



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
DOCTORADO DE ARQUITECTURA.

GEOTECNOLOGÍA ESPACIAL APLICADA AL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ISLAS TÉRMICAS URBANAS.

Una contribución al estudio de la dinámica socio-ambiental de las islas de calor urbano en la ciudad de Caracas.

Tesis Doctoral presentada ante la Universidad Central de Venezuela
para optar al Grado Académico de Doctor en Arquitectura.

Tutora: Dra. María Elena Hobaica.

Autor: Karenia Córdova Sáez.

CARACAS, Diciembre, 2012.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
DOCTORADO DE ARQUITECTURA.

GEOTECNOLOGÍA ESPACIAL APLICADA AL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ISLAS TÉRMICAS URBANAS.

**Una contribución al estudio de la dinámica socio-
ambiental de las islas de calor urbano en la ciudad de
Caracas.**

Autor: Karenia Córdova Sáez.

Tutora:

Dra. María Elena Hobaica.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
DOCTORADO DE ARQUITECTURA.

APROBADO EN NOMBRE DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DE
VENEZUELA POR EL SIGUIENTE JURADO EXAMINADOR:

Dra. María Helena Hobaica. Tutor-Coordinador.

Dr. Antonio De Lisio CENAMB-UCV.

Dra. Ángela Henao CIDIAT-ULA.

Dra. Mercedes Marrero COMIR-UCV.

Dra. Rosa María Chacón VUA-USB.

AGRADECIMIENTO.

A mi familia, a mis hijos, a Alexis, mi compañero de vida, "*Parceiro da estrada*", a los amigos fieles que nos dan fuerza todos los días, nos motivan y nos inspiran a seguir en la ruta, Laurin amiga, gracias. Al colega y amigo, Dr. Santiago Ramos, asesor técnico de este trabajo IZET-UCV, gracias a su inmensa colaboración fue posible la conclusión exitosa de este trabajo. A mi tutora Dra. Marilen Hobaica, por su paciencia y su solidaridad en este largo camino, gracias!, a la Comisión de Postgrado de la Facultad de Arquitectura y sus autoridades, por su apoyo y su confianza en mí, Gracias, a todos, amigos, colaboradores, del Instituto de Geografía y Desarrollo Regional-UCV, Tamara, Denise, Víctor Hugo, Jesús, Marisol, al CPDI-FII, ABAE MppC y T, Observatorio Cajigal-Armada, La Carlota-Base Aérea, Dpto. Hidrometeorología-UCV, a Sandrita por su ayuda en la edición final del trabajo, a las asociaciones de vecinos de Montalbán, a todos. Simplemente Gracias!!!

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
DOCTORADO DE ARQUITECTURA

GEOTECNOLOGÍA ESPACIAL APLICADA AL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ISLAS
TÉRMICAS URBANAS. Una contribución al estudio de la dinámica socio-ambiental de las islas de
calor urbano en la ciudad de Caracas.

Autora: Karenia Córdova Sáez

Tutor: Dra. María Helena Hobaica

Fecha: Diciembre, 2012.

RESUMEN

En las últimas décadas, olas de calor urbano, sequías extremas e incendios forestales se han reportado cada vez con mayor frecuencia, perturbando la dinámica ambiental y la calidad de vida de los habitantes localizados en las ciudades. La intensidad de estos eventos climáticos en las áreas urbanas está relacionada, con la sustitución de la cobertura vegetal por superficies secas no evapotranspirativas que alteran el balance radiativo superficial, produciendo en consecuencia, un aumento de la temperatura en las zonas urbanas. Este fenómeno se conoce como *islas térmicas urbanas*, y su intensidad y extensión depende no solo de las propiedades físicas de las coberturas naturales y artificiales presentes en los espacios urbanos, sino también de la estacionalidad, y otros fenómenos climáticos. Mediante el uso de geotecnologías, en particular utilizando la banda térmica (6-2) del sensor LANDSAT 7 ETM +, es posible observar las variaciones en los patrones de la temperatura superficial y determinar la variabilidad, intensidad y extensión del fenómeno de isla térmica en la ciudad. La ventaja de este tipo de técnicas, respecto a los métodos convencionales (estacionales analógicas, muestreo puntual o por transectas), es la posibilidad de cubrir grandes superficies y adicionalmente, integrar datos digitales y vectoriales en un sistema de información geográfica. A los efectos de este trabajo seleccionaron un set de imágenes comprendidas en el periodo Marzo 2001- Enero 2011, tanto para temporada de sequía como de lluvia, para analizar los efectos de la estacionalidad sobre el fenómeno de isla térmica, en la ciudad de Caracas. Los resultados obtenidos mostraron importantes diferencias en la temperatura superficial entre las áreas urbanas y la zona peri-urbana, así como entre el periodo húmedo y el periodo de sequía. Se espera a partir de este estudio poder contribuir con el diseño de estrategias ambientales de mitigación, y/o de atención a la población.

Palabras clave: islas térmicas, geotecnologías, espacios urbanos.

Contenido

Introducción.	10
1.-Área de Estudio.	14
2.-Objetivos Generales de la investigación.	15
3.-Objetivos Específicos.	15
4.-Premisas básicas de investigación.	16
5.-Limitaciones en el desarrollo del estudio.	17
6.- Justificación, relevancia y aportes del trabajo.	19
Capítulo I. Marco Teórico-conceptual. Antecedentes y conceptos básicos.....	22
1.1- El estado del arte en las investigaciones sobre islas térmicas urbanas: Antecedentes de investigación.	22
1.2.-El Clima y Espacio construido: El clima urbano.	27
1.3.-Conceptos básicos sobre las islas urbanas de calor o islas térmicas urbanas.	33
1.3.1.- Definición y tipos. Implicaciones metodológicas en el estudio.	36
1.4.1.-Elementos modificadores del clima, su influencia local en la formación y mitigación del efecto de isla térmica superficial en Caracas.	55
1.5.-El mosaico urbano, evolución histórica, variabilidad espacial e incidencias en la formación de islas térmicas superficiales en el área urbana de Caracas. ..	59
Capítulo II.-Aplicaciones de los sensores remotos en la interpretación del fenómeno de islas térmicas o islas de calor urbano.	73

