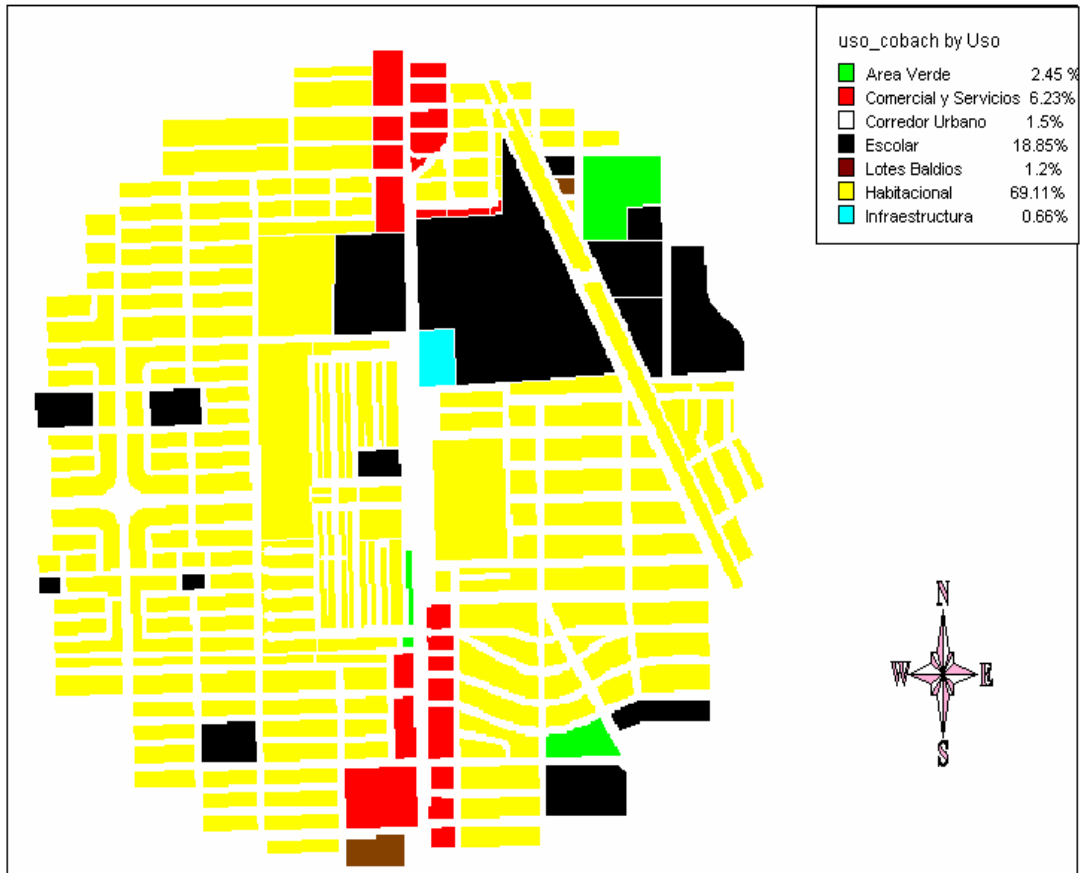


Figura 4.14 Mapa de uso de suelo COBACH.

Por otro lado la estación UABC está localizada en el instituto de ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California; predomina el uso de suelo habitacional (55%), siguiendo en extensión el uso educativo con un 20.13% y un porcentaje de vegetación importante de 7.15%, (Figura 4.15).

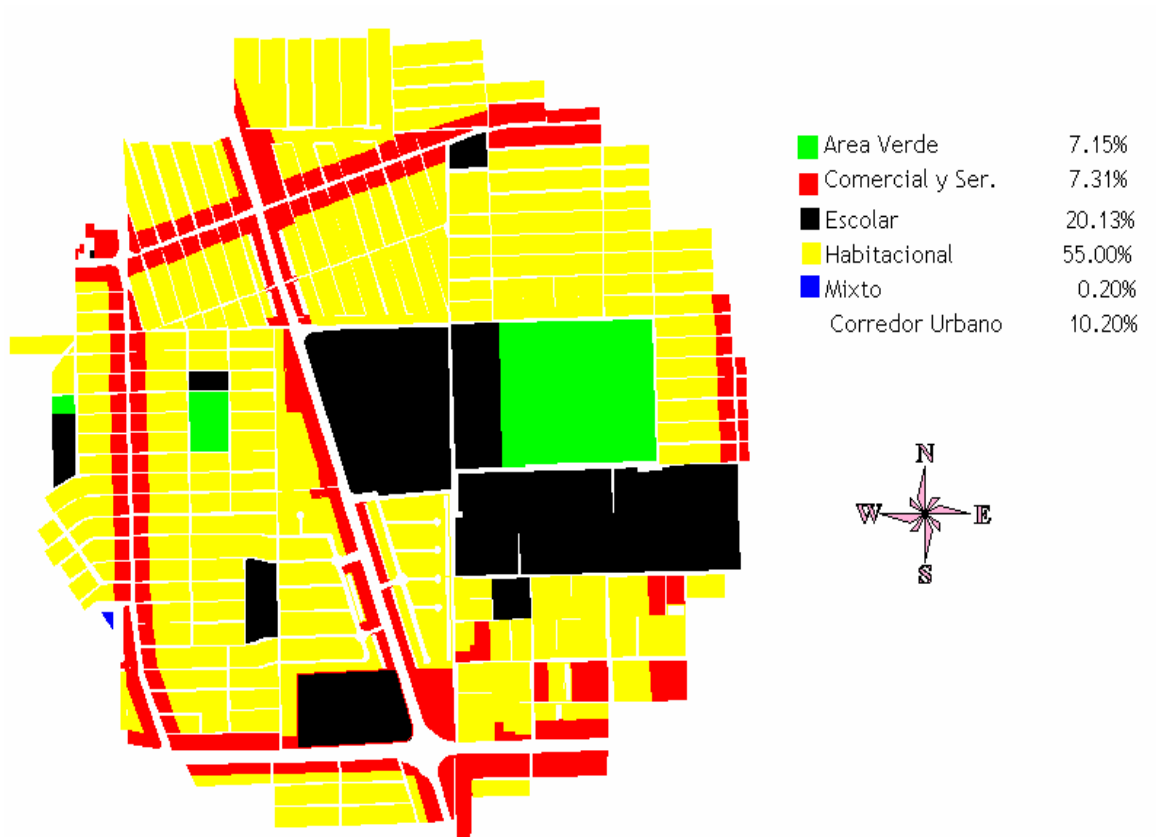


Figura 4.15 Mapa de uso de suelo UABC.

Finalmente ITM, se encuentra ubicada en las instalaciones del centro educativo Instituto Tecnológico de Mexicali, en la parte este de la ciudad, es una zona que comparte su uso con el habitacional (25.8%) y lotes baldíos (20.5%), siguiéndole posteriormente el uso industrial (15%, Figura 4.16)

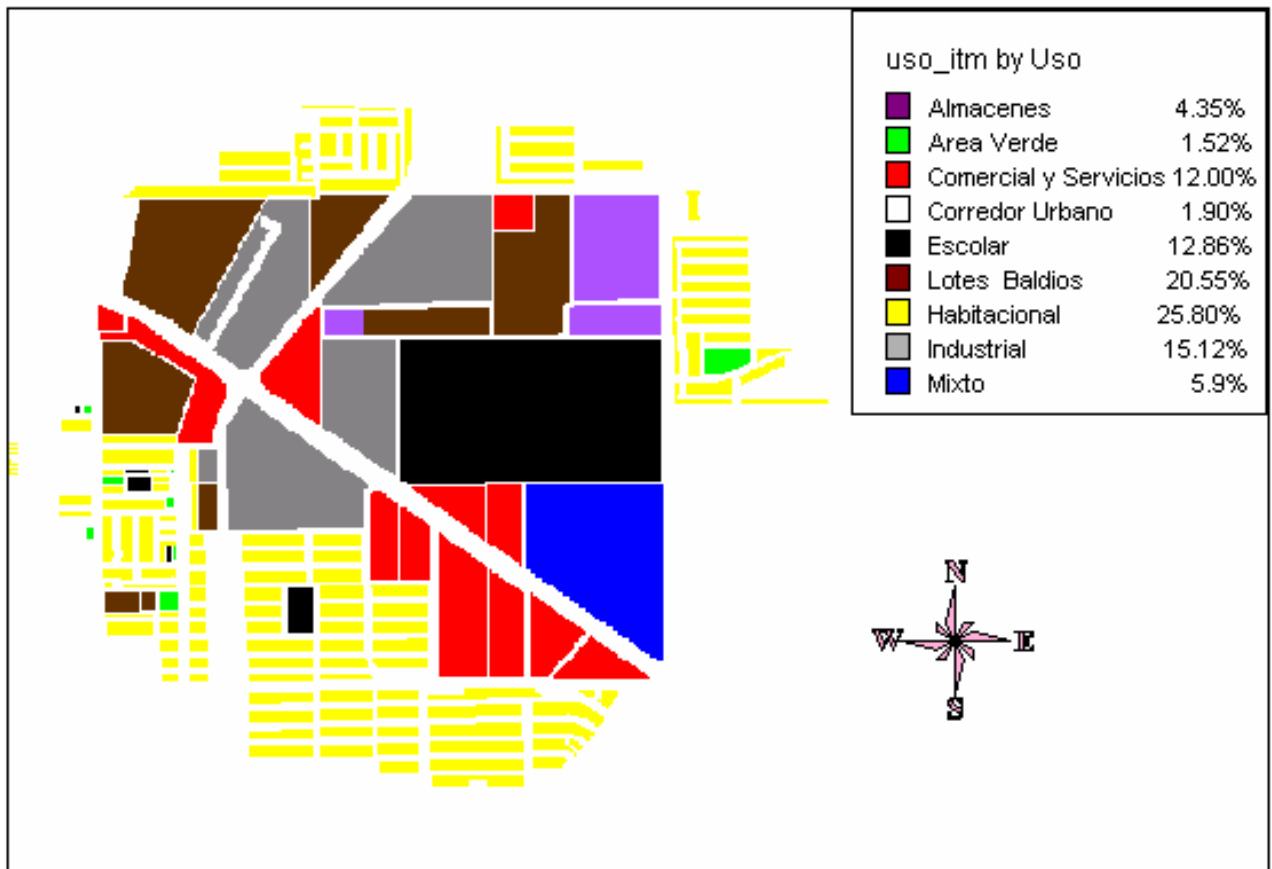


Figura 4.16 Mapa de uso de suelo ITM.

A manera de comparativo entre las estaciones meteorológicas y los diferentes usos de suelo que circundan a cada una de ellas, se muestra la tabla 4.17:

Uso	UABC (%)	ITM (%)	COBACH (%)
Área verde	7.15	1.52	2.45
Com. Y Ser.	7.31	12.0	6.23
Escolar	20.13	12.86	18.85
Habitacional	55.0	25.80	69.11
Lotes Baldíos	0	20.55	1.20
Industrial	0	15.12	0
Corredor Urbano	10.20	1.9	1.50
Mixto	0.20	5.9	0.66
Almacenes	0	4.35	0

Tabla 4.17 Comparación de los usos de suelo en las estaciones urbanas.

4.3 DESARROLLO HISTÓRICO Y EXPANSION URBANA DE LA IUC.

4.3.1 EVOLUCIÓN DE LA IUC 1960-2005.

El análisis de regresión lineal simple, elaborado con las diferencias anuales de temperaturas mínimas promedio, entre las estaciones Mexicali, B.C., de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y Valle Imperial, CA. del Distrito de Riego de Valle Imperial de Estados Unidos nos indicó una tendencia positiva con una confiabilidad del 95% y un R^2 de 0.35; el modelo obtenido fue el siguiente:

$$IUC = -97.2194 + 0.049 * \text{AÑO.}$$

En la figura 4.17, se aprecia claramente como pasó a ser de una isla fría en la década de los 50's a una isla de calor a partir de 1990.

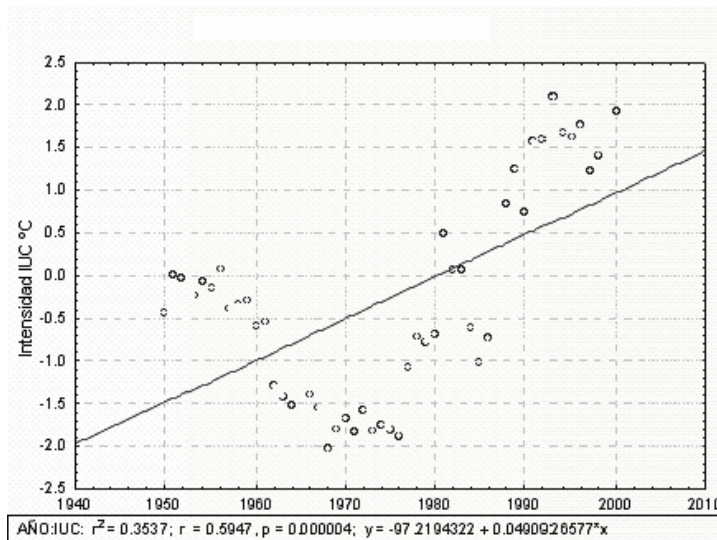


Figura 4.17. Crecimiento en la intensidad de la isla urbana de calor en la ciudad de Mexicali (1950-2000).

4.3.2 CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA 1993-2003.

La mancha urbana en 1993 contaba con una extensión de 91.43 Km², para el año 2003 la ciudad se extendió rápidamente alcanzando un área de 116.64 Km², es decir, el crecimiento para el periodo fue de 27.5%, dicho en otras palabras la ciudad tuvo un crecimiento anual del 2.75%. En la figura 4.18, el perímetro de 1993 está delimitado con color rojo y con color amarillo fue trazado el correspondiente al año 2003. El crecimiento más pronunciado se dio al sur de la ciudad, en menor medida al este y creció una pequeña porción al oeste, debido a que la ciudad colinda con la franja fronteriza no es posible crecer al norte.

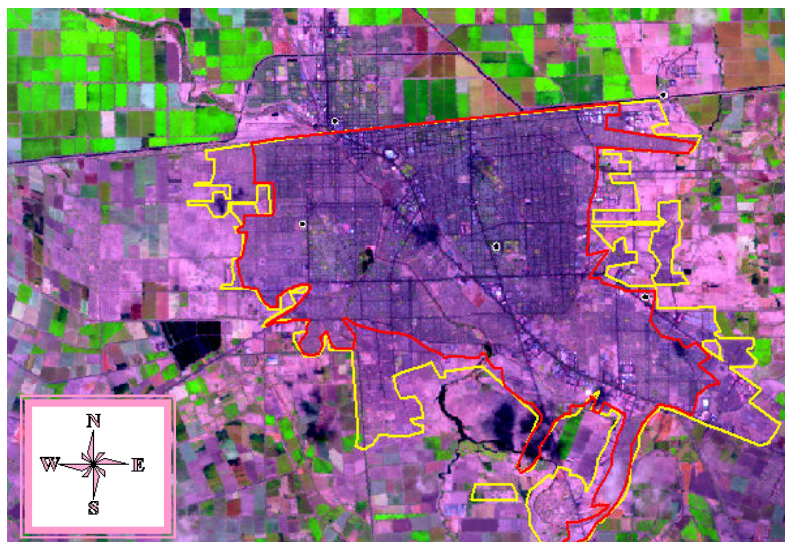


Figura 4.18 Imagen Landsat 2003 y desarrollo urbano de Mexicali 1993-2003.

4.4 IUC ATMOSFERICA.

La tabla 4.18 muestra las temperaturas superficiales (TS), obtenida con la banda térmica del satélite Landsat, y la correspondiente temperatura del aire (TA) obtenidas mediante un modelo de regresión lineal de primer orden. Cabe recordar que las imágenes satelitales fueron de los años 1993 y 2003.

TS y TA, 4 Abril 1993 10:00 AM			TS y TA, 12 Mayo 2003. 10:00 AM		
Estación	TS (°C)	TA (°C)	Estación	TS (°C)	TA (°C)
BLYTHE	23.8	20.5	UABC	32.7	29
THERMAL	25.1	23.5	COBACH	31.7	28.4
VALLE IMPERIAL	24.9	21.6	ITM	38.4	31
CENTRO CALIFORNIA	25.70	22.2	ETHEL	32.3	28.9
			EAST	34.8	30

Tabla 4.18 TA y TS, a las 10:00 am

4.4.1 ANÁLISIS DE REGRESIÓN SATELITAL DEL AÑO DE 1993.

Al calcular la temperatura radiante superficial (TS) obtenida de imágenes de satélite, se debe corregir introduciendo valores de

emisividad de la superficie terrestre (Caselles, 1997), pero dado que no se contaba con esos valores, y como lo que interesaba era obtener temperaturas del aire (TA) para analizar la isla de calor en la capa de dosel urbano, se propuso obtener una ecuación empírica de predicción. De esa manera, se realizó un análisis de regresión lineal simple entre la TS, como variable de predicción, y la TA, como variable respuesta (tabla 4.18).

El modelo lineal simple obtenido fue el siguiente:

$$TA = -5.79139073 + 1.11523179 TS$$

La significancia estadística asociada fue del 5%, la intersección de la pendiente se encuentra en -5.791 con un error estándar del 19.1; el modelo explica un 50.1% de la variabilidad térmica en la ciudad (Figura 4.19), en este caso se considera que es adecuado ya que para esa fecha y hora en específico no se encontraron temperaturas urbanas registradas, por lo cual se tuvieron que estimar a partir del modelo propuesto.

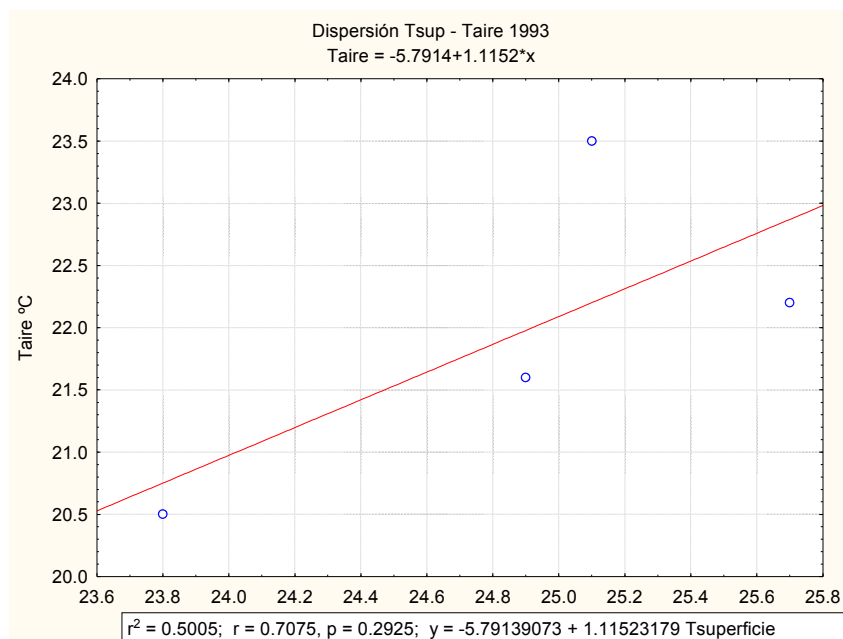


Figura 4.19 Modelo lineal TA vs TS, 6 Abril 1993, 10:00 am.

La ecuación encontrada se aplicó a cada píxel de la imagen de TS de 1993, y de esta forma se estimó la TA en la zona de estudio (figura 4.20). La TA menor estimada para el 6 de Abril de 1993 a las 10:00 am fue de 12.8°C y la máxima 26.5°C, la cual se presenta con escala de grises; los colores oscuros muestran las temperaturas frías, mientras los claros expresan las temperaturas cálidas, la mayoría de los valores bajos se encuentran ubicados en los alrededores, sobre todo en zona agrícola, aunque existen algunos puntos dentro de la ciudad que se asocian a las áreas verdes y el bosque. Por otra parte los tonos claros se encuentran dentro de la zona urbana y en algunas áreas desérticas fuera del perímetro citadino en dirección oriente.

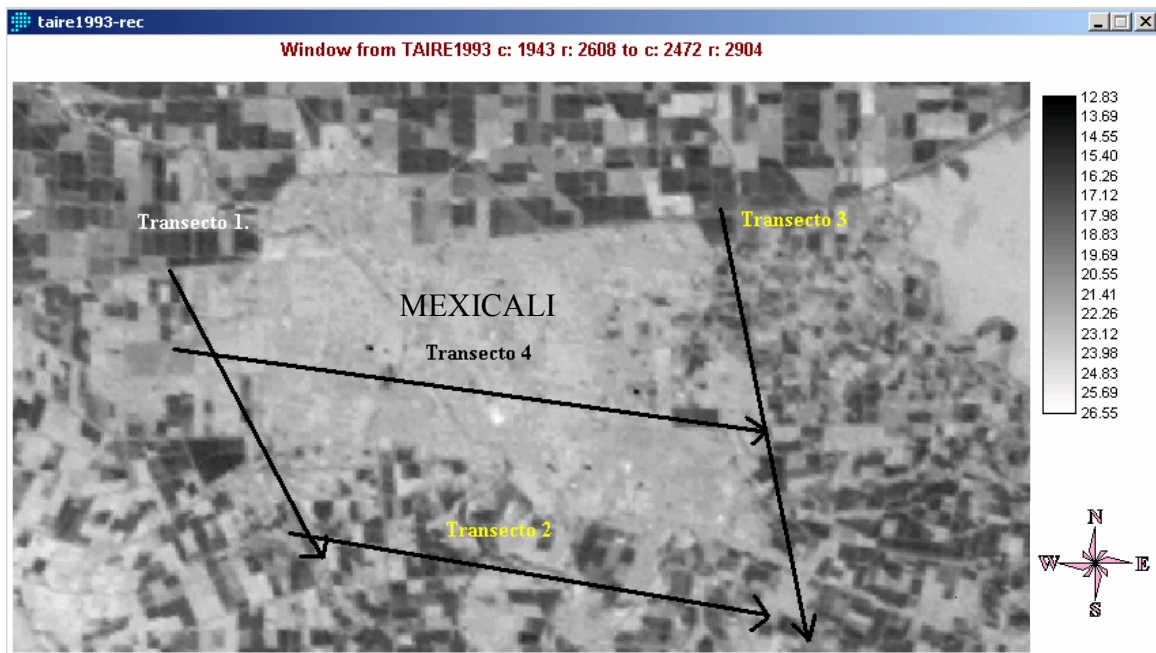


Figura 4.20 Transectos temperaturas estimadas del aire, imagen 1993.

Con la finalidad de estudiar la diferencia en la TA que existió en 1993 alrededor de la ciudad se propuso estudiar 4 transectos (tabla 3.8) en el que se tuvieran usos de suelos contrastantes, incluyendo la frontera entre la mancha urbana y sus alrededores (figura 4.20). A continuación se analizan los cuatro transectos seleccionados.

Transecto 1 (Noroeste-Sureste):

Empieza del lado noroeste de la ciudad en los límites de la mancha urbana, pasa por su extremo poniente y termina en el suroeste en los campos agrícolas (figura 4.21); tiene una longitud de 9,534 metros. A lo largo de la línea el perfil térmico no es estable, es decir tiene variaciones importantes y drásticas; las TA tienen un rango que oscila de los 17°C a los 23°C. Se puede observar claramente tres “depresiones” de bajas temperaturas de 17.5°C y 17°C al parecer esto está asociado a cambiar del área urbana a uso agrícola.

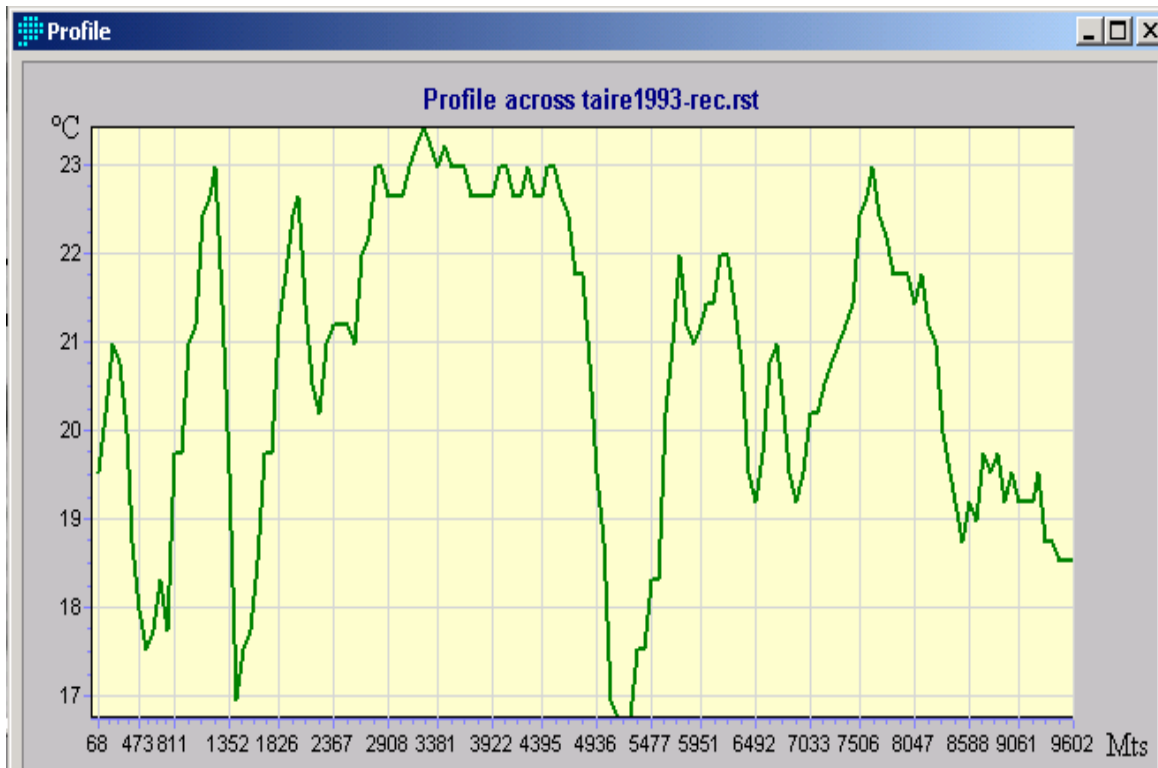


Figura 4.21 Perfil térmico del transecto 1, aplicado a la TA 1993.

Transecto 2 (Suroeste-sureste):

Empieza del lado suroeste de la ciudad en los límites de la mancha urbana pasando mayormente por zonas agrícolas y desérticas, termina en el sureste en área urbanizada y tiene una longitud de 12,019 metros; el perfil térmico es muy variable, es decir los cambios de temperatura suceden en pequeñas distancias, lo que parece reflejar la heterogeneidad del suelo. Las TA adquieren valores desde los 17°C superando los 23°C (figura 4.22). Los mayores valores parecen estar asociados con el área urbana y zonas desérticas, mientras que los menores con uso agrícola.

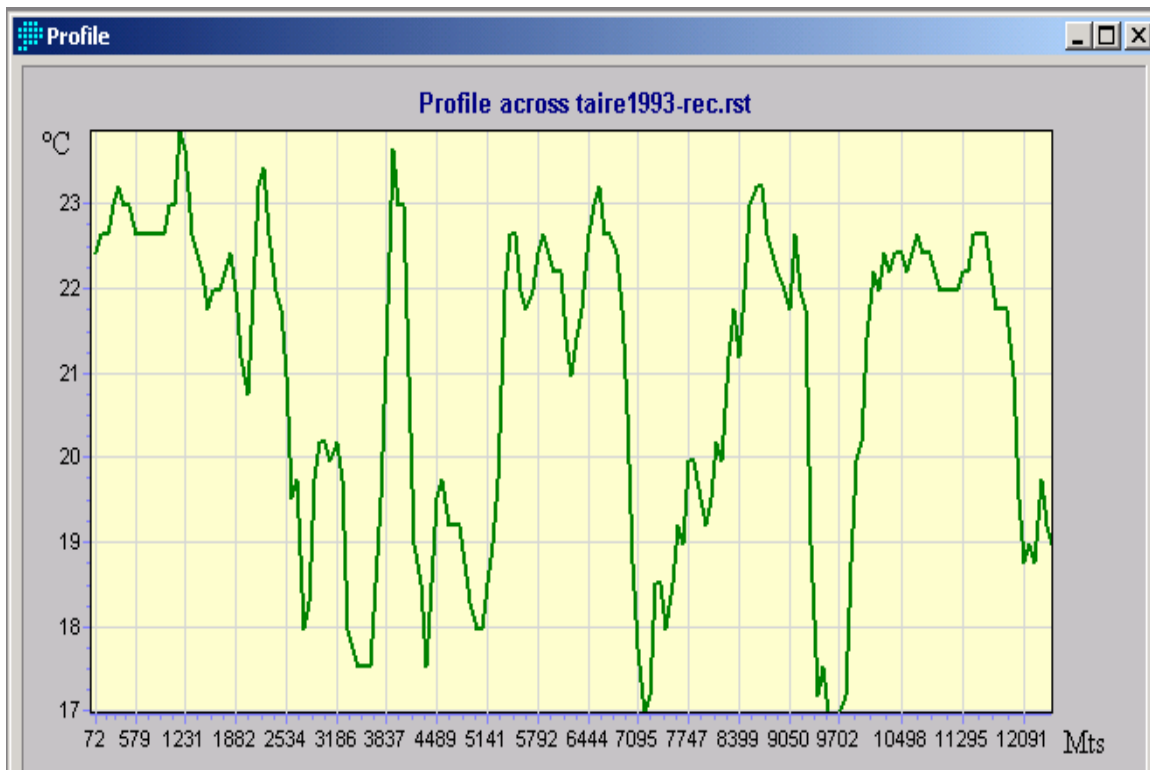


Figura 4.22 Perfil térmico del transecto 2, aplicado a la TA 1993.

Transecto 3 (Noroeste-sureste):

Empieza del lado noroeste y termina en el extremo sureste de la ciudad, diferente al transecto 1 pues ahora se analiza el extremo oriente; pasa principalmente por áreas agrícolas y zonas desérticas, tiene una longitud de 13,506 metros; el perfil térmico empieza con un descenso seguido por un ascenso pronunciado, después al pasar por lugares con cierta densidad urbana mantiene ligera estabilidad que pierde conforme se acerca a los límites de la mancha urbana; la TA tiene al final del trayecto variabilidades importantes que se desarrollan desde los 16°C hasta 22.5°C (figura 4.23). Un rasgo importante de describir es el que se refiere a la "cresta" térmica que supera los 23 °C, que parece estar asociado a que en este punto pasa por el área urbanizada. Los valores más bajos, cercanos a los 16 °C es importante saber que están asociados nuevamente con áreas agrícolas.