2.1.-Ventajas del uso de sensores remotos en el estudio del fenómeno de islas térmicas urbanas.	80
2.2.- Estrategias metodológicas de análisis para el caso de estudio de la ciudad de Caracas: Criterios de selección y de preparación de imágenes.	83
2.3-Procesamiento de las Imágenes, etapas y rutinas de procesamiento utilizadas:	88
2.3.1 Etapa Inicial.	89
2.3.2 Etapa Intermedia.	89
2.3.3 Etapa Avanzada.	90
2.4- Recursos complementarios de análisis con sensores remotos.	91
2.4.1-Clasificaciones de uso del suelo.	91
2.4.1.1-Técnicas de exploración y verificación de resultados.	92
2.4.2-Procedimiento de cálculo de Índice de Vegetación-NDVI.	96
2.4.3-Procedimiento de cálculo de la temperatura superficial-LST.....	99
2.4.3.1 Ajuste por efectos de atmosfera o Corrección atmosférica.	102
2.4.4- Integración bases datos e imágenes raster-vectorial. Desarrollo del sistema de información geográfica-SIG del proyecto.....	106
Capítulo III.- Análisis y Discusión de Resultados. Variabilidad y dinámica de los patrones térmicos superficiales en la ciudad de Caracas.	111
3.1.-Relaciones entre la respuesta térmica determinada con sensores remotos por cuadrantes urbanos y las variables ambientales locales.	111

3.1.1 El Rol de la vegetación intra y peri-urbana en la mitigación de las temperaturas superficiales	123
3.1.2-Ejemplos de ventanas de análisis de casos por sectores.	132
3.2.-La asociación entre materiales, estructuras y elementos urbanos con la temperatura superficial observada.	136
3.2.1-Anomalías térmicas.	147
3.3.- Estacionalidad, variabilidad climática y su relación con la dinámica de las islas térmicas urbanas.	149
3.4.- Impactos de formación de las islas térmicas urbanas sobre la salud y el ambiente.	153
Capítulo IV.-Estrategias de prevención, adaptación y mitigación de los efectos de la isla de calor urbana.	162
4.1.-Estrategias de prevención para disminuir el potencial de formación de islas de calor urbano.	163
4.1.1.-Conservación de espacios naturales, reforestación taludes, rescate y arborización espacios remanentes vialidad.	165
4.2.-Estrategias de adaptación y mitigación de la isla térmica urbana en Caracas, de acuerdo a la caracterización espacio-temporal, térmica y urbano-ambiental.	176
4.2.1.-Techos verdes (green roof), corredores verdes, fachadas verdes.	178
4.2.1.1-Techos verdes extensivos.	179

<i>4.2.1.2-Techos verdes intensivos.....</i>	<i>184</i>
<i>4.2.1.3-Barreras a la implementación de techos verdes.....</i>	<i>186</i>
<i>4.2.1.4--Techos reflectivos (cool roof), otras alternativas de mitigación.....</i>	<i>187</i>
<i>4.2.2.-Estrategias de mitigación, frente a los eventos de variabilidad climática y cambio climático global.....</i>	<i>191</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>198</i>
<i>Recomendaciones.....</i>	<i>207</i>
<i>Referencias Bibliográficas.....</i>	<i>210</i>
<i>Índice de Figuras.....</i>	<i>231</i>
<i>Índice de Tablas.....</i>	<i>234</i>
<i>Índice de Fotos.....</i>	<i>235</i>
<i>ANEXOS.....</i>	<i>236</i>

Introducción.

De modo general, podría afirmarse, que los espacios sometidos a mayor “*stress ambiental*” por la intensidad y la dinámica de los usos que convergen en él, sean justamente aquellos en los que se localizan las grandes ciudades y megalópolis urbanas, los cuales adicionalmente constituyen el hábitat de un porcentaje creciente de población, expuesta igualmente a las condiciones de alta vulnerabilidad ambiental presentes en estos espacios.

La saturación urbana y la ampliación del espacio construido, han determinado cambios ambientales que si bien inicialmente tenían una incidencia más localizada, hoy en día podría afirmarse que sus efectos se extienden sobre el macro-ambiente urbano, deteriorando aun más el ya precario equilibrio de los sistemas ambientales y climáticos en estos espacios.

Ello, necesariamente nos plantea una serie de interrogantes, ¿Estamos modificando la calidad ambiental y el clima de nuestras ciudades? Es posible determinar cómo se han producido estos cambios ambientales y climáticos con sensores remotos? ¿Existe relación entre la intervención del medio natural por espacios construidos y el clima urbano? ¿Cuáles son los vínculos entre la respuesta térmica de las superficies urbanas, la composición del mosaico urbano y la formación de las islas de calor urbano?

Éstas, son algunas de las interrogantes que se pretenden evaluar en este estudio. La hipótesis fundamental de trabajo, parte del supuesto de que la intervención del medio natural por las actividades urbanas, está relacionada con las modificaciones climáticas locales y en consecuencia con la formación de fenómenos como las islas térmicas urbanas. La estrategia metodológica propuesta para evaluar la respuesta térmica de las distintas superficies y materiales que integran el mosaico urbano con sensores remotos y técnicas de análisis espacial, parte del reconocimiento de la inherente complejidad del espacio urbano, determinada por el cúmulo de actividades tecno-económicas y socio-culturales presentes en él y, la incidencia de estos procesos sobre el ambiente y el clima local. La estrategia, por lo tanto, no se enfoca en un sector de la ciudad o aspecto de la problemática, sino que intenta aprovechar la posibilidad que ofrecen los sensores remotos y las imágenes satelitales, de realizar análisis integrados simultáneos para diferentes variables ambientales, urbanas y térmicas en el área urbana de la ciudad de Caracas, en el periodo comprendido desde marzo 2001 a enero 2011.

En el capítulo I se presenta una revisión del estado del arte en las investigaciones sobre islas térmicas urbanas, a modo de antecedente teórico de este estudio. Se definen y se describen, las características principales de las islas térmicas urbanas, sus diferentes tipos e instrumentos de medición y las implicaciones metodológicas de estos aspectos en el estudio. Se analiza también, la dinámica estacional del fenómeno en el espacio urbano y se presta particular atención, a los factores que influyen en su

formación, así como las relaciones de intercambio energético (*balance energético superficial*), asociadas con la formación de las islas de calor, o islas térmicas urbanas.

El capítulo II aborda el marco metodológico del estudio, en él se describe la utilidad de las técnicas geoespaciales con sensores remotos, en el análisis del fenómeno de las islas térmicas urbanas, las ventajas que representa el uso de estas técnicas frente a otros recursos convencionales de análisis, y su aplicación al caso de estudio en la ciudad de Caracas. En este capítulo se revisaran también, los beneficios de integrar sistemas de información geográfica con imágenes derivadas de sensores remotos, en la comprensión de problemas socio-ambientales complejos y dinámicos, como el comportamiento térmico del mosaico urbano, asociado no sólo a las propiedades físico-naturales de las superficies, sino también a los procesos socio-culturales y tecno-económicos que se verifican en el área urbana de la ciudad de Caracas.