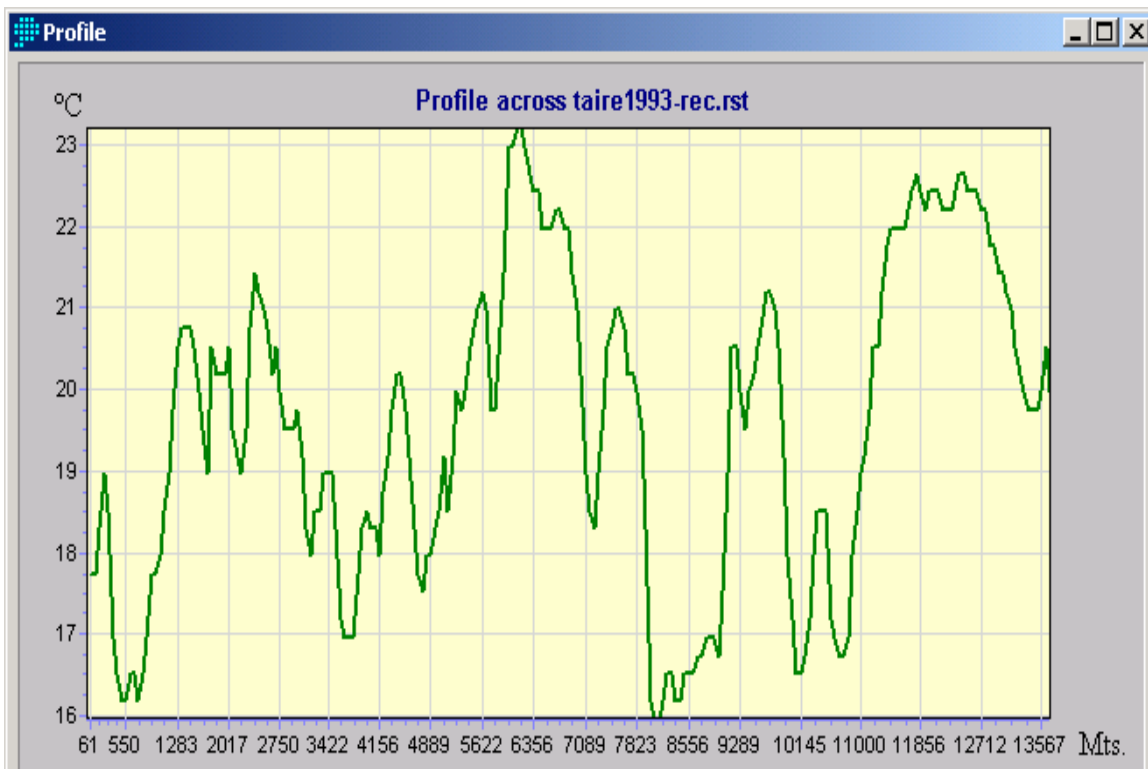


Figura 4.23 Perfil térmico del transecto 3, aplicado a la TA 1993.

Transecto 4 (Oeste-este):

Tiene una longitud 17,449 metros. Empieza del lado oeste con dirección al este de la mancha urbana, recorre toda la ciudad pasando por diversos usos de suelo, el perfil térmico empieza con un aumento en la TA, después se estabiliza, a pesar de tener variaciones de hasta 24°C; refleja un descenso importante en la temperatura al pasar por los 6545 mts, que está asociado a un uso de suelo verde, pero vuelve el incremento rápidamente; la TA tiene al final del trayecto variabilidades importantes con una oscilación que va desde los 16°C hasta 24°C (figura 4.24).

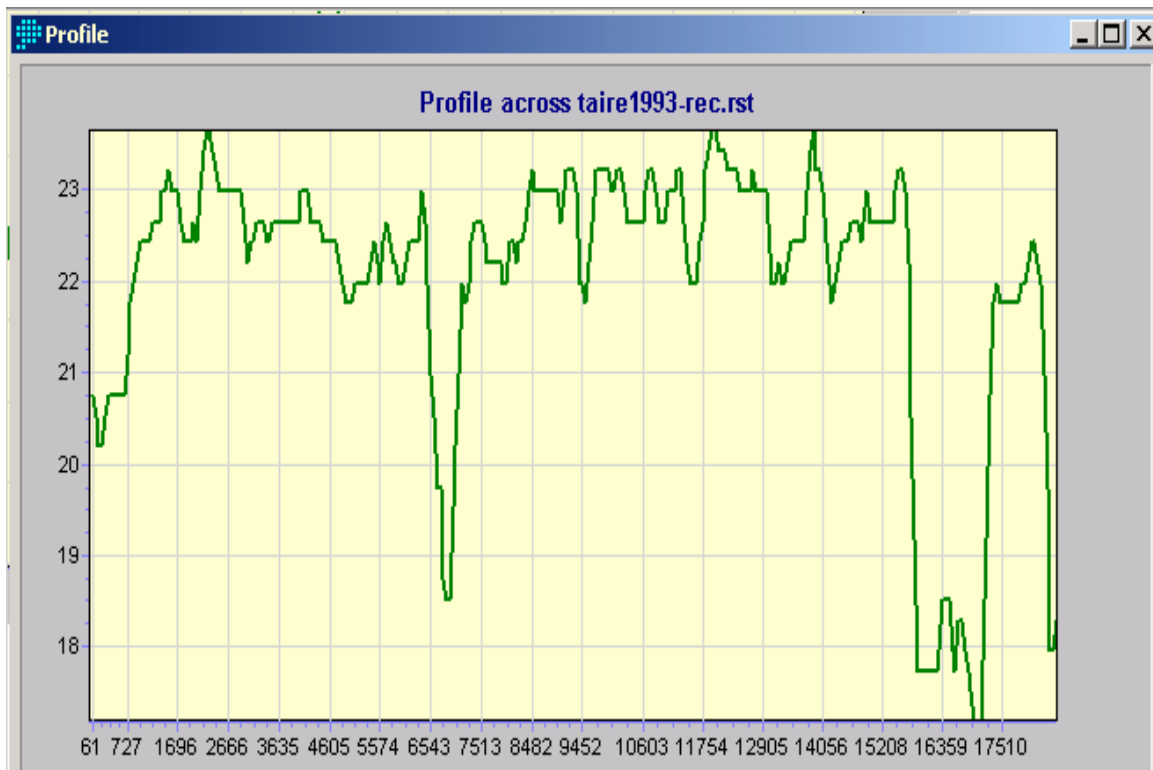


Figura 4.24 Perfil térmico del transecto 4, aplicado a la TA 1993.

4.4.2 ANÁLISIS DE REGRESIÓN SATELITAL DEL AÑO DE 2003.

Al igual que para la imagen de satélite del año de 1993, se aplicó un análisis de regresión lineal simple a la banda térmica de la imagen del año de 2003 para estimar la temperatura del aire (figura 4.25); el modelo obtenido fue:

$$TA = 14.6282 + 0.4356 TS$$

Con una significancia del 5%, la intercepción de la pendiente se encuentra en 18.9051, y un $r^2=0.8686$ (Tabla 4.18), donde TS es la temperatura superficial.

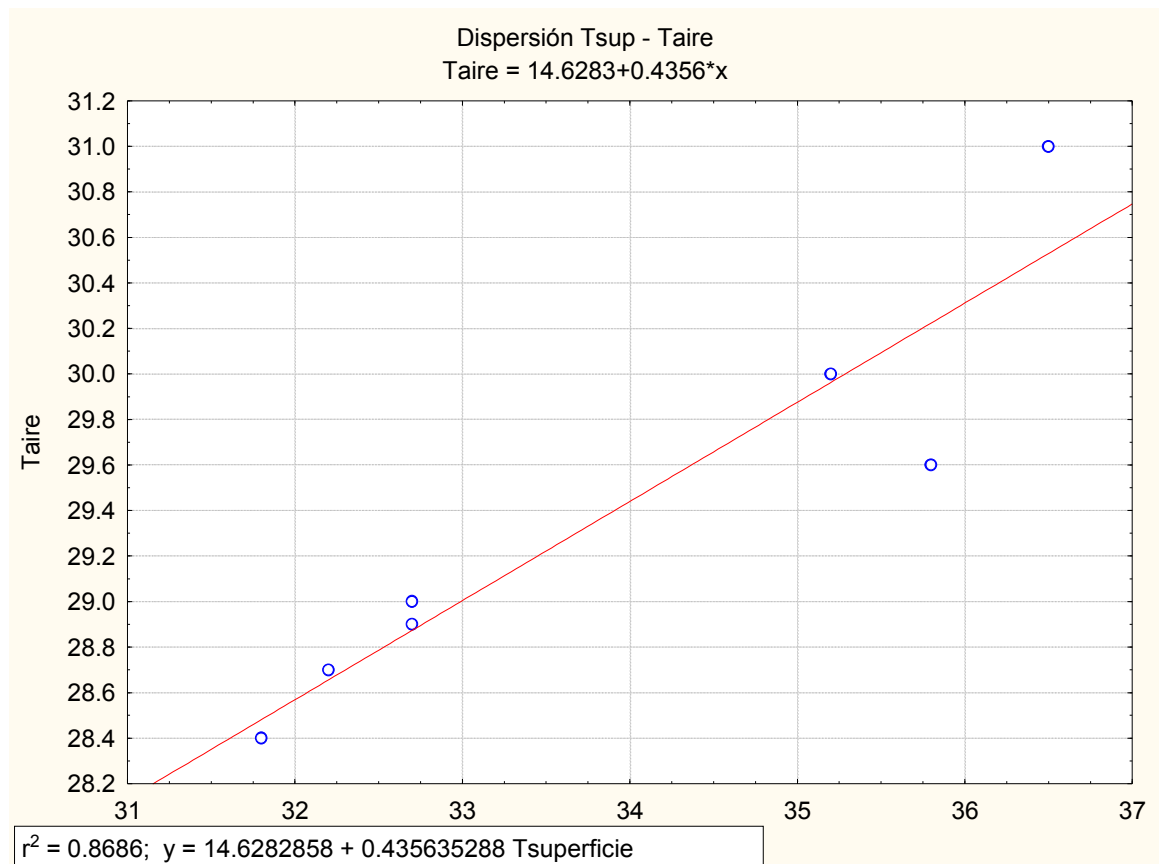


Figura 4.25 Modelo lineal TA vs TS, 12 Mayo 2003, 10:00 am.

La ecuación anterior se aplicó a todos los píxeles de la imagen de la banda térmica tomada a las 10:00 a.m. del día 12 de mayo del año de 2003 para estimar la TA. Se estimó una TA máxima de 35.0°C que parece estar asociada a incendios en el área agrícola y una TA estimada mínima de 22.4°C (figura 4.26). La representación de las temperaturas es en escala de grises, los colores oscuros corresponden las temperaturas frías, mientras los claros expresan las temperaturas cálidas; la mayoría de los valores bajos se encuentran ubicados en los alrededores en zona agrícola aunque existen algunos dentro de la ciudad que se asocian a las áreas verdes y el bosque. Por otra parte los tonos claros se encuentran dentro de la zona urbana y en algunas áreas desérticas fuera del perímetro citadino.

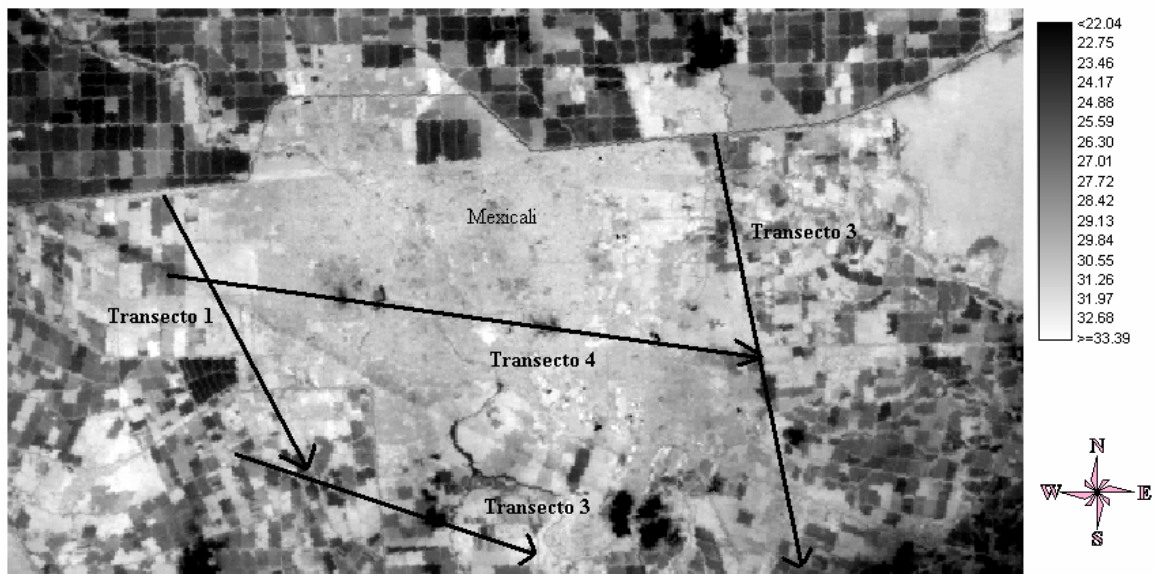


Figura 4.26 Transectos y temperaturas estimadas del aire, imagen 2003.

Con respecto al análisis espacial de TA se utilizaron los transectos de la tabla 3.8, con el propósito de evaluarlos y realizar una comparación asociados con el crecimiento urbano entre 1993 y 2003.

Transecto 1 (Noroeste-Sureste):

El perfil térmico como se puede ver tiene inestabilidades importantes y que se reflejan sobre todo al inicio y al final del mismo, los que parecen estar asociados al área verde; al interior de la zona urbana se encuentran diferencias térmicas de hasta 2.5°C. Las TA oscilan de los 24°C a 32°C (figura 4.27). Los valores mayores, superiores a los 32 °C parecen estar asociados a usos de servicio e industrial.

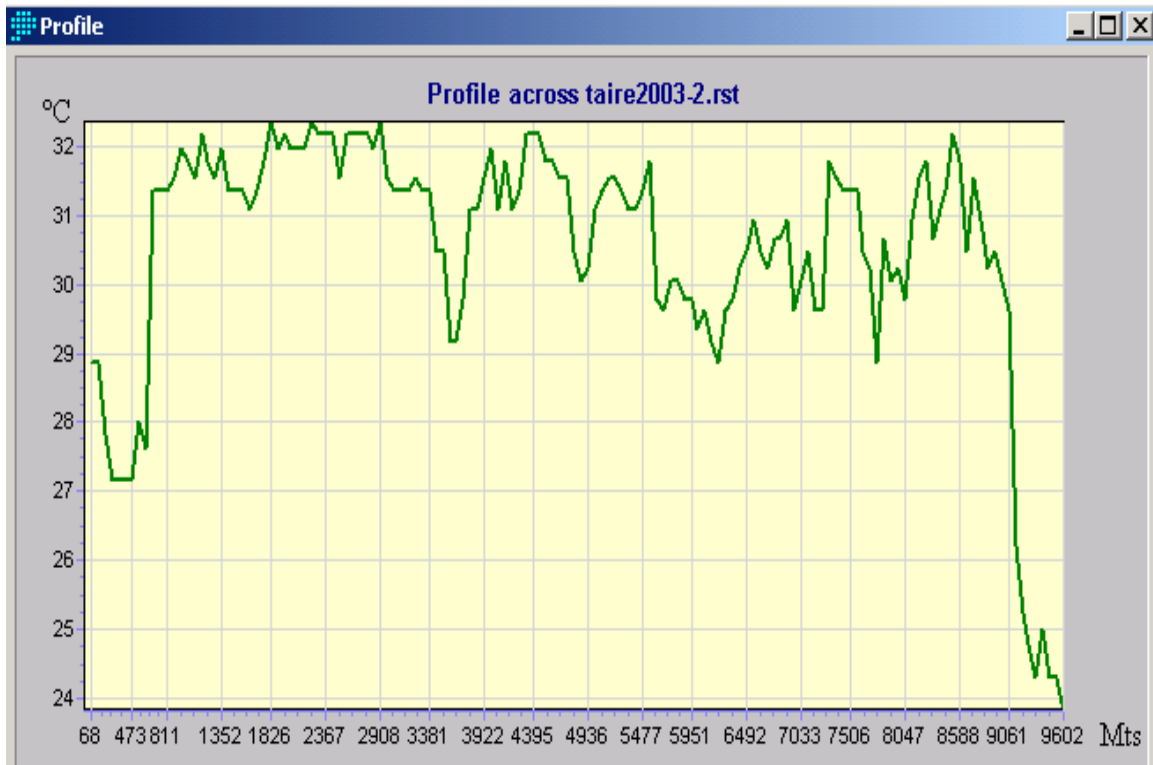


Figura 4.27 Perfil térmico del transecto 1, aplicado a la TA 2003.