Se describirán así mismo, los procedimientos de análisis térmico del mosaico urbano, de la cobertura vegetal y los usos del suelo en el área urbana de la ciudad de Caracas, a partir de las imágenes LANDSAT 7 ETM+ *p004-r053* seleccionadas, para el periodo 2001-2011. Se describen también las etapas del procesamiento satelital de la imagen, para lo cual se trabajará con *ERDAS 9.1* en la restitución y composición de los subconjuntos de imágenes, así como para la creación de los subconjuntos de imágenes (*subset*) con la banda térmica, espectro visible y ajuste radiométrico, atmosférico y geométrico. Se realizó con *Arc-GIS 9.2*, la transformación de los valores digitales de reflectancia de los píxeles o número digital (*Digital Number-DN*)

a temperatura radiante o temperatura de brillo para las bandas térmicas (6-1, 6-2) y su posterior corrección a temperatura de superficie. También se desarrollaron, clasificación de usos e índice de vegetación-*NDVI*, con *ERDAS 9.1* y *ArcGis 9.2*. El procesamiento geográfico para las ventanas de mapeo y cartografiado final, se realizó con *Arc-Gis 9.2*.

En el capítulo III de este trabajo se presenta el análisis y la discusión de los resultados de esta investigación. Se analizan los patrones térmicos superficiales observados por cuadrantes urbanos, así como los cambios estacionales y la influencia del relieve, la vegetación y los fenómenos locales de circulación del aire, en la dinámica de la isla térmica superficial. Se describen las áreas críticas en la ciudad, en términos de su comportamiento térmico, relacionando estos resultados con la densidad del espacio construido y la mayor o menor presencia de vegetación. Se presentan también, ventanas de análisis de sectores seleccionados en la ciudad, haciendo énfasis en algunas repuestas consideradas anómalas, en relación con las temperaturas superficiales observadas en el entorno.

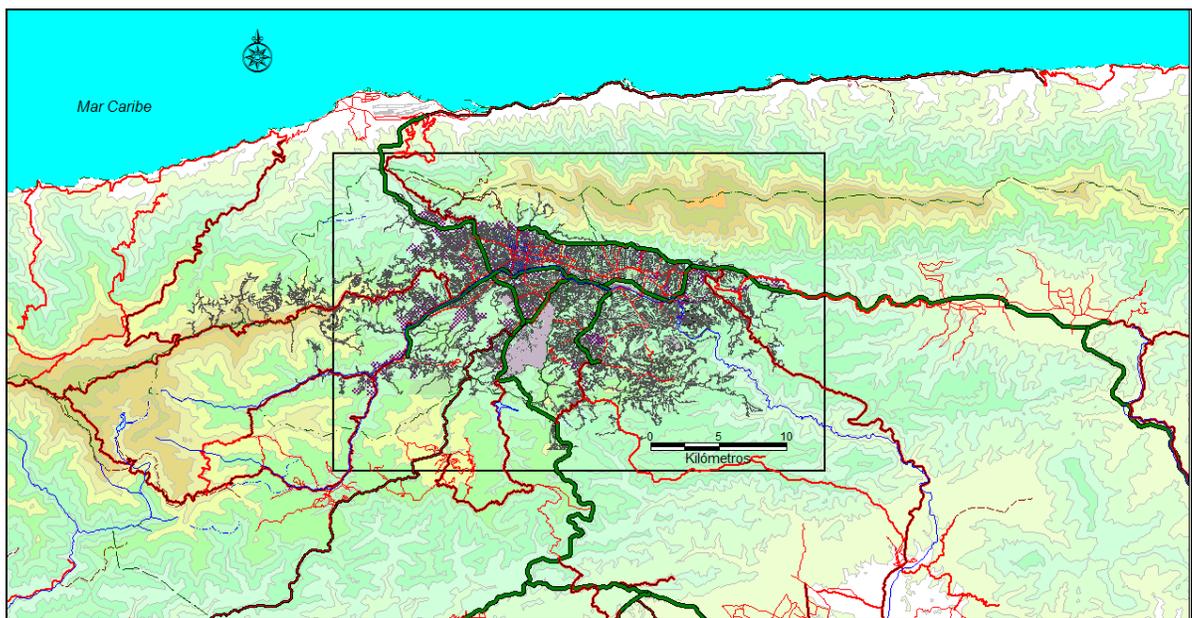
El capítulo IV aborda, a modo de recomendación, las posibles estrategias de mitigación y prevención para enfrentar el fenómeno de las islas térmicas en las áreas o sectores críticos de la ciudad, de acuerdo a la caracterización espacial térmica de las superficies urbanas. Se proponen estrategias verdes y estrategias reflectivas, para mejorar las respuestas térmicas observadas y estrategias de monitoreo y prevención frente a los eventos hidroclimáticos, asociados a la variabilidad y el cambio climático.

Finalmente, se exponen las conclusiones generales de esta investigación y se reflexiona sobre las contribuciones del trabajo en los estudios urbanos y en las evaluaciones de la calidad ambiental en las ciudades.

1.-Área de Estudio.

El área de estudio de este trabajo corresponde al espacio urbano de la ciudad de Caracas, localizado entre las coordenadas $66^{\circ} 70'02''$ y $67^{\circ} 09'98''$ con $10^{\circ} 55' 01''$ y $10^{\circ} 35' 01''$ (Figura 1).

Figura 1. Localización Área de Estudio.



Fuente: Bases cartográficas IGSBV, elaboración propia.

Los cortes de las imágenes satelitales seleccionadas en el estudio, para generar los subconjuntos de imágenes o *sub-sets* de trabajo fueron generados ajustándose a estos

límites. Se consideró necesario no solo incluir al área urbana interna de mayor densidad constructiva correspondiente a los fondos de valles y colinas interiores, sino también el área periurbana, para poder visualizar el gradiente térmico entre las áreas urbanas y las zonas periurbanas o rurales, de acuerdo a la premisa de formación de la isla térmica urbana, como se apreciara en el capítulo I de este trabajo.

2.-Objetivos Generales de la investigación.

El Objetivo general de esta investigación, tal como se expresa en el título del trabajo, es investigar la dinámica e intensidad del fenómeno de isla de calor urbana (ICU) o isla térmica urbana, el impacto sobre el ambiente urbano de estos fenómenos y las alternativas de prevención y mitigación adaptables en ciudades de clima tropical, como el caso del área urbana de Caracas.

3.-Objetivos Específicos.

- Identificar las condiciones climatológicas locales que favorecen la formación del fenómeno de islas térmicas en el área urbana de la ciudad de Caracas.
- Analizar la dinámica estacional y espacio-temporal de la isla térmica urbana, y su relación con la intensidad y extensión del fenómeno, en el espacio urbano de la ciudad de Caracas.

- Determinar las zonas críticas en la ciudad en base a las relaciones asociadas al uso del suelo urbano y la cobertura vegetal, con las respuestas térmicas observadas.
- Identificar las relaciones entre la intensidad y extensión del fenómeno, con la variabilidad climática, los eventos extremos y el cambio climático global.
- Dotar a los planificadores urbanos de una herramienta que permita optimizar la gestión ambiental en la ciudad.
- Proponer estrategias de prevención para evitar la intensificación del fenómeno en las áreas menos afectadas.
- Proponer estrategias de mitigación del problema en los sectores críticos identificados.

4.-Premisas básicas de investigación.

Las hipótesis básicas de esta investigación parten del supuesto de que la intervención del medio natural por las actividades urbanas, está relacionada con las modificaciones climáticas locales y en consecuencia con la formación de fenómenos como las islas térmicas urbanas y, que las propiedades físicas de los elementos presentes en las superficies y estructuras urbanas, condicionan también la respuesta térmica superficial diurna, intensificando el fenómeno de la isla térmica.

Por lo tanto es de esperarse, que los sectores urbanos que presentan mayor densidad de ocupación del espacio y menor nivel de arborización, muestren una peor respuesta

térmica, que aquellos de menor densidad constructiva y mayor presencia de vegetación y/o espacios arborizados.

La segunda premisa básica de esta investigación, supone que algunos elementos del clima intervienen modificando la intensidad y extensión del fenómeno de islas térmicas en las zonas urbanas, ya que el calentamiento superficial, depende básicamente de la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie y ésta, de las horas diarias de insolación. Por lo tanto es importante estudiar la variabilidad de los parámetros climáticos, que tienen relación tanto de forma directa como indirecta con el fenómeno de las islas térmicas urbanas, para evaluar la variabilidad estacional del fenómeno, y el periodo del año en que este pudiera presentarse con mayor intensidad y extensión, representado un riesgo para la salud de la población y la calidad ambiental y de vida en el área urbana de Caracas.

5.-Limitaciones en el desarrollo del estudio.

Las limitaciones de este trabajo se refieren a los obstáculos encontrados en el desarrollo de la investigación y las alternativas adoptadas para alcanzar las metas de investigación planteadas. Las limitaciones en este caso, se relacionan básicamente con la disponibilidad de imágenes satelitales de buena calidad, es decir con poca o baja cobertura nubosa, sin trazas de humos o de nubes estratiformes de alta reflectividad, que afectan, sobre todo las lecturas del sensor en el rango térmico del

espectro, así como a la baja resolución espacial de los sensores remotos que operan en el rango térmico.

Dado que uno de los objetivos del trabajo es analizar la dinámica del fenómeno de la isla térmica en la ciudad, respecto a la estacionalidad anual, (periodos de sequía y lluvias), resultaba importante para cada año considerado, obtener imágenes tanto de periodo seco como lluvioso. En algunos casos, en años húmedos o donde se registraron anomalías climáticas significativas, vinculadas a los efectos de la variabilidad ENOS (El Niño Oscilación Sur) como el 2005, la alta cobertura de nubes dificultó esta labor. Por ello para algunos años, las imágenes obtenidas son en su mayoría de periodo seco o de transición, bien sea sequia- lluvia y viceversa.

Otra limitación se refiere a la insuficiencia en las redes climatológicas tipo *CI* (que registran todos los parámetros climáticos) en el valle de Caracas, y a la baja frecuencia de los estudios o sondeos verticales atmosféricos. Estas circunstancias limitaban las posibilidades de desarrollar una adecuada caracterización de la isla térmica atmosférica sobre la ciudad, sobre todo por la inexistencia de datos para observar la estratificación de las capas de aire en altura, y los efectos locales que se verifican dentro de la isla de calor (Oke, 1976; 1982). Por ello se decidió estudiar la variabilidad de la isla térmica superficial con sensores remotos y apoyar estos análisis, con los registros climáticos obtenidos en la ciudad.

A pesar de estas limitaciones iniciales, al extender el horizonte temporal del estudio a una década de observaciones (2001-2011), se logro compilar un excelente archivo de

imágenes representativas de la estacionalidad y la variabilidad climática, para analizar el fenómeno de la isla térmica superficial en la ciudad.

6.- Justificación, relevancia y aportes del trabajo.

Los estudios sobre islas térmicas urbanas han adquirido una particular relevancia en la última década, debido a los crecientes impactos de la variabilidad y el cambio climático en los espacios urbanos. Las cada vez más frecuentes olas de calor se acompañan, en estos espacios, de una intensificación en la magnitud y extensión de las islas de calor urbanas, significativas anomalías térmicas superficiales y un aumento en la frecuencia de incendios de vegetación en las áreas periurbanas, que agravan el cuadro de contaminación y de degradación de la calidad ambiental y de vida en las ciudades. Los casos más recientes, la ola de calor amplificada por el efecto de la isla de calor en París durante el verano del 2003, y la ola de calor de Moscú en el verano del 2010, también intensificada por el efecto de la isla térmica, registraron además, altas tasas de morbilidad y mortalidad asociada a patologías por calor y cuadros cardio-respiratorios (OMM, 2004; 2011).

A pesar del creciente nivel de riesgo que para la población radicada en las ciudades supone el impacto de estos fenómenos en todo el planeta, la mayor parte de los estudios realizados sobre la dinámica de las islas térmicas urbanas, han sido desarrollados fundamentalmente en ciudades de países subtropicales, principalmente en Europa, Canadá y Estados Unidos. Adicionalmente estos estudios se centran, en

su mayoría, en los aspectos técnicos de la metodología, y no sobre las variables socio-ambientales relacionadas con la problemática de la isla de calor urbano, que constituye uno de los aportes fundamentales de este trabajo: analizar las condiciones socio-ambientales relacionadas con la evolución del desarrollo urbano, y que se asocian con las diferencias en los patrones térmicos superficiales observados en la ciudad.

Otra de las contribuciones de este trabajo fue no solo evaluar y replicar experiencias sobre los métodos de cuantificación de las islas térmicas superficiales con sensores remotos, esfuerzo de investigación sin precedente a nivel nacional, sino también desarrollar una herramienta de utilidad para planificadores urbanos, integrando los análisis térmicos desarrollados a partir de la banda térmica de satélites geoestacionarios de observación terrestre, en un sistema de información geográfica-*SIG*, que permitiera darle utilidad y valor a las informaciones térmicas obtenidas, a los efectos del desarrollo de las estrategias de mitigación y prevención.