Transecto 2 (Suroeste-sureste):

El perfil térmico es muy variable, es decir se presentan cambios no vistos en los perfiles anteriores, ya que el rango oscila desde los 11 °C hasta los 32°C (figura 4.28). El valor más bajo parece estar asociado a la sombra de una nube y no a algún uso de suelo determinado. Los valores de temperatura más altos, cercanos o superiores a los 32°C parecen estar asociados con área industrial.

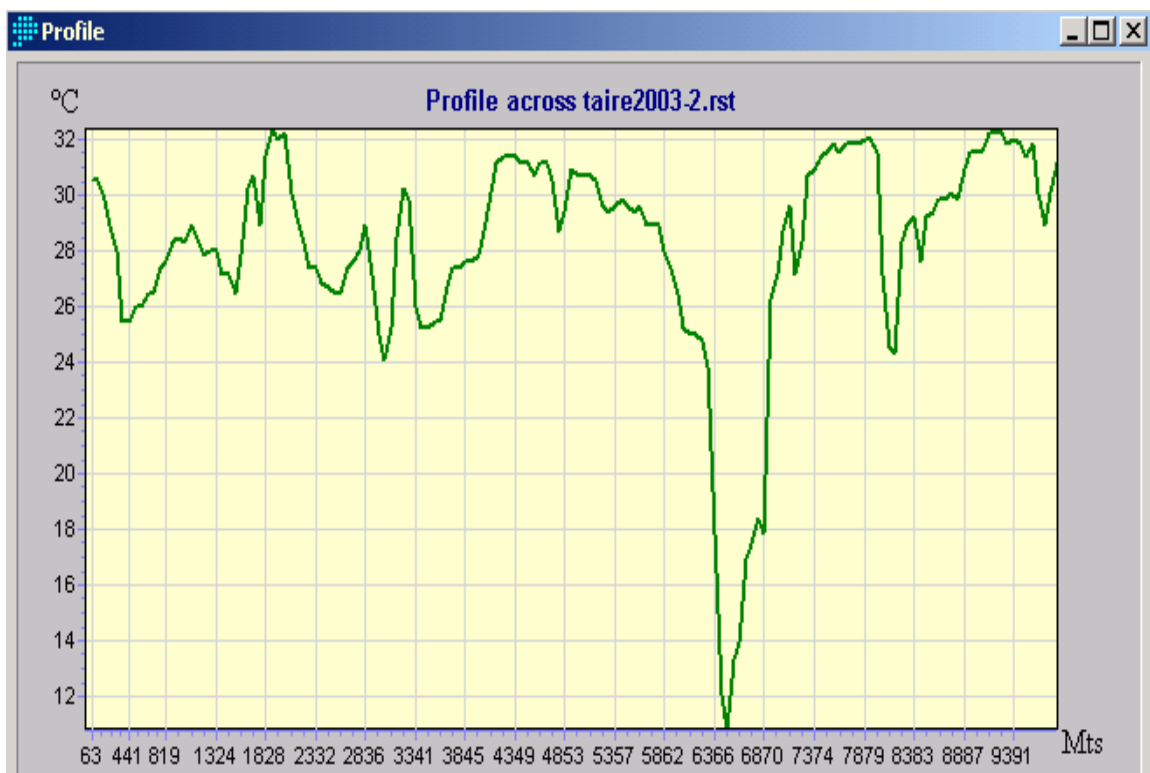


Figura 4.28 Perfil térmico del transecto 2, aplicado a la TA 2003.

Transecto 3 (Noroeste-sureste):

El perfil térmico empieza con una estabilidad que corresponde al área urbana seguido de un descenso de temperatura consecuencia de una zona agrícola (figura 4.29); después al pasar por lugares con densidad urbana media mantiene cierta estabilidad que pierde conforme se acerca a los límites de la mancha urbana, la TA tiene al final del trayecto variabilidades importantes con diferencias de hasta 10 °C, ya que se tienen valores que van de los 22°C a los 32°C.

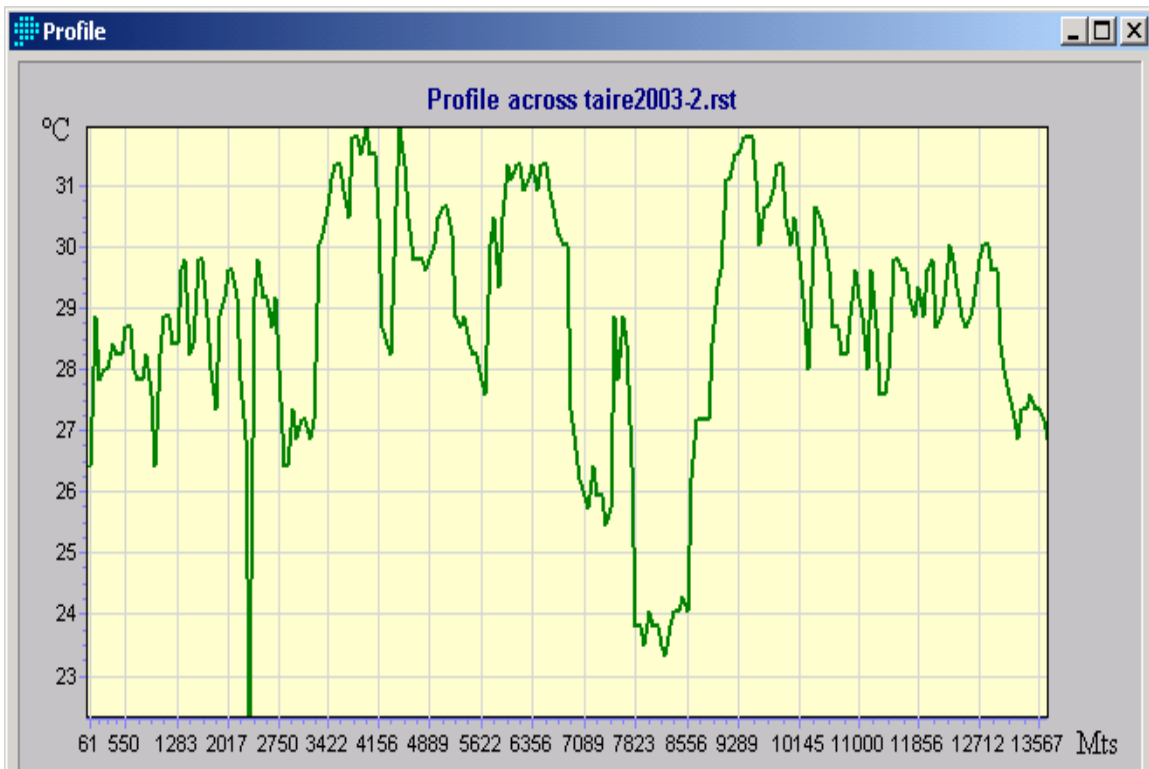


Figura 4.29 Perfil térmico del transecto 3, aplicado a la TA 2003.

Transecto 4 (Oeste-este):

El perfil térmico empieza con un aumento en la TA (figura 4.30), después se estabiliza, a pesar de tener variaciones de hasta 20°C; se tienen dos descensos importantes a los 5574 mm y a los 6545 mts que posiblemente se deban a grandes lotes baldíos y áreas verdes urbanas, por lo que se incrementa la TA rápidamente. Al final del trayecto las variabilidades importantes y las oscilaciones térmicas van desde los 22°C hasta los 32°C. Debido a diferentes usos de suelo como áreas industriales, comercial y servicios.

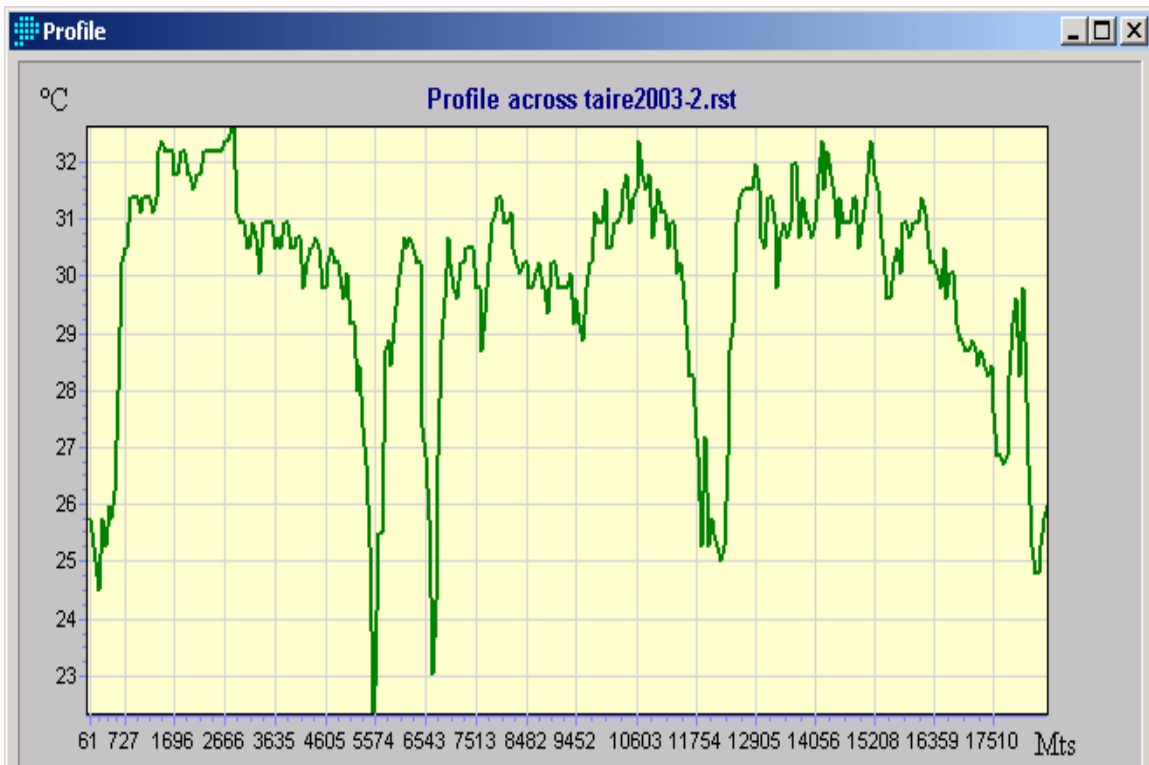


Figura 4.30 Perfil térmico del transecto 4, aplicado a la TA 2003.

4.4.3 DIFERENCIA TÉRMICA 1993-2003.

La imagen 4.31 muestra diferencia térmica positiva de la ciudad y sus alrededores que se obtuvo de una resta algebraica entre las imágenes TA normalizadas 2003-1993; los datos positivos fueron clasificados por unidad, el color negro agrupa tanto valores negativos como el 0, es decir lugares donde no existe incremento en la temperatura entre los años en mención.

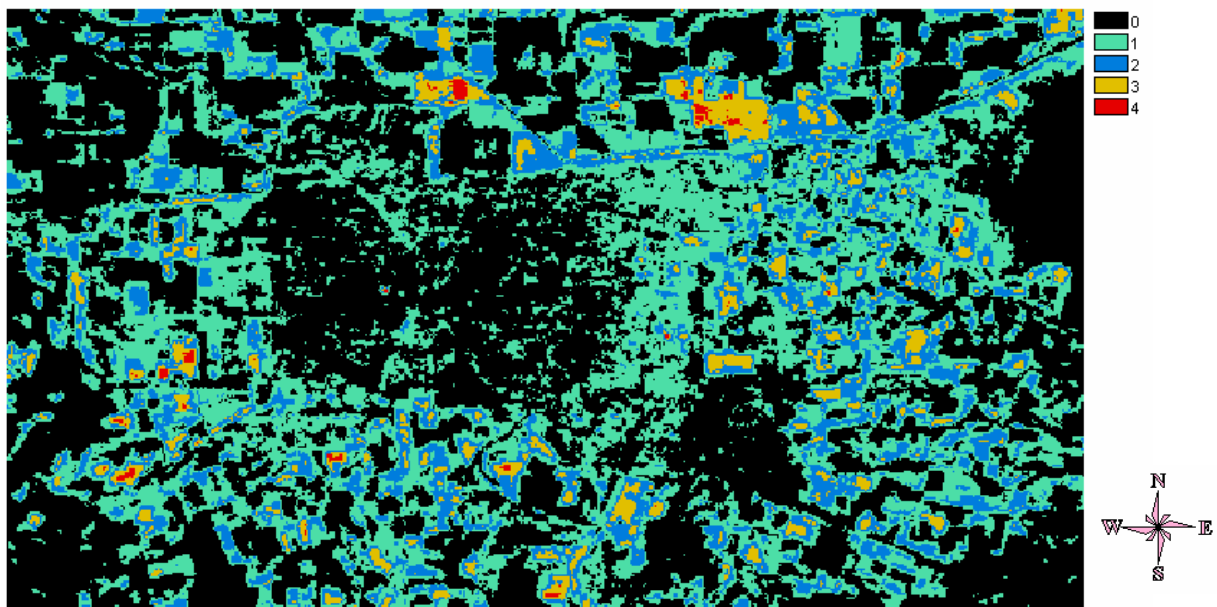


Figura 4.31 Imagen normalizada de diferencia positiva 2003-1993.

En este caso el propósito de los transectos térmicos es evaluar si el crecimiento urbano en un periodo de 10 años, de 1993 a 2003, repercutió en un mayor desarrollo de la isla de calor urbana, lo que podría ser un indicador de modificación del clima ocasionado por la urbanización, y por tanto generador de microclimas urbanos.

Transecto 1 (Noroeste-Sureste):

El perfil térmico (figura 4.32) muestra cuatro valores extremos en la trayectoria donde el incremento normalizado es de clase tres, es decir, la temperatura fue modificada fuertemente en esta área de la ciudad, muy posiblemente debido al desarrollo de la mancha urbana.

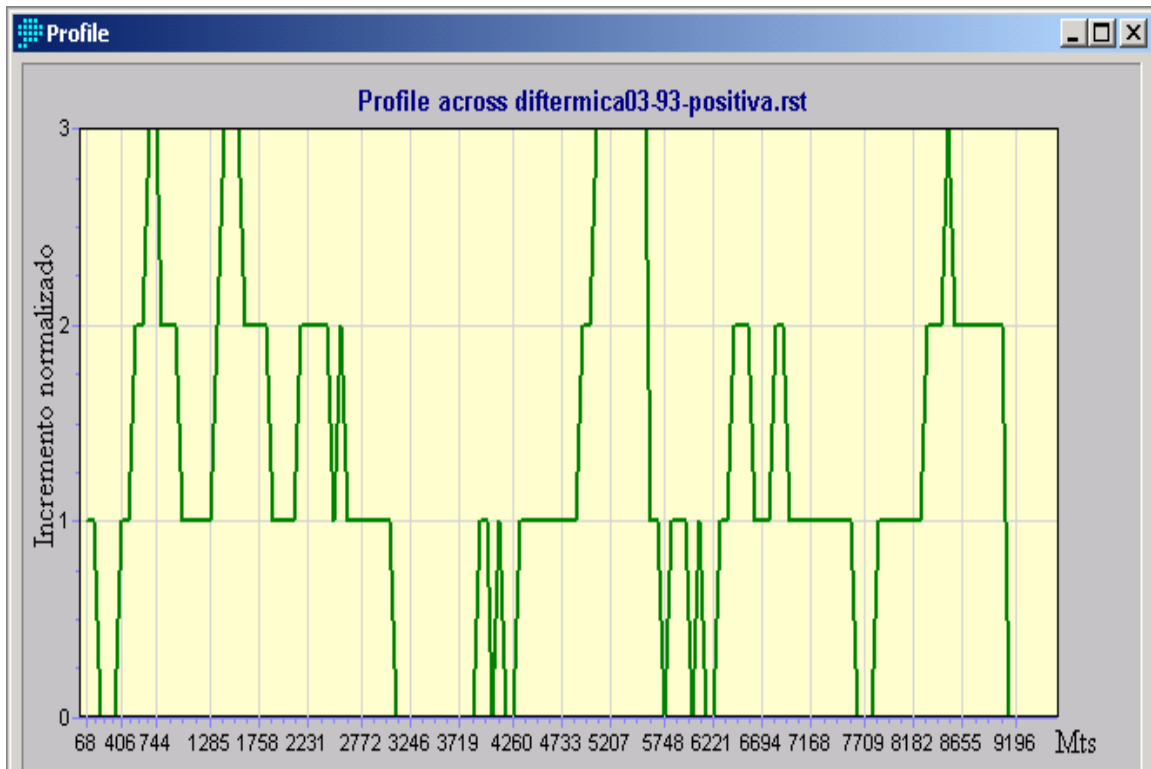


Figura 4.32 Perfil térmico del transecto 1, aplicado imagen normalizada positiva.

Transecto 2 (Suroeste-sureste):

Por otra parte el transecto 2, tiene solamente un incremento normalizado de 3 unidades al finalizar la trayectoria, lo que indica que las temperaturas, y por tanto, el microclima urbano en esta área fue modificado de manera moderada (figura 4.33).

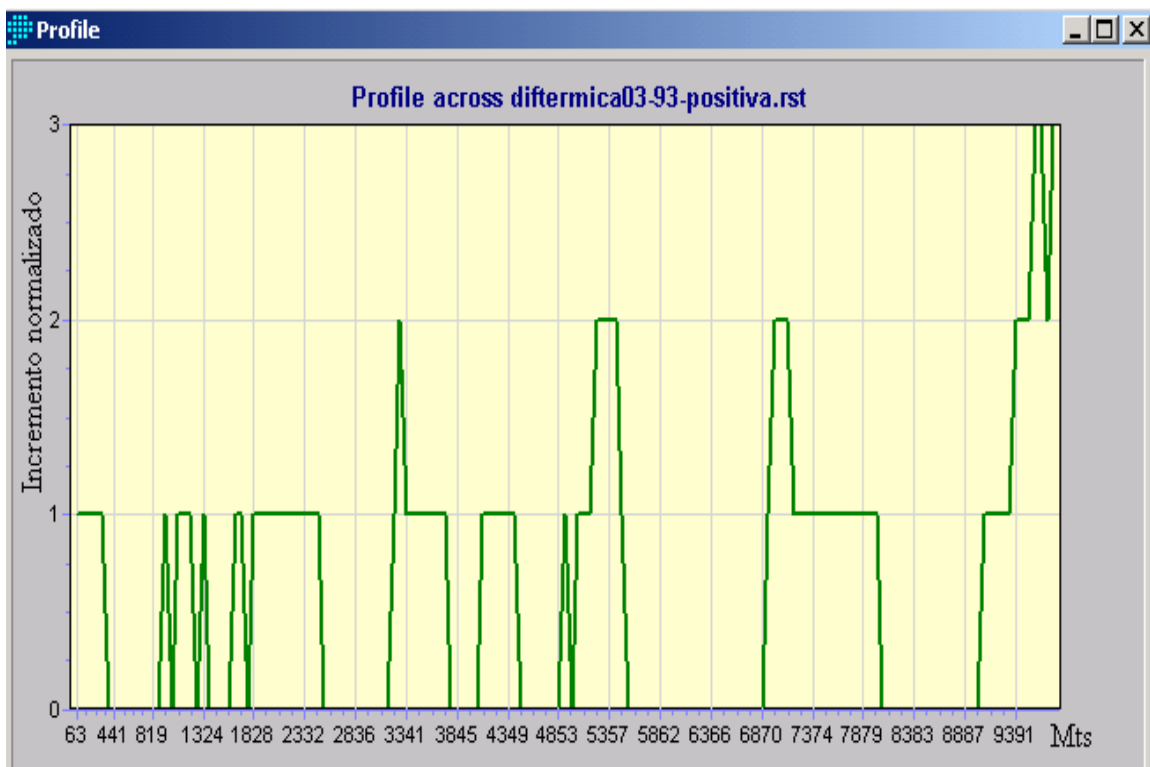


Figura 4.33 Perfil térmico del transecto 2, aplicado imagen normalizada positiva.

Transecto 3 (Noroeste-sureste):

Con lo que respecta al perfil 3, existe una variabilidad de incremento normalizado superior a tres unidades, hasta en cinco ocasiones (figura 4.34), es decir, existen lugares donde la temperatura y por tanto el microclima fue modificado notoriamente, y otros donde el incremento fue menor, incluso nulo.

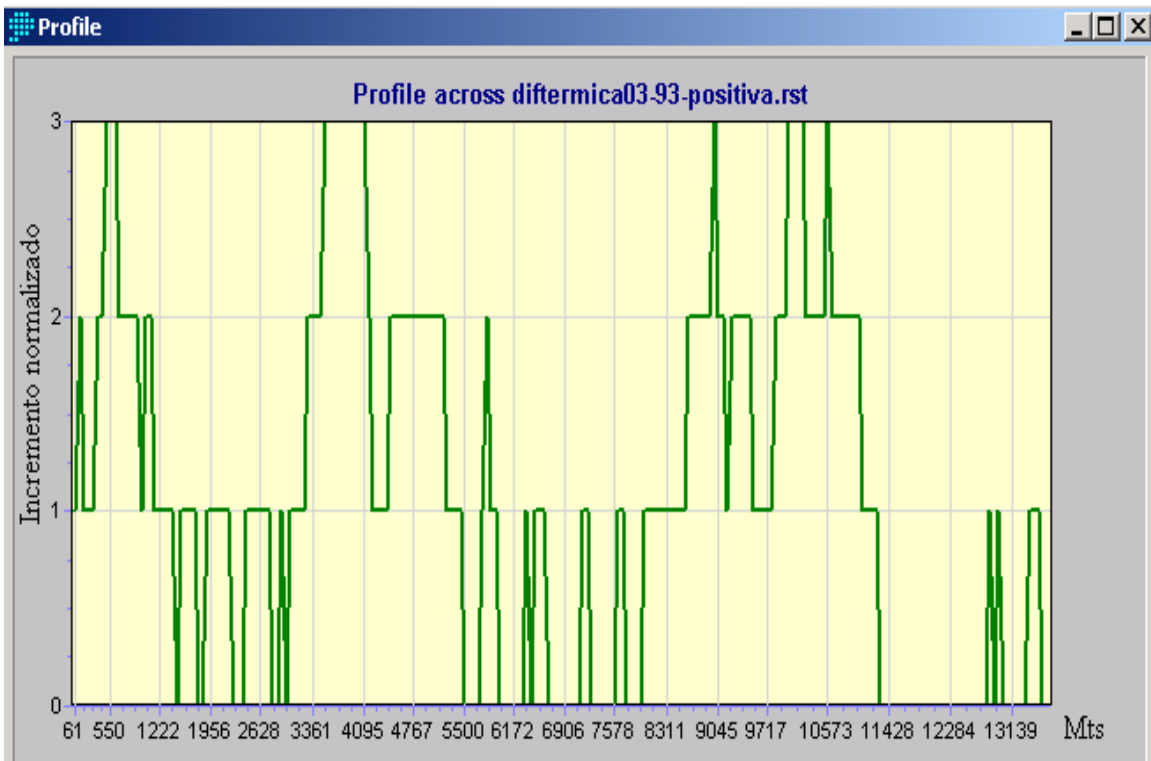


Figura 4.34 Perfil térmico del transecto 3, aplicado imagen normalizada positiva.

Transecto 4 (Oeste-este):

Finalmente el transecto 4, es 100% urbano, con distintos usos de suelo; la alteración en el balance de radiación parece ser mínima pero importante, ya que hay zonas de la ciudad en que a pesar de no tener cambios en su estructura física se intensificó (figura 4.35). Lo que indica también este transecto es que su parte final ha sufrido modificaciones térmicas importantes ya que se tienen 3 unidades ó más, lo que es un indicador de un cambio en su microclima.

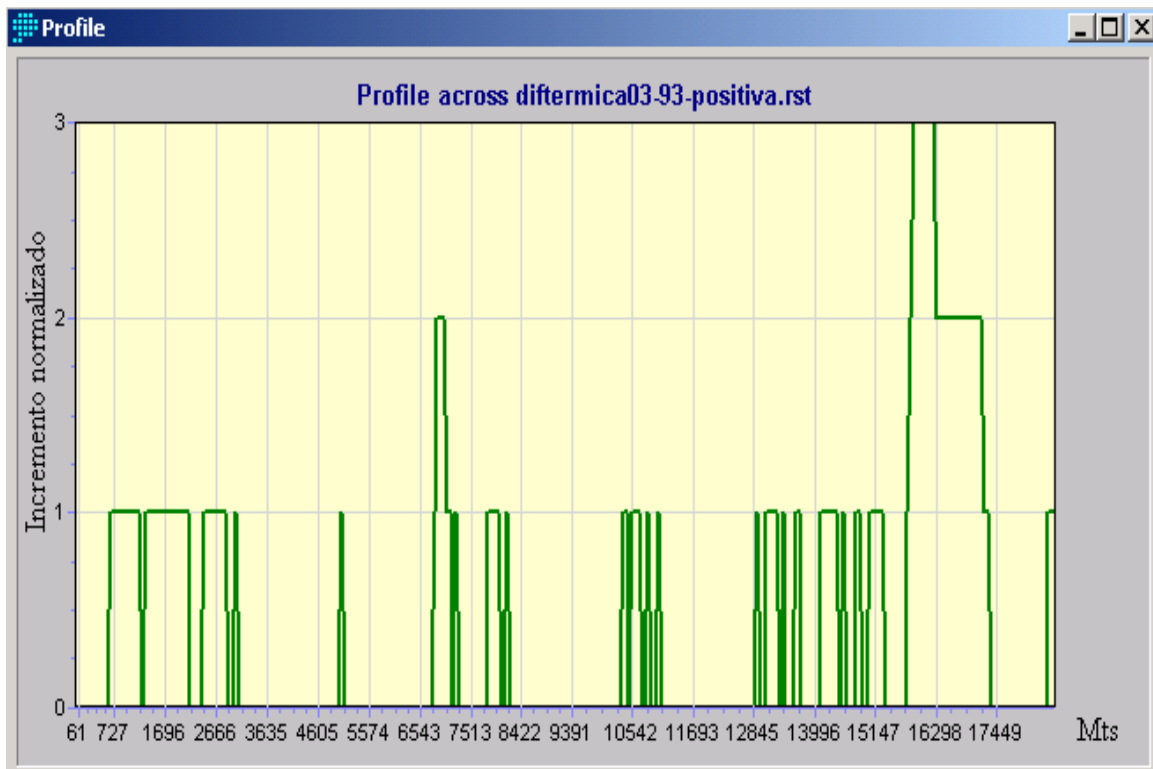


Figura 4.35 Perfil térmico del transecto 4, aplicado imagen normalizada positiva.

4.5 INTENSIFICACIÓN DE LA IUC POR EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL.

El modelo estadístico de Downscaling SDSM se calibró usando los valores de la temperatura mínima diaria de la ciudad de Mexicali y las variables climáticas del Centro Nacional de Predicción Ambiental. Las mejores correlaciones encontradas fueron con la presión atmosférica al nivel del mar y la humedad específica superficial (-0.624 y 0.883, respectivamente, figura 4.33).

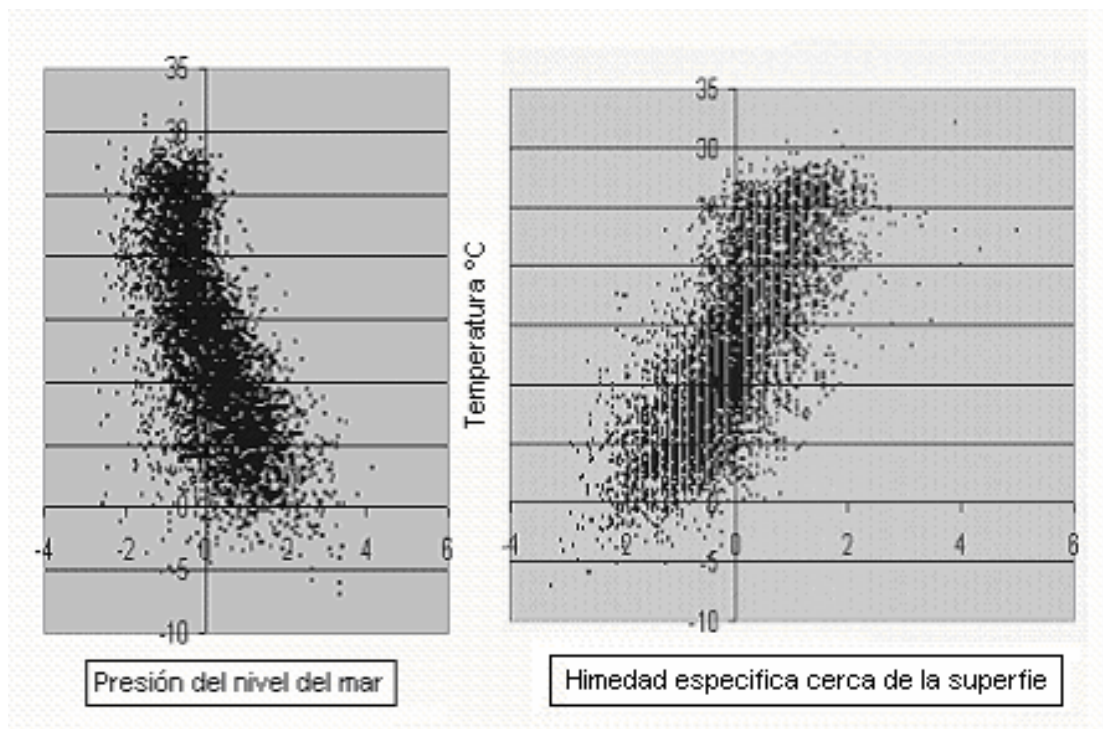


Figura 4.36 Diagrama de dispersión entre la presión del nivel del mar y la humedad específica de la superficie con temperatura.

Se realizaron estimaciones futuras de tendencia térmica bajo los escenarios de emisiones A1, A2 y B2, donde la temperatura mínima excedió 2°C del valor medio (14.1°C) de 1961-1990 (Tabla 4.19). Los cambios obtenidos con el escenario A1 para los periodos 2020s (2010-

2039), 2050s (2040-2069), y 2080s (2070-2099), presentan un aumento de temperatura mínima promedio de 1.9, 2.4 y 5.1 respectivamente, en contraste a lo estimado con A2 y B2 que tiene un incremento de 0.7°C y 0.5°C para el periodo 2080, que son los valores máximos.