Las correcciones geométricas realizadas, permiten el ajuste de la imagen al formato de proyección geográfica de las capas vectoriales, con informaciones sobre límites político-administrativos, vialidad, topografía, etc., esenciales para poder identificar sectores y elementos del espacio urbano, asociados a las respuestas térmicas más críticas. La mayoría de los trabajos realizados con sensores remotos se limitan a procesar la imagen térmica y a trabajar con escalas de resolución espaciales muy bajas (1:250.000), poco apropiadas para entender fenómenos locales como la isla de

calor urbano, estrechamente relacionada a las características de las superficies urbanas y al clima local derivado de estas interacciones.

En este caso combinando técnicas de re-muestreo de la imagen para aumentar su resolución espacial y de corrección geométrica integradas en un SIG, se pudieron lograr acercamientos que nos permitieron identificar el comportamiento térmico de estructuras y elementos del espacio urbano, con la finalidad de orientar mejor las estrategias de prevención y mitigación en la ciudad.

Otra contribución importante se deriva del horizonte temporal del estudio, (la primera década del 2000) lo que hace posible visualizar la dinámica estacional y los efectos de la variabilidad (ENSO) y el cambio climático sobre el fenómeno de isla térmica superficial en la ciudad. La escogencia de este periodo se debe a que de acuerdo a la Organización Mundial de Meteorología-OMM, la primera década del 2001-2010, es también la más cálida de la que se tiene registro, siendo el año 2010, uno de los años más cálidos desde 1998 (OMM, 2010; 2011), por lo que es de esperarse una intensificación en la frecuencia de eventos climáticos extremos como las olas de calor y severas sequías (que se intensifican por los efectos de la isla de calor en la ciudad), como las anomalías térmicas ocurridas durante el mes de Marzo del 2010, con fuertes impactos sobre la población y el ambiente, reportados en la ciudad de Caracas (Córdova, 2011b).

Las contribuciones finales de este trabajo se refieren a la proposición de estrategias preventivas, en donde se destaca el papel de las comunidades en el rescate y

conservación de las áreas verdes urbanas y peri-urbanas, fundamentales para aminorar los efectos de la isla de calor, combinadas con técnicas de mitigación verdes y reflectivas, que se describen en la parte final del trabajo, mostrando las ventajas y desventajas de las técnicas y las barreras a su implementación, en base a entrevistas realizadas a consejos comunales y juntas de condominio en el sector de Montalbán.

Capítulo I. Marco Teórico-conceptual. Antecedentes y conceptos básicos.

Para contextualizar el estudio de las islas térmicas urbanas, en este capítulo se abordara primeramente, una revisión de las investigaciones en la temática de las islas térmicas urbanas, a manera de antecedente teórico, para luego entrar en el análisis de los conceptos fundamentales que se relacionan con el clima, el espacio construido y la alteración del balance radiativo superficial, que constituye una de las causas fundamentales de la formación de las islas de calor urbano.

1.1- El estado del arte en las investigaciones sobre islas térmicas urbanas: Antecedentes de investigación.

La mayoría de las investigaciones sobre el fenómeno de las islas térmicas urbanas, se han realizado en países de latitudes subtropicales, como Estados Unidos, Canadá, e

Inglaterra, y en países de la comunidad europea como España, Francia, Portugal entre otros. Solo en la última década, han comenzado a surgir trabajos sobre ciudades de latitud tropical en el ámbito latinoamericano, como México, Brasil, Venezuela, y a nivel global en China, Vietnam, e India. Las investigaciones sobre el clima urbano y el fenómeno de islas térmicas urbanas pueden dividirse en varias etapas o enfoques. La metodología de análisis en los primeros trabajos publicados en ciudades de latitudes subtropicales sobre la temática, se basa más en el modelaje climático de la isla térmica atmosférica, con base a informaciones colectadas por instrumental hidrometeorológico y modelos teóricos sobre balance radiativo superficial en las áreas urbanas, destacan en esta línea de investigación los aportes de Tim Oke, -*American Meteorological Society*, (1976; 1982). Sus investigaciones sobre la estructura de la capa límite (1976), es decir la estructura del domo urbano de calor y las bases energéticas de la isla urbana de calor (Oke, T, 1982; 1987; 1988) que se detallan en el capítulo I de este trabajo, constituyen uno de los estudios más importantes sobre la temática. En su trabajo sobre las bases energéticas de la isla urbana de calor- ICU Oke, describe la naturaleza de este fenómeno y discute sobre su estructura vertical en las zonas urbanas, estableciendo diferencias entre la respuesta térmica observada y la estructura de la capa límite en espacios rurales y urbanos (Oke, 1982). Estos aportes se amplían en el trabajo *Guía para Obtener Representatividad Meteorológica en las Zonas Urbanas*, donde se detallan otros aspectos relativos al dosel urbano y su

influencia en el fenómeno de isla térmica, publicada por la Organización Mundial de Meteorología-OMM (Oke, 2006).

Las investigaciones sobre la isla térmica superficial, que constituye la línea temática de este trabajo de investigación, son en cambio más recientes. Uno de los primeros estudios publicados en 1989 en la *University of British Columbia* (Roth, M., Oke T.R. and Emery, W.J., 1989), incorpora ya el uso de sensores remotos, para derivar la temperatura superficial y caracterizar la isla térmica urbana en ciudades costeras. El grupo de la NESDIS-NOAA (*National Environmental Satellite, Data, and Information Service- National Oceanic and Atmospheric Administration-USA*) publica las aplicaciones del sensor AVHRR- NOAA y LANDSAT MSS en el estudio de las islas térmicas urbanas (Gallo et al. 1993; Gallo et al. 1996). Quattrochi y Luvall del Project ATLANTA-USA (*Atlanta Land-use Analysis: Temperature and Air-quality*) también desarrollaron varios estudios sobre aplicaciones de los sensores remotos en la caracterización de la isla térmica urbana de la ciudad de Atlanta, utilizando LANDSAT MSS y TM (Lo, C.P., Quattrochi, and J.C. Luvall, 1997).

En una línea temática similar, pero incorporando análisis anisotrópicos urbanos (Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1997, 1998a, b), Voogt and Oke publicaron varios estudios que relacionan la influencia de la morfología y el dosel urbano en la circulación y la intensidad de la isla térmica. Posteriormente en el año 2003 (Voogt, J.A. and Oke, T.R. 2003) publicaron también un trabajo que se convirtió en referencia obligada en los trabajos sobre islas térmicas urbanas, al evaluar el estado del arte y la

evolución de las investigaciones sobre el fenómeno de las islas térmicas tanto superficiales como atmosféricas (Voogt, J.A. and Oke, T.R. 2003) .

La línea temática sobre mitigación, es también abundante en literatura. Uno de los grupos de trabajo más importantes en esta área, es el del laboratorio de Berkeley (*Lawrence Berkeley National Laboratory- Berkeley, California*) y su grupo de expertos sobre la isla térmica. Este grupo de científicos se especializo en evaluar propuestas de mitigación, mediante la modificación de las propiedades físicas de techos y pavimentos aumentando la reflectividad para disminuir la demanda energética en edificaciones por climatización artificial (Pomerantz. M., Akbari. H., Verdal. P., Konopacki. S. J., and Taha. H. 1999; Akbari, H. 2005). La agencia estatal de protección ambiental (EPA-*Environmental Protection Agency*), desarrollo también un portal web (<http://www.epa.gov/heatisld/index.htm>) con valiosa información y publicaciones científicas sobre el fenómeno de las islas térmicas, abarcando desde la información básica hasta los impactos y estrategias de mitigación (EPA, 2008).

Otra área importante de investigación sobre el tema de las islas térmicas urbanas, aborda los problemas de calibración y corrección radiométrica y atmosférica de la data colectada por la banda térmica de sensores como AVHRR, MODIS, ASTER y la serie LANDSAT TM y ETM. Se discute la efectividad de diversos procesos de corrección a partir del desarrollo de algoritmos para los diferentes sensores. En esta línea temática destacan los aportes de los trabajos de Caselles y Sobrino (1992) y

Valor y Caselles (1996). En esta misma línea de investigación se abordan también los métodos de estimación de la temperatura superficial, como el método de estimación *monocanal*, que se refiere a la utilización de la banda térmica del sensor (*Thermal infrared-TIR*) para derivar la temperatura superficial (T_s) a partir de la temperatura de brillo (T_b). En esta línea destacan los aportes de Schott & Volchok (1985). Otros estudios que utilizan este método de estimación para derivar la temperatura a partir de la data colectada por la banda térmica del sensor LANDSAT ETM+ en modo de alta resolución (*6-2 high gain*), son los trabajos de Qin *et al.*, (2001); Weng *et al.*, (2006) y Barsi *et al.*, (2003). Estos aspectos serán ampliados en el Capítulo II de este trabajo.

En Venezuela no existen antecedentes de estudios publicados sobre el fenómeno de la *isla de calor urbano- ICU o isla térmica urbana-ITU* con sensores remotos, con excepción de los trabajos recientemente publicados por el autor (Córdova, 2011 a, b), sobre los avances de investigación de la tesis doctoral en el caso de Caracas. Las líneas de investigación desarrolladas en el país, se orientan más hacia la arquitectura y el urbanismo bioclimático, temas estos que se vinculan a esta investigación, en el abordaje de las estrategias de mitigación. En esta línea de investigación sobre confort térmico, eficiencia energética y arquitectura bioclimática, destacan los aportes del grupo de investigación del Instituto de la Construcción- IDEC de la Universidad

Central de Venezuela-UCV¹, así como también del Grupo del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia-IFAD-ARQ-LUZ². El grupo sobre vida urbana y ambiente-VUA de la Universidad Simón Bolívar-USB³, orienta sus investigaciones sobre el tema del desarrollo sostenible de las ciudades, gestión ambiental urbana, educación y políticas públicas, que se relacionan con esta investigación, en el estudio de las variables ambientales y su impacto sobre la calidad de vida en las ciudades. El grupo de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de los Andes-ULA- Mérida, está más orientado hacia la investigación en vivienda rural.

1.2.-El Clima y Espacio construido: El clima urbano.

Dado a que el espacio construido modifica las condiciones climáticas, determinando la dinámica del clima sobre los espacios urbanos, partiremos en esta sección del concepto general del clima y sus elementos modificadores, para aproximarnos a la comprensión del clima urbano, como la resultante de las interacciones que se verifican entre las superficies construidas (como elementos modificadores) y la

¹ <http://www.fau.ucv.ve/idec/paginas/publicaciones.html>

² <http://www.arg.luz.ve/>

³ <http://www.vua.grupos.usb.ve/resena.html>

atmósfera urbana, y que alteran el balance radiativo superficial ⁴, originando las islas térmicas urbanas.

Entendemos por clima entonces, a las oscilaciones promedio de ciertos parámetros como la temperatura, precipitación, radiación, humedad, sobre un determinado territorio, región o lugar (Gómez-Echeverri, 2002). El clima de la tierra está fundamentalmente controlado por un equilibrio a largo plazo entre la energía de la tierra y la de su atmósfera. La radiación de onda corta que proviene del sol en forma de luz visible, es absorbida por la atmósfera y la superficie terrestre, una parte de esta energía es utilizada en los procesos climáticos fundamentales como el ciclo hidrológico, las corrientes marinas y, vientos y luego re-emitida al espacio en forma de radiación de onda larga, infrarroja o calor. De este intercambio fundamental de energía regulado por la atmósfera terrestre dependen los procesos climáticos (Gómez-Echeverri, 2002).

Existen sin embargo elementos modificadores del clima que a nivel local y regional, pueden inducir cambios en los patrones climáticos, y determinar regímenes climáticos locales. Estos elementos son: la latitud, la altitud, la orientación del relieve, la continentalidad y la proximidad a cuerpos o masas de agua. (Ritter, 2009)

La latitud determina la inclinación con la que caen los rayos solares sobre la superficie, cuanto más directa es la radiación incidente, mayor es el calentamiento

⁴ Es el intercambio de energía y calor entre las superficies terrestres y la atmósfera. Depende de las propiedades físicas de estas superficies, y de la cantidad de energía radiante recibida y re-emitida como reflexión (radiación de onda corta-albedo) o irradiación (radiación de onda larga-calor).

superficial, en consecuencia, las regiones ecuatoriales del planeta, reciben mayor cantidad de energía durante todo el año, ya que los rayos solares inciden perpendicularmente sobre estas regiones (Ritter, 2009).

La altitud determina la formación de un gradiente alto-térmico que varía $-0,65^{\circ}\text{C}$ por cada 100 mts, el relieve modifica también la insolación y los vientos, afectando la formación de nubes, la distribución de las lluvias, y la conservación de la humedad.

La continentalidad y la cercanía a cuerpos o masas de agua, también afectan los patrones de circulación y las lluvias, todos estos factores deben ser tomados en consideración en el análisis e interpretación de fenómenos o patrones climáticos, además de otros factores como el desarrollo urbano, la explotación mineral, las actividades agrícolas, etc., que afectan las condiciones ambientales locales alterando el balance radiativo superficial y, en consecuencia, la respuesta térmica en estas localidades.

El estudio del clima requiere, por tanto, extensos registros (mínimo 30 años) de las variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad, vientos, radiación, insolación, nubosidad, evaporación, etc.) que nos permitan observar en el corto, mediano y largo plazo, las variaciones del clima, sus ciclos, estacionalidad, eventos extremos, y tendencias. Estos registros forman parte del acervo documental del clima de una región, de un país o de una localidad, y constituyen, conjuntamente con otras técnicas modernas de análisis como los satélites meteorológicos y los satélites de observación terrestre, instrumentos que nos permiten reconstruir, y analizar procesos

ambientales y climáticos, como el estudio del clima urbano o de la formación de las islas térmicas o islas de calor urbano.