Temperatura base 1961-1990 14.1°C			
Año	Cambio A1	Cambio A2	Cambio B2
2020	1.9 °C	0.2°C	0.2°C
2050	2.4°C	0.4°C	0.4°C
2080	5.1°C	0.7°C	0.5°C

Tabla 4.19 Escenarios construidos (95% de confiabilidad) con un umbral de > 2°C basado en el promedio de temperaturas mínimas diarias en el periodo 1961-1990.

Una forma gráfica de ver lo anterior se presenta en la figura 4.34. Las temperaturas mínimas promedio para los períodos 2020s, 2050s y 2080s, bajo el escenario A1 presenta una tendencia positiva se puede observar que en los meses de verano hay un incremento térmico muy pronunciado para los 2080s, cosa que no sucede para los 2020s y 2050s, comparado con las temperaturas observadas. En invierno el aumento es casi proporcional en todos los meses a excepción del mes de Diciembre. En resultados obtenidos con el escenario de emisiones A2 se muestra un ligero aumento en la temperatura a excepción de los meses de marzo, agosto y septiembre donde existe una disminución respecto al escenario base. La mayoría de las emisiones generadas bajo el escenario B2 representan un aumento de temperatura mínima promedio a nivel mensual, solo en los meses de marzo y agosto desciende en el período de los 2080s.

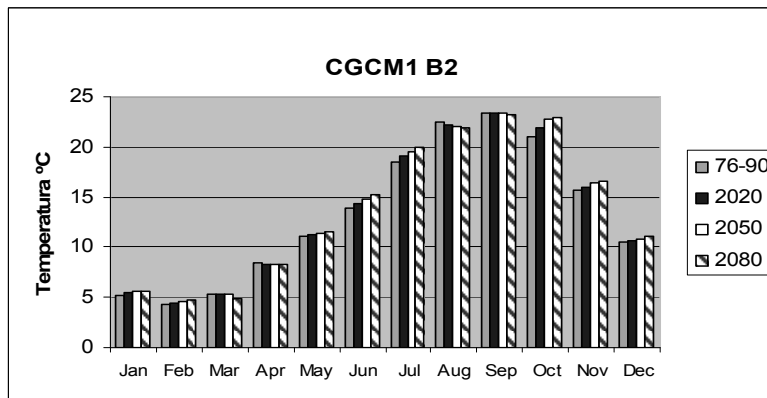
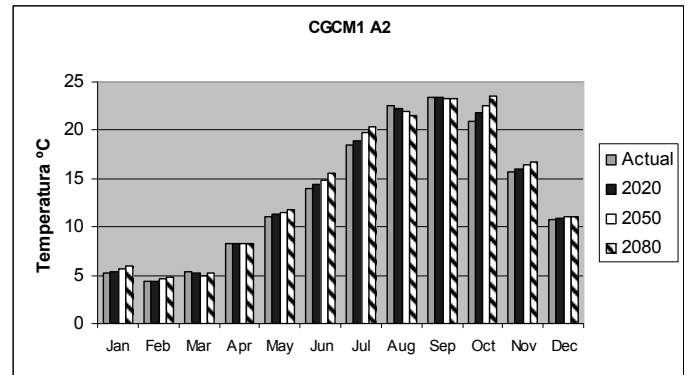
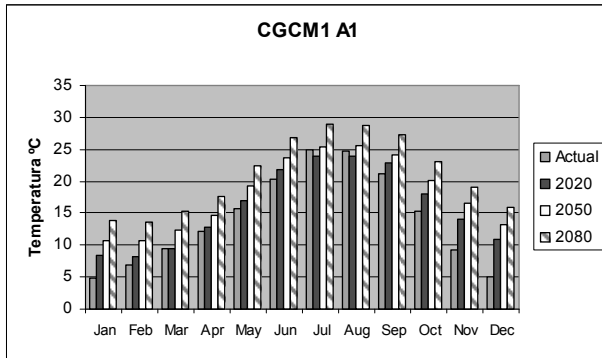


Figura 4.37 Grafica comparativa de temperaturas mínimas promedio y temperaturas observadas para el periodo 1961-1990 y escenario de emisiones A1, A2 y B2 generados con downscaling.

CAPITULO V.

DISCUSIÓN.

5.1. CLIMATOLOGÍA E INTENSIDAD DE LA IUC DE DOSEL URBANO.

La IUC en Mexicali, B.C., tiene su desarrollo en las estaciones de otoño, invierno y primavera; durante el verano tanto la ciudad como sus alrededores alcanzan temperaturas tan altas que se podría nombrar como Continente Urbano de Calor con archipiélagos fríos. Particularmente el fenómeno tiene su máxima expresión en los meses Enero, Febrero, Marzo y Noviembre; climatológicamente hablando los días con mayor intensidad promedio son: 4 de noviembre con 5.2°C, 26 de marzo con 5.1°C y 4 febrero con 5.3°C; La diferencia térmica menor ocurre en Enero 19 (1.2°C). La hora promedio del fenómeno va de las 5:00 a.m. a 7:00 a.m., aunque también se encuentra durante la noche o madrugada como sucede en Korea (Lee, 2008), sin embargo en Marzo 25 la IUC se presenta a las 12:00 p.m., esto puede deberse a la influencia de los vientos estacionales que ocurren durante este mes, ya que se dan con mayor frecuencia durante la noche, rompiendo así el efecto de calor nocturno en la ciudad. Podemos decir que las horas en que se presenta la IUC varían según las condiciones atmosféricas, presentándose con mayor intensidad en condiciones con poca o nula nubosidad y un nivel bajo de humedad, velocidad del viento.

5.2. CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA IUC SE DOSEL URBANO.

Los fenómenos que ocurren en la interfase ciudad-atmósfera son extremadamente complejos como para dar una definición simple, de tal manera que un problema metodológico en la investigación climatológica urbana es la definición y caracterización de la superficie, (Cervantes, 2001).

ITM se caracterizó por tener un uso de suelo industrial y lotes baldíos (15% y 20% respectivamente y dadas esas características es ahí donde tiene su máxima intensidad la *IUC de dosel urbano*, alrededor de UABC dado que cuenta con un uso habitacional de 55%, siguiendo en extensión el uso educativo con un 20.13%, se presenta una diferencia térmica importante, entre ITM y UABC, de tal manera que las temperaturas apuntan hacia los valores medios en su distribución; por otra parte en COBACH que se localiza en la parte oeste de la ciudad, dentro del colegio de bachilleres con una mayor zona habitacional (69.11%) y escolar (18.9%) su porcentaje de área verde es solo 2.45% como consecuencia su temperatura es mas baja que el resto de la ciudad; a pesar de ello el día 2 de Febrero se presentó una segunda isla de calor en los alrededores de COBACH hecho que se puede atribuir al porcentaje de vegetación similar de ITM; la zona mas fría se localiza en Ethel, una estación rural.

Los casos desarrollados con Stella, 4 de Febrero y 5 de noviembre, coinciden con los resultados encontrados en el análisis estadístico, es decir, la IUC esta presente en la zona urbana que tiene menos porcentaje de vegetación y un uso de suelo industrial, como es

ITM, sin embargo el día 25 de marzo la IUC por las condiciones climáticas mencionadas con antelación (fuertes vientos) el fenómeno es alterado tanto en hora como ubicación, la diferencia térmica mayor es registrada a las 12:00 p.m. y es transportada a la zona de UABC.

5.3 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA IUC DE DOSEL URBANO Y EXPANSIÓN URBANA.

La influencia de la urbanización en el clima de Mexicali provocó que una isla fría (figura.4.17), con una magnitud media de -1.30°C , entre 1960 y 1980, se convirtiera para el 2000 en una IUC con intensidad máxima promedio anual de 1.80°C debido al dramático cambio en el uso y cobertura del suelo. Durante el periodo 1993 al 2003 se presentó un incremento anual de 0.30°C en el calentamiento de la ciudad conforme su mancha se iba expandiendo en un 2.75% por año, es decir la ciudad empezó a ganar calor a medida que modificaba su balance de radiación natural.

El calculo del crecimiento urbano durante el periodo de 1993 al 2003 en Mexicali, se llevó a cabo por medio de un SIG delineando de forma discontinúa la franja citadina y calculando las áreas en ambas imágenes satelitales, se observó una ampliación que va de 91.43 Km^2 a 116.64 Km^2 ; Los puntos rurales que sufrieron mayor transformación en el uso y cobertura de suelo están ubicados en la zona sur y de manera uniforme la zona oriente (figura. 4.18).

5.4 DESARROLLO DE IUC ATMOSFERICA.

A pesar de que los estudios de la IUC de dosel urbano indican su máximo desarrollo en la ciudad de Mexicali de 5:00 a.m. a 7:00 a.m. promedio, el análisis de de la IUC en los años 1993 y 2003 se efectuó a las 10:00 a.m. dado que es la hora mas cercana en que el sensor remoto escanea el área.

5.4.1 ANÁLISIS DE TEMPERATURA DEL AIRE Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO 1993.

El estudio de la IUCD en el año 1993 se realizó día 6 de Abril; se observó en el área rural una tempera mínima estimada de 12°C, y una máxima de 24°C presentado en la zona urbana, es decir el calentamiento de la ciudad alcanzó el doble que en sus alrededores con lo que apareció una IUC con 12°C de intensidad.

El clima intra-urbano fue analizado de manera espacial, los cuatro perfiles térmicos coinciden que las bajas temperaturas están asociadas a los usos de suelo agrícola y bosque de la ciudad mientras que las temperaturas mayores se relacionan con el área urbana y desértica. Los transectos 1, 2 y 3, que se encuentran delineados entre la frontera de la metrópoli y sus alrededores son poco estables con temperaturas que oscilan entre los 16 y 23°C (tabla 5.1), se presentan fuertes depresiones de temperaturas seguidas de crestas térmicas asociadas a los diferentes usos de suelo por los que pasan. El Transecto 4 inicia y termina en lugares aledaños pero su desarrollo es urbano, su perfil es heterogéneo dentro de la ciudad, aunque presenta una caída drástica al pasar por el bosque de la ciudad, lo cual confirma

que el uso de suelo se encuentra estrechamente asociado al desarrollo de la IUCD.

Transecto 1		Transecto 2		Transecto 3		Transecto 4	
Uso de suelo	°C	Uso de suelo	°C	Uso de suelo	°C	Uso de suelo	°C
Agrícola	17	Agrícola	17	Agrícola	16	Área Verde	16
Urbano	23	Urbano, desierto	23	Urbano	22.5	Corredor Urbano	24

Tabla 5.1 Temperaturas máximas y mínimas de transectos 1993 y su uso de suelo.

5.4.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURA DEL AIRE Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO 2003

La detección de la IUCD diurna en el año 2003 se realizó con una imagen satelital tomada día 12 de Mayo; tuvo una intensidad de 10.0°C, la TA mayor en la ciudad se estimó en 32°C mientras que la TA mínima de 22°C fue encontrada en los campos de cultivos aledaños.

Con el estudio de cuatro perfiles térmicos delineados a través de la ciudad se confirmó la influencia que ejercen los diferentes usos de suelo en el calentamiento de la TA; una misma cobertura puede tener variaciones en su temperatura derivado de la ubicación y el uso para el que es empleado, por ejemplo, un lote baldío oscila entre los 26°C y 29°C, el primero corresponde a un lote ubicado en la frontera rural y urbana al cual se le puede llamar baldío no urbanizado mientras que el segundo es un baldío urbano; en orden de temperatura ascendente los usos son: área verde, habitacional, comercial y servicios, lote baldío, mixto, corredor urbano y por último industrial (tabla 5.2).

Uso de suelo	°C
Área verde	24
Habitacional	27
Comercial y servicios.	27
Lote baldío	29
Mixto	30
Corredor urbano	31
Industrial	33

Tabla 5.2 Uso de suelo y temperatura, imagen 2003.

5.4.3 ANÁLISIS DE TEMPERATURA DEL AIRE NORMALIZADAS 1993-2003.

La evolución térmica se estimó a través de la normalización de ambas imágenes, Para cada transecto se graficó un perfil térmico el cual fue agrupado en 4 clases de variación normalizada en función a la distancia sobre la línea (figura 4.31).

EL transecto 1, muestra un aumento para las 4 clases de uso de suelo siguiente:

Clase 1: Corresponde a lotes baldíos no urbanizados y uso habitacional. Este grupo ejerce un papel débil en el aumento de la temperatura.

Clase 2: Lotes baldíos urbanizados y corredores urbanos, los cuales quedaron dentro de un perímetro citadino o bien urbanizados para uso de calles.

Clase 3: Uso comercial y servicios, industrial, almacén y habitacional. Es el nivel más alto dentro de las clases para este transecto su variabilidad térmica es extrema, es decir, pasó a ser de un área rural a una zona urbana con actividad antropogénica intensa.

En este sentido el trazo 1 es mayormente habitacional, aunque pasa por grandes baldíos y corredores urbanizados, asimismo se puede

encontrar la presencia de cuatro picos correspondientes a drásticas transformaciones físicas ocurridas en la cobertura y uso de suelo.

Transecto2:

En la trayectoria existen 7 tipos de uso de suelo diferentes Área Verde, Comercial y Servicios, Equipamiento, baldíos urbanizados, baldíos no urbanizados, Habitacional. Industrial; el uso mas común corresponde al habitacional y el menor al industrial y área verde; la clase 1 nos indica un cambio leve entre el uso de suelo de 1993 y 2003. Al inicio del recorrido se puede observar algunos saltos constantes que corresponden a uso habitacional y lotes baldíos no urbanizados; la clase 2 (parte media de la gráfica) corresponde a los usos de suelo comercial y servicios, por otro lado la clase 3 es un área de uso industrial.

Transecto 3:

Este transecto cuenta con la mayor variabilidad térmica, predomina la clase 1 correspondiente a baldíos urbanizados y habitacional, seguido de la clase 2 calles que agrupa al habitacional nuevo y baldíos urbanizados; se podría inferir que la clase 3 (corredor urbano, comercial y servicios) tiene su aparición como consecuencia del gran uso habitacional, por ultimo se encuentra una zona industrial que denomina la clase 4. Como se vio anteriormente la ciudad creció uniformemente hacia el lado oriente originando importantes alteraciones al clima regional.

Transecto 4:

Aunque muestra variaciones mínimas en la estructura habitacional que contrasta con el equipamiento, servicios y comercial, alternando por

una zona en la parte media y final de grandes lotes baldíos, es indicador que todo cambio sufrido en el uso de suelo en el área intraurbana repercute en el calentamiento de la atmósfera cercana a ella.

5.5 INTENSIFICACIÓN DE LA IUC POR EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Es conveniente tener una idea del cambio que sufrirá el clima urbano de continuar con las mismas condiciones térmicas en conjunto con el factor del calentamiento global, si bien es cierto, el modelo de circulación CGCM1 al igual que cualquier modelo climático no es exacto, puede estimar posibles escenarios a los que nos enfrentaremos de seguir consumiendo en gran medida combustibles fósiles.

Al introducir el efecto de los gases invernaderos a la tendencia térmica con el escenario A1 en la ciudad de Mexicali, se encontraron resultados alarmantes, aunque el incremento encontrado en los cambios son similares respecto al incremento estimado en la regresión lineal simple del desarrollo histórico de la IUC en los 2020s. Para los 2050s, continua la tendencia; para los 2080s, la temperatura mínima promedio presenta un incremento significativo de 5.1°C (tabla 4.19) respecto a la temperatura de 14.1°C

Las estimaciones calculadas con los escenarios económicos A2 y B2 que toman en cuenta la empresa nacional y tutela local respectivamente (tabla 2.1), son mas conservadores en el incremento de calentamiento metropolitano; para los 2020s el ascenso obtenido de la IUC es 0.2°C; en los 2050s la temperatura se eleva 0.4°C en

ambos casos; Aun así el periodo 2080s el cambio en la temperatura mínima varia de 0.7°C con el primer escenario (A2) a 0.5°C en el segundo caso (B2).

CAPITULO VI.

CONCLUSIONES.

La climatología e intensidad de la IUC es influenciada tanto por factores naturales y físicos, para este estudio en particular se relacionó el uso suelo y el crecimiento urbano en el periodo 1993-2003, se aplicaron técnicas utilizadas en otras partes del mundo (estadística descriptiva e inferencial, recorridos peatonales, sensores remotos y SIG's) así como algunas creadas específicamente para la ciudad de Mexicali, B.C. (modelación dinámica y algoritmos genéticos).

Los resultados revelaron que la IUC de dosel urbano de 1960 a 1990 paso de ser una isla fría de magnitud media -1.3°C a una isla de calor (1.8°C), Durante el periodo 1993-2003 se incrementó 0.30°C como consecuencia del cambio y uso de cobertura del suelo al crecer la ciudad en un 2.75% anual; el fenómeno térmico tiene su desarrollo climatológico durante otoño, invierno y primavera, el día de mayor intensidad es el 4 febrero con 5.3°C ; La diferencia térmica menor ocurre en Enero 19 (1.2°C). En general la hora promedio del fenómeno va de las 5:00 a.m. a 7:00 a.m., también se encuentra durante la noche o madrugada, sin embargo, se presento un caso atípico en Marzo 25 la mayor diferencia térmica sucede a las 12:00 p.m. El crecimiento espacial de la IUC de dosel urbano se presenta con mayor frecuencia alrededor de la estación climatológica ITM, que se caracterizó por tener un porcentaje de lotes baldíos y de uso industrial alto (20.55% y 15% respectivamente) así como un uso de área verde bajo (1.52%), sin embargo el día 2 de Febrero se presentó una

segunda isla de calor en los alrededores de COBACH hecho que se puede atribuir al porcentaje de vegetación de 2.4% similar a ITM; la zona más fría se localiza en Ethel, una estación rural.

En esta tesis se presentó una nueva técnica para la detección de intensidad, hora y desarrollo espacial de la IUC desarrollada mediante un sistema dinámico el cual integra de la metodología tradicional; los casos desarrollados con Stella coinciden con los arrojados con la técnica estadística pero con la ventaja que la intensidad, hora y ubicación geográfica se identifican de manera rápida sin necesidad de transportar la información de un programa a otro.

La IUC superficial el día 6 de Abril de 1993 a las 10:00 a.m. tuvo una intensidad de 12°C y el 12 de mayo del 2003 se presentó con 10°C a través de transectos térmicos se corroboró que el crecimiento urbano en 10 años, de 1993 a 2003, repercutió en un mayor desarrollo de la isla de calor urbana de dosel urbano acentuándose el calentamiento en la zona oriente que es precisamente la zona con mayor crecimiento, lo que podría ser un indicador de la modificación del clima ocasionado por la urbanización, y por tanto generador de microclimas urbanos, al alterar el balance radiativo y energético.

El aumento de la temperatura se ha incrementado notablemente, sobre todo partir de la década de los 80's del siglo pasado, aparentemente por el cambio de uso del suelo que se ha dado en la ciudad a partir de esos años, Si continúa esa tendencia los escenarios para la ciudad son desfavorables repercutiendo en el confort y en el gasto de energía para mantener los espacios confortables.

De acuerdo a los escenarios A1, A2 y B2 generados por downscaling las temperaturas mínimas promedio, respecto al escenario base de 1961-1990 (14.1°C), para los 2020s, 2050s y 2080s serán de 16.8, 17.30 y 20.0 °C respectivamente.

Es importante tomar medidas que mitiguen el aumento en las temperaturas al interior de la ciudad de Mexicali, tal como construir con materiales fríos, planear el crecimiento urbano aprovechando los fuertes vientos estacionales para romper la IUC, aumentar la cantidad de áreas verdes entre otras recomendaciones, ya que actualmente su número es muy inferior con respecto al espacio urbanizado. Otras medidas que individualmente se pueden realizar es plantar árboles para sombrear las superficies urbanas y reducir su temperatura, sobretodo en las paredes que dan al sur, este y oeste., esta reducción en la temperatura superficial puede ayudar a reducir de manera sustancial el uso de energía para aire acondicionado. Otra posible solución podría ser pintar el techo y paredes de colores claros ya que esta acción aumenta el albedo, y por lo tanto reduce la energía generada por radiación de onda corta, el uso de "techos verdes" ayuda a reducir la acumulación de calor en las construcciones.

Finalmente, el tema de la IUC en la ciudad de Mexicali no es una investigación concluida, aun queda mucha por hacer en el aspecto de modelación con implementación de nuevas técnicas, y propuesta de estrategia de mitigación que realmente puede hacerse en las ciudades calidas desérticas.

CAPITULO VII.

BIBLIOGRAFIA.

- Ackerman, B. (1985). *TEMPORAL MARCH OF THE CHICAGO HEAT ISLAND*.
Journal of Climate & Applied Meteorology 24, pp. 547-54.
- Allen, A., Milenic, D., and Sikora, P. (2003). *SHALLOW GRAVEL AQUIFERS AND THE URBAN 'HEAT ISLAND' EFFECT: A SOURCE OF LOW ENTHALPY GEOTHERMAL ENERGY*. Geothermics 32, pp. 569-578.
- Alonso García M^a Salud, Fidalgo Martínez M^a Del Rosario, Labajo Salazar José Luis (2004), *EL CLIMA DE LAS CIUDADES: ISLA DE CALOR DE SALAMANCA*, Revista de salud ambiental, vol. 4, pp 25-29
- Alvarez López (2004), *CAMBIO CLIMÁTICO Y MICROCLIMAS URBANOS EN LAS CIUDADES DEL CENTRO DE CUBA. REFLEXIONES PARA EL PLANTEAMIENTO A TRAVÉS DEL SIG*. Avances en energías renovables y medio ambiente, vol. 8, No. 4, pp 01.111-01.116
- Alvarez, Ranfla, Toudert, Dorantes (2001), *ATLAS DE MEXICALI*, Universidad Autonoma de Baja California, Instituto de Investigaciones sociales.
- Arnfield, A. J. (2003). *TWO DECADES OF URBAN CLIMATE RESEARCH: A REVIEW OF TURBULENCE, EXCHANGES OF ENERGY AND WATER, AND THE URBAN HEAT ISLAND*. International Journal of Climatology 23, pp. 1-26.
- Boris Graizbord (2004), *MEGACIUDADES, GLOBALIZACIÓN Y VIABILIDAD URBANA*, Investigaciones Geograficas, Boletín del Instituto de geografia, UNAM, No. 63, 2007, pp 125-140
- Bornstein, Lorenz, Johnson (1972), *RECENT OBSERVATIONS ON URBAN EFFECTS ON WINDS AND TEMPERATURES IN AND AROUND NEW YORK*. Conference an urban environment and second conference on

- biometeorology, American meteorological society, pp. 29-33
- Bridgman, Warner and Dobson (1995). *URBAN BYOPHISICAL ENVIRIOMENTS*, Oxford university press Australia, pp. 151
- Cervantes Pérez Juan, Barradas Miranda Víctor Luís, Martínez Tejada Adalberto, Cordova Angulo Quintiliano, Ramírez Triana César y Tepach Gutiérrez Gerardo (2000) *ASPECTOS DEL CLIMA URANO DE VILLAHERMOSA, TABASCO, MÉXICO*. Universidad y Ciencias, vol. 16 No. 31, 10-16.
- Cervantes Pérez Juan, Barradas Miranda Víctor Luís, Martínez Tejada Adalberto, Cordova Angulo Quintiliano, Ramírez Triana César Y Tepach Gutiérrez Gerardo (2000) *Aspectos del Clima Urano de Villahermosa, Tabasco, México*. Universidad y Ciencias, vol. 16 No. 31, pp 10-16.
- Cervantes Pérez Juan, Barradas Miranda Víctor Luís, Martínez Tejada Adalberto, Cordova Angulo Quintiliano, Ramírez Triana César Y Tepach Gutiérrez Gerardo (2000) *ASPECTOS DEL CLIMA URANO DE VILLAHERMOSA, TABASCO, MÉXICO*. Universidad y Ciencias, vol. 16 No. 31, pp 10-16.
- Chandler (1976), *URBAN CLIMATOLOGY AND ITS RELEVENCE TO URBAN DESIGN TECHNICAL*, Geneva Switzead, No. 19, pp. 61-88
- Changnon, S. A., and Kunkel, K. E. (2001). *THE NATURE AND IMPACTS OF THE JULY 1999 HEAT WAVE IN THE MID-WESTERN UNITED STATES: LEARNING FROM THE LESSONS OF 1995*. Bulletin of the American Meteorological Society 82, pp. 1353-1367
- Cuadrat, Lopez, Marti, Riva (2005), *EL MEDIO AMBIENTE URBANO EN ZARAGOZA. OBSERVACIONES SOBRE LA ISLA DE CALOR URBANA*, Anales de Geografía de la Universidad Complutense vol. 13, p. 127-138
- Eliasson Ingeärd (2000), *THE USE OF CLIMATE KNOWLEDGE IN URBAN PLANNING*, Landscape and Urban Planning vol. 48, 31-44.
- García-Cueto O. R., Jáuregui-Ostos E., Toudert D., Tejada-Martínez A. (2007).

- DETECTION OF THE URBAN HEAT ISLAND IN MEXICALI, B.C. MÉXICO AND ITS RELATIONSHIP WITH LAND USE. *Atmósfera* 20 (2), pp 111-131.
- Hadas Saaroni, Eyal Ben-Dor, Arie Bitan, Oded Potchter (2001), *SPATIAL DISTRIBUTION AND MICROSCALE CHARACTERISTIC OF THE URBAN HEAT ISLAND IN TEL-AVIV, ISRAEL*. *Landscape and Urban Planning* Vol. 48. pp 1-18.
- Hafner. J. and Kidder S., *URBAN HEAT ISLAND MODELING IN CONJUNCTION WITH SATELLITE - DERIVED SURFACE/SOIL PARAMETERS*. *Journal of applied meteorology*. 1998: 448 - 465.
- INEGI, 1996, *XI CENSO GENERAL DE POBLACION Y VIVIENDA*. Tabuladores básicos
- Ingeärd Eliasson (2000), *THE USE OF CLIMATE KNOWLEDGE IN URBAN PLANNING*, *Landscape and Urban Planning* vol. 48, pp 31-44.
- Ingegard (2000), *THE USE OF CLIMATE KNOWLEDGE IN URBAN PLANNING*, *Landscape and urban planning* vol. 48, pp.31-44
- IPPC, Climate Change, 2007: *THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 pp.
- Kalkstein (1993), *THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON HUMAN HEALTH: SOME INTERNATIONAL IMPLICATIONS*, *Experiential*, Vol 49, pp. 969-979
- Kant, Y. and Badarinath, K.V.S. (2000). *STUDIES ON LAND SURFACE TEMPERATURE OVER HETEROGENEOUS AREAS USING AVHRR DATA*. *Remote Sensing*, 21(8): 1749- 1756.
- Kung, Bryson, Lenschow (1964), *STUDY OF A CONTINENTAL SURFACE ALBEDO EN THE BASIS OF FLIGHT MEASUREMENTS STRUCTURE OF THE*

- EARTH'S SURFACE COVER OVER NORTOH AMERICA.* Weather, Vol. 92 pp.543-64
- Landsberg (1956), *THE CLIMATE OF TOWNS. MAN'S ROLE IN CHANGING THE FACE OF EARTH*, University of Chicago Press, pp. 584-606
- Landsberg, H. E. (1981). *THE URBAN CLIMATE*. New York: Academic Press.
- Landsberg (2001), *THE URBAN CLIMATE*. International geophysics series. 2001: vol. 28.
- LI y YHE. (1998), *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF STACKED MULTI-TEMPORAL IMAGES FOR THE MONITORING OF RAPAD URBAN EXPANSION IN THE PEAR RIVER DELTA*. International journal of remote sensing, Vol. 19, No. 9, pp 1501-1518.
- Li y Yhe (1998), *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF STACKED MULTI-TEMPORAL IMAGES FOR THE MONITORING OF RAPAD URBAN EXPANSION IN THE PEAR RIVER DELTA*. International journal of remote sensing, vol. 19, no. 9: 1501-1518.
- Montálvez P., González-Rouco J. y Valero F., *UN ESTUDIO DE LA ISLA DE CALOR MEDIANTE EN MODELO MESOESCALAR*, Departamento de física de la tierra, astronomía y astrofísica ii. Iniv. computense de Madrid, pp 471-482.
- Moreno García M. Carmen (1994), *INTENSITY AND FORM OF THE URBAN HEAT ISLAND IN BARCELONA*. International journal of climatology, Vol. 14, pp 705-710.
- Nasrallah Hassan, Brazel Anthony J. and Balling Robert Jr. (1990), *ANALYSIS OF THE KUWAIT CITY URBAN HEAT ISLAND*. International Journal of Climatology, Vol. 10. 401-405.
- OCDE (1994), *CITIES FOR THE 21ST CENTURY*, Organisarion for Economic Co-operation and Development Paris.
- Oke (1982). *THE ENERGETIC BASIS OF THE URBAN HEAT ISLAND*. Quarterly

- Journal of the Royal Meteorological Society 108, pp. 1–24.
- Oke (1982). *THE ENERGETIC BASIS OF THE URBAN HEAT ISLAND*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108, pp. 1–24.
- Oke, Johnson, Steyn, Watson (1991), *SIMULATION OF SURFACE URBAN HEAT ISLAND UNDER IDEAL CONDITIONS AT NIGHT*, Layer meteorology, vol. 56 pp. 339-358
- Oke, Kalandra, Steyn (1981), Parametrization of Heat Storage in Urban Areas, Urban Ecology, 5: 45-54.
- Palecki, M. A., Changnon, S. A., and Kunkel, K. E. (2001). *THE NATURE AND IMPACTS OF THE JULY 1999 HEAT WAVE IN THE MID-WESTERN UNITED STATES: LEARNING FROM THE LESSONS OF 1995*. Bulletin of the American Meteorological Society 82, pp. 1353–1367.
- Park (1987), *CITY SIZE AND URBAN HEAT ISLAND INTENSITY FOR JAPANESE AND KOREAN CITIES*. Journal Geographic vol, 60. pp. 238-250
- Patz, J. A., and Olson, S. H. (2006). *CLIMATE CHANGE AND HEALTH: GLOBAL TO LOCAL INFLUENCES ON DISEASE RISK*. Annals of Tropical Medicine & Parasitology 100, pp. 535–549.
- Pavao-Zuckerman, M. A., and Coleman, D. C. (2005). *DECOMPOSITION OF CHESTNUT OAK (QUERCUS PRINUS) LEAVES AND NITROGEN MINERALIZATION IN AN URBAN ENVIRONMENT*. Biology and Fertility of Soils 41, pp. 343–349.
- Pérez González M.^a E., García Rodríguez M.^a P. Y Guerra Zaballos A. (2003), *ANÁLISIS DEL CLIMA URBANO A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL CENTRO PENINSULAR ESPAÑOL*, *Anuales de Geografía de la Universidad Complutense* vol. 23 pp 187-206
- Quintero, Sanchez, Collins, Ganster, Mason, *DESARROLLO Y MEDIOAMBIENTE DE LA REGION FRONTERIZA MEXICO-ESTADOS UNIDOS, VALLES DE IMPERIAL Y MEXICALI*, Universidad Atonoma de Bajacalifornia 2005
- Rosenfeld, Akbari, Brez, Fishman, Kurn, Sailor, Taha (1995), *MITIGATION OF*