El clima sobre las áreas urbanas es fundamentalmente un fenómeno local, que resulta de la interacción de las capas bajas atmosféricas con las superficies urbanas recubiertas por coberturas artificiales e impermeables (concreto, asfalto, piedra, materiales metálicos, vidrio, cerámicos, etc.) asociadas a los elementos típicos de la infraestructura urbana y que sustituyen a la vegetación y al paisaje natural. (Landsberg, 1981)

Estas superficies, al igual que el resto de los elementos naturales presentes en las áreas urbanas, están expuestas a la insolación, a la radiación, al calentamiento diurno, la precipitación y la humedad. La respuesta térmica de estas coberturas, dependerá fundamentalmente de las características físicas o propiedades térmicas de estos materiales de construcción: absorptividad, reflectividad, trasmisividad. (Sosa *et al.*, 2004). Las ganancias de calor por radiación solar, tienen mayor impacto en las superficies perpendiculares a los rayos del sol, es decir en los techos y las paredes este y oeste durante todo el año en las regiones tropicales, y en la pared sur en los meses del invierno boreal en las regiones subtropicales (noviembre, diciembre, enero) (Sosa, *et al.*, 2004).

Los sensores remotos que recogen información en el espectro del infrarrojo termal (LANDSAT 4, 5, 7, MODIS, AVHRR, ASTER), leen la temperatura de estas superficies expuestas a la mayor radiación solar incidente, y la reflejan en forma de

temperatura radiante⁵. Mediante un proceso de conversión o álgebra de imágenes (*Image algebra*), esta temperatura es corregida y transformada de temperatura radiante o de brillo expresada en grados kelvin, ° K a temperatura superficial en grados centígrados, °C gracias a lo cual pueden realizarse mapas térmicos de las superficies urbanas, o de cualquier otra superficie de análisis escogida (Tran Thi Van, Le Van Trung, 2009).

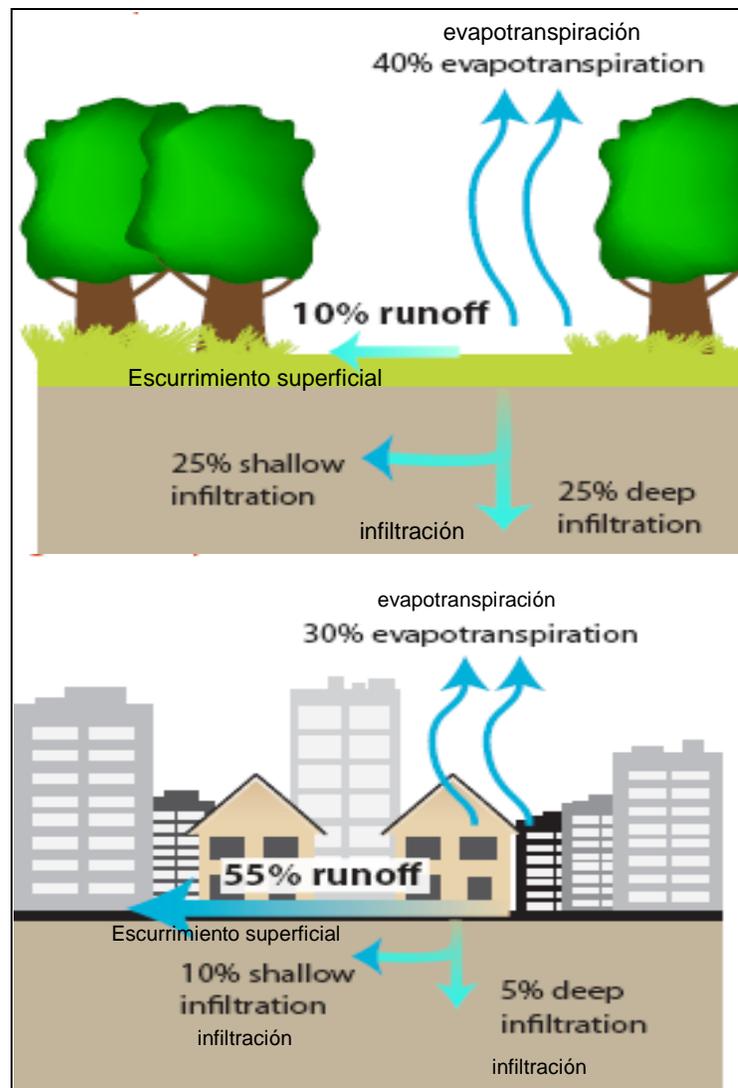
A mayor superficie construida, mayor es entonces la alteración de los parámetros climáticos que contribuyen a regular el clima local, ya que disminuyen los aportes de humedad por evapotranspiración vegetal y la sombra de la vegetación, aumentando el impacto de la radiación solar incidente y en consecuencia, el calentamiento superficial diurno, así como la emisividad de calor durante las primeras horas nocturnas, como se muestra a manera de ejemplo en la Figura 2 (Oke, 1982; EPA, 2008).

Las superficies impermeables características de los espacios urbanos (*carpetas asfálticas, superficies recubiertas en concreto y otros materiales urbanos de construcción*) no solo modifican las temperaturas superficiales incrementando las temperaturas diurnas (calentamiento) y nocturnas (emisividad) (Oke, 1982), sino que aumentan también el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, alterando

⁵ Es la temperatura reflejada por las superficies. Depende de la cantidad de energía que recibe y puede absorber una superficie o un objeto, y está relacionada con las propiedades físicas de los cuerpos como la porosidad, la reflectancia, el albedo, la conductividad, etc.

los patrones de infiltración profunda y modificando, en consecuencia, el balance hídrico superficial en las áreas urbanas (Gholami *et al.*, 2012; Figura 2).

Figura 2. Causas de la formación de la isla de calor urbano.



Fuente: Urban Heat Island Basics, 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, U.S. EPA.

Estas condiciones anteriormente descritas, determinan diferencias de temperatura entre las áreas urbanas densamente construidas y su entorno peri-urbano o rural, a

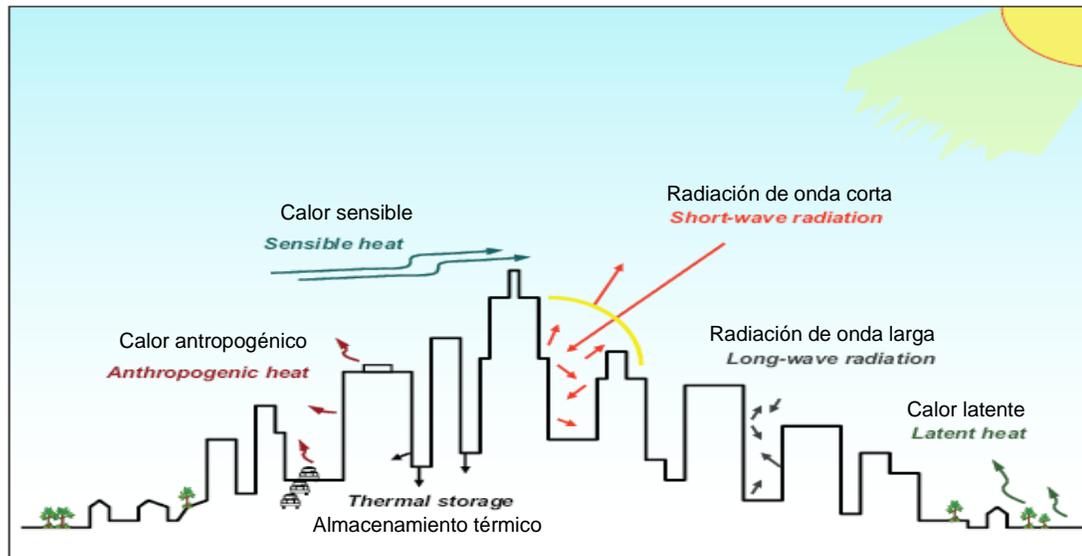
esta diferencia, o gradiente térmico entre las áreas urbanas y la zona peri-urbana, se denomina islas térmicas urbanas- ITU o islas urbanas de calor –ICU (EPA, 2008).

1.3.-Conceptos básicos sobre las islas urbanas de calor o islas térmicas urbanas.

El concepto de las islas urbanas de calor o islas térmicas urbanas, se asocia también, a la formación de una cúpula o domo de calor sobre los espacios urbanos, como consecuencia de la alteración del balance radiativo superficial, derivado de la intervención y modificación de las coberturas naturales por infraestructura, edificaciones y otros elementos típicos de las áreas urbanas, así como de las emisiones de calor antropogénico, fundamentalmente derivadas de la combustión automotor (Oke, 1982; 1988; Figura 3).

El balance radiativo superficial urbano (Figura 3), se refiere al intercambio de energía y calor, entre la atmósfera y la superficie urbana y depende de la radiación solar incidente en forma de energía lumínica o radiación de onda corta, de la estructura y dinámica de la atmósfera en las áreas urbanas y de las características físicas de los cuerpos u objetos que se encuentran en la superficie (Oke, 1988; Figura 3).

Figura 3. Balance Radiativo Superficial Urbano



Fuente: Urban Heat Island Basics, 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, U.S. EPA.

Ello determina la reflectancia o albedo, la capacidad de almacenamiento y la re-emisión de la energía a la atmósfera en forma de calor o radiación de onda larga (EPA, 2008; Figura 3).

El albedo, es entonces un importante componente del balance radiativo superficial, y se refiere al porcentaje de radiación (onda corta) que una superficie refleja del total de la energía que incide sobre ella, bien sea esta natural o artificial. En el espacio urbano los valores de albedo de las superficies son variables, como lo muestra la Figura 4.

La radiación incidente⁶, es otro de los parámetros climáticos que modifica el balance radiativo superficial (Figura 3). Es mayor en los meses de verano y menor en los meses de invierno para las latitudes subtropicales y mayor en el periodo de sequía y menor en el periodo lluvioso, en las latitudes tropicales (Ritter, 2009).

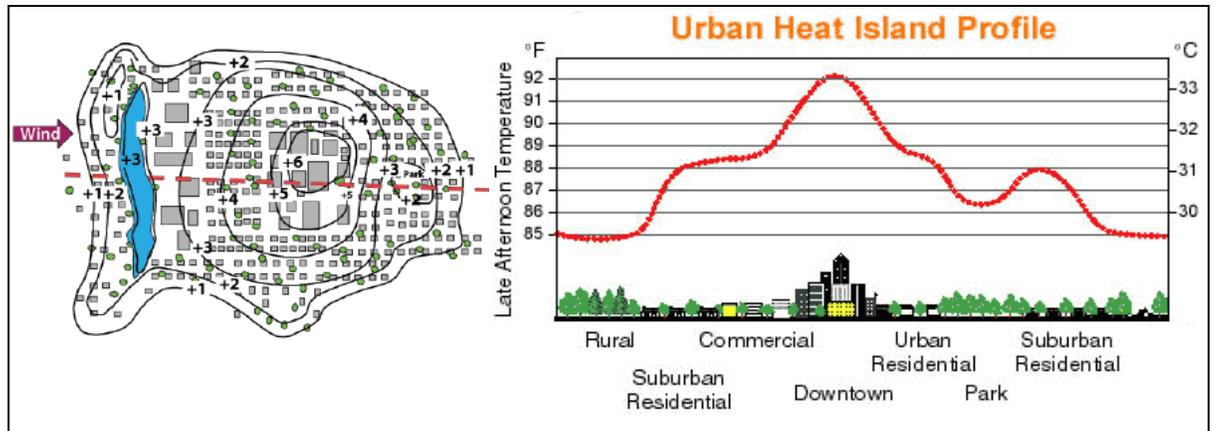
En consecuencia, el mayor calentamiento superficial se presentara durante los meses o periodos de mayor radiación solar incidente, por lo que resulta fundamental considerar estas características climatológicas locales, para comprender la formación y dinámica, de las islas térmicas urbanas.

1.3.1.- Definición y tipos. Implicaciones metodológicas en el estudio.

El patrón espacial clásico de la isla térmica urbana es concéntrico (EPA, 2008), o en forma de cúpula o domo si observáramos una sección transversal de la ciudad, con más altas temperaturas en las áreas más céntricas o densamente construidas, que descienden progresivamente hacia la periferia (Figura N°5).

⁶ Es la cantidad de energía radiante que recibe una superficie, o un objeto. Depende de una fuente lumínica o radiante, como la energía solar y se mide en unidades calóricas como calorías o joule, por unidad de superficie.

Figura 5. Perfil Urbano de la Isla de Calor.

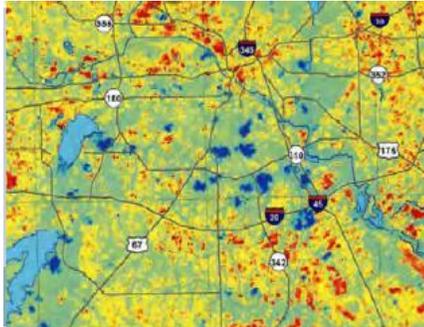