- URBAN HEAT ISLAND: MATERIALS, UTILITY PROGRAMS, UPDATES.*
Energy and Buildings vol. 22, pp. 225-265
- Sailor y Lu (2004), *A TOP-DOWN METHODOLOGY FOR DEVELOPING DIURNAL AND SEASONAL ANTHROPOGENIC HEATING PROFILES FOR URBAN,*
Atmospheric environment vol 38, pp. 2737-2748
- Serra (2007), *ESTUDIO DE LA ISLA URBANA DE CALOR DE LA CIUDAD DE IBIZA, INVESTIGACIONES GEOGRÁFICAS,* Vol. 44, pp. 55-73
- Shmid, Oke (1981) *A MODEL TO ESTIMATE THE SOURCE AREA CONTRIBUTING TO SURFACE LAYER TURBULENCE AT A POINT OVER PATCHY SURFACE,* Journal Meteorology No. 116, pp. 9655-988
- Shu (1994). *SOME ASPECTS OF THE URBAN CLIMATE OF SHANGAI,* World meteorological organization, Geneva, Switzerland, 1986:. 87-1009
- Steffen, Walker, Ingram, Koch (1992), *GLOBAL CHANGE AND TERRESTRIAL ECOSYSTEMS: THE OPERATIONAL PLAN.* International Geosphere-Biosphere Program, Stockholm No. 21
- STONE BRIAN JR. Y RODGERS MICHAEL O. (2001), *URBAN FORM AND THERMAL EFFICIENCY HOW THE DESIGN OF CITIES INFLUENCES THE URBAN HEAT ISLAND EFFECT.* APA Journal, vol. 67, No. 2, pp 187-198.
- Svensson, M. K., and Eliasson, I. (2002). Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning* 61, pp. 37-54.
- Synnefa, Dandou, Santamouris, Tombrou(2008), *ON THE USE OF COOL MATERIALS AS A HEAT ISLAND MITIGATION STRATEGY, JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY,* vol. 47, pp. 2846-2856.
- Taha (1997), *URBAN CLIMATE AND HEAT ISLAND: ALBEDO, EVAPOTRANSPIRATION AND ANTHROPOGENIC HEAT,* Energy and building vol. 25 pp. 99-103
- Tejeda (1994), *SOBRE LA RELACIÓN CLIMA/URBE,* La Ciencia y el Hombre, no.17,pp.17-23

- Turker, Asik (2002), *DETECTING LAND USE CHANGE AT THE URBAN FRINGE FROM REMOTELY SENSED IMAGES IN ANKARA, TURKEY*, Geocarto international, vol. 17 No. 3, pp.45-50
- Voogt (2004), *URBAN HEAT ISLAND*, American institute of biological sciences pp. 43-49
- Voogt (2002), *URBAN HEAT ISLAND, CAUSES AND CONSEQUENCES OF GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE*, vol. 3, pp 660-666.
- Weihe (1988) *LA ESPERANZA DE LA VIDA EN LOS CLIMAS TROPICALES EN FUNCION DE LA RUBANIZACION, LA CLIMATOLOGIA URBANA Y SUS APLICACIONES CON ESPECIAL REFERENCIAS A LAS REGIONES TROPICALES*, OMM No. 652: 274-311
- Weng (2001), *A REMOTE SENSING-SIG EVALUATION OF URBAN EXPANSION AND ITS IMPACT ON SURFACE TEMPERATURE IN THE ZHUJIANG DELTA, CHINA*, International Journal of Remote Sensing, vol. 22 No. 10, pp 1999-2014.
- Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Li Weifeng, *DETECTANDO Y ANALIZANDO LOS PATRONES DE LA ISLA DE CALOR EN BEIJING, CHINA*, pp 1-4.
- Wilby, Dawson (2007). Statistical Downscaling Model Versión 4.2 Use Manual.
On-Line: <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/index.html>
- www.metoffice.gov.uk, 2008
- www.pasaporteblog.com, 2009
- www.rinnovabili.it/albedo-urbano, 2009)

APENDICE. A

Algoritmo genético.

Es una técnica de programación basada en los principios darwinianos de la evolución de las especies. Siguiendo este Modelo, se busca encontrar una solución a un problema dado (J. Koza 1978).

Dicha solución será el individuo con la mejor adaptación al medio entre toda la población. Cada población dará paso a nuevas generaciones, esperando que los procesos de selección natural, reproducción, combinación y mutación generen individuos cada vez más aptos, y por ende, que satisfagan mejor la solución del problema de manera que los individuos de la población sean funciones que van mejorando hasta que el error es menor que el límite de convergencia.

Una función puede estar compuesta por cualquiera de las siguientes operaciones:

- Funciones binarias básicas: +, -, *, /, %
- Funciones binarias: exp(a,b)

Para avanzar a la siguiente generación, se calcula el *fitness*² (medida de adaptación) de cada individuo y se selecciona la tercera mejor parte. El *fitness* esta dado por la distancia euclidea de la función candidata y la función real en los puntos dados. Si el conjunto de puntos es $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ y f es la función candidata en tanto que t es la temperatura real.

Polígonos de Aproximación

Una forma de interpolar la temperatura de cualquier punto en el mapa es considerando los tres puntos más cercanos y calculando el plano que pasa por ellos. En geometría euclidiana, cualesquiera tres puntos son coplanarios, de manera que basta con determinar la ecuación de ese plano para determinar la temperatura de un punto en particular.

- Elementos y procesos del subsistema "Isotermas IUC":

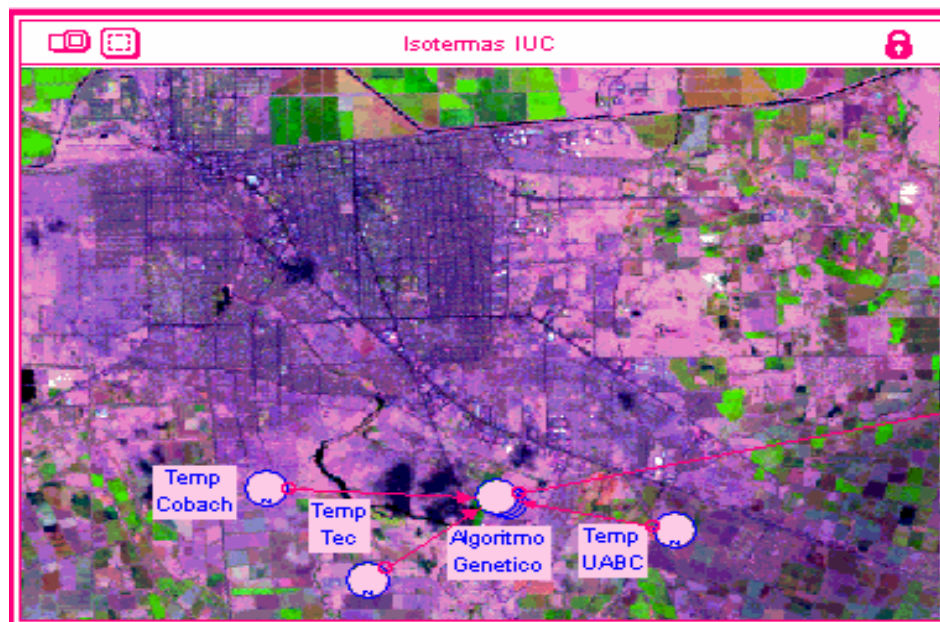


Figura A.1 Subsistema "Isotermas IUC".

- VARIABLES
Convertidores 4.

2. Temp Cobach. Es de tipo gráfico, almacena las temperaturas horarias de la estación COBACH.
3. Temp Tec. Es de tipo grafico, almacena las temperaturas horarias de la estación ITM
4. Temp UABC. Es de tipo grafico, almacena las temperaturas horarias de la estación Universidad
5. Algoritmo genético, arreglo de 5 x 5. que es llenado con la información grafica de las 3 estaciones para generar la interpolación.

Conectores 4

- a Tres conectores conducen temperaturas de estaciones meteorológicas al convertidor algoritmo genético.
- b Arroja la salida como entrada al sistema Intensidad y hora.

- ENTRADAS AL SISTEMA: Temperaturas horarias promedio (2000-2005) de las estaciones UABC, Cobach y Tecnológico.

- Formulación del sistema algoritmo genético

$$P1 - ((P1 - P2) / n + 1); P2 - ((P2 - P3) / n + 1)$$

Donde:

P1: temperatura de COBACH

P2: temperatura UABC

P3: temperatura ITM

N: Total de puntos (temperaturas reales, no estimadas)

Entonces:

$$\text{Temp_Cobach} - ((\text{Temp_Cobach} - \text{Temp_UABC}) / 4);$$

$$\text{Temp_UABC} - (((\text{Temp_UABC} - \text{Temp_Tec}) / 4))$$

Para determinar la supervivencia del individuo mas fuerte

$$\text{ABS}((\text{Temp_Cobach}-\text{Temp_UAC})/4) > \text{ABS}((\text{Temp_UABC}-\text{Temp_Tec})/4)$$

SALIDA DEL SISTEMA: Análisis espacial térmico, Temperatura máxima.

- Procesamiento final y visualización.

Se vaciaron al modelo los promedio horario de temperaturas del dia elegido, utilizando Stella 9.0.3 se realizó una interpolación por medio del algoritmo genético tomando como $\{p1, p2, p3\}$ las temperaturas de las estaciones urbanas (UABC, ITM, COBACH); los datos generados por el modelo fueron exportados a un archivo externo para posteriormente importarlos al modulo spatial map y de esta manera obtener como primera salida una vista espacial del fenómeno e identificar o definir la isla o islas urbanas de calor y como una segunda salida fue extraído el elemento de la matriz *algoritmo genético ciudadano* que tuviese el valor más alto.

- **Elementos y procesos del subsistema "Intensidad y hora"**

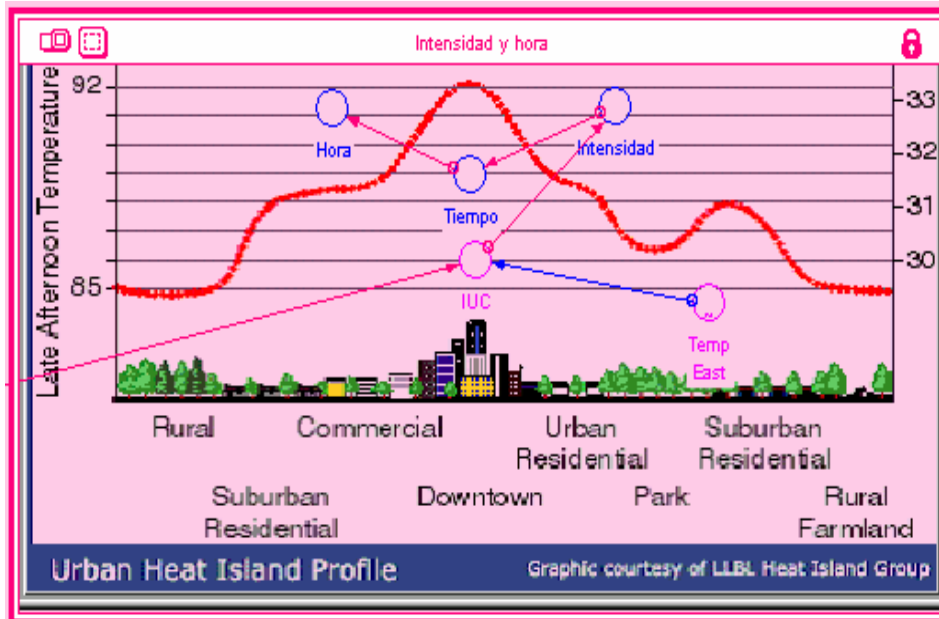


Figura A.2 subsistema "Intensidad y hora".

- TIPOS DE VARIABLES

1. Convertidores 5.

- a. Temp East, Es de tipo gráfico, almacena las temperaturas horarias de la estación East correspondiente al entorno rural.
- b. IUC, Compara la temperatura rural con la urbana.
- c. Intensidad, Guarda la intensidad de la IUC.
- d. Tiempo, Almacena la hora en que sucede un cambio
- e. Hora, Extrae el valor máxima del tiempo.

2. Conectores 5

- a. Dos transportan temperaturas.
- b. Uno Conduce valor.
- c. Dos Transfieren Tiempo.

- ENTRADAS AL SISTEMA: Temperaturas máximas del sistema isoterma y temperaturas horarias promedio (2000-2005) de la estación Ethel.
- PROCESOS: TU-TR (temperatura urbana - temperatura rural), tiempo máximo e intensidad máxima.

SALIDA DEL SISTEMA: Intensidad y hora del fenómeno.

Procedimientos

Se restó la TU (salida del sistema *isoterma IUC*) - TR (temperaturas del entorno virgen) correspondientes a la misma hora; con la diferencia positiva de ambos se obtuvo la intensidad de la IUC para cada hora, posteriormente se hizo una comparación entre todas y se extrajo la mayor.

Fue creada una variable temporal llamada tiempo la cual sirvió para guardar el tiempo en que la intensidad actual es mayor que el historial de la intensidad en el time anterior, en caso de que no sea cumplida la condición se guarda el valor -1, se decidió introducir el valor -1 ya que no existe la hora -1 pero si existe la hora 0, una vez realizada la comparación se procedió a sacar el valor máximo de la variable tiempo dando como salida la hora del fenómeno.

- ESPECIFICACIONES DE EJECUCION.

La unidad de tiempo de la simulación es hora ya que los datos obtenidos son horarios y el objetivo de la misma es encontrar la hora en que se da el fenómeno, su longitud de 0 a 24 ya que el día tiene 24 horas aunque empieza de 0 es necesario añadir una hora mas al final

para poder obtener el resultado de la ultima acción, o sea la hora 23, su DT es 1, para la integración se utilizo el método Euler.

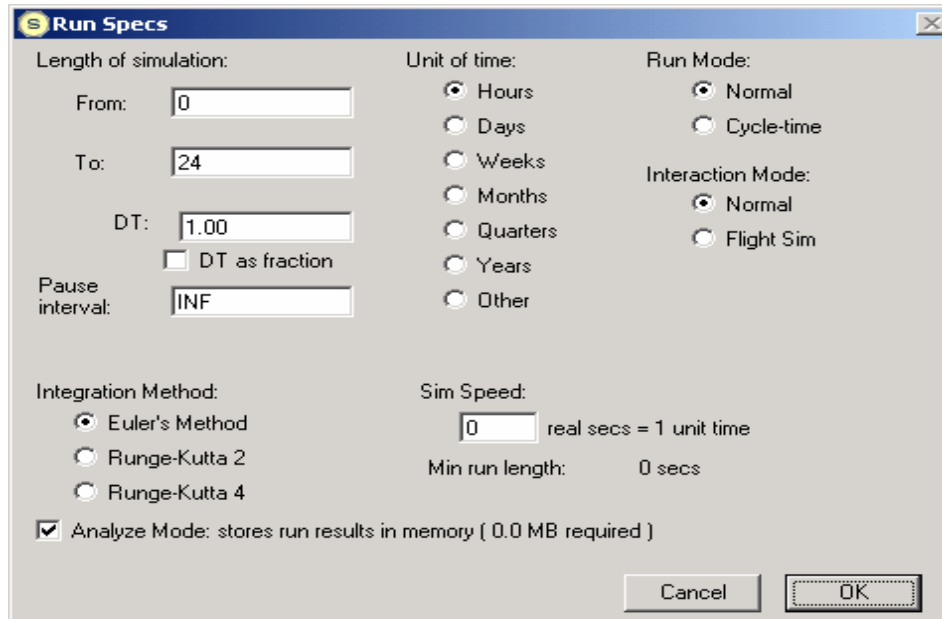


Figura A.3 Especificaciones del modelo.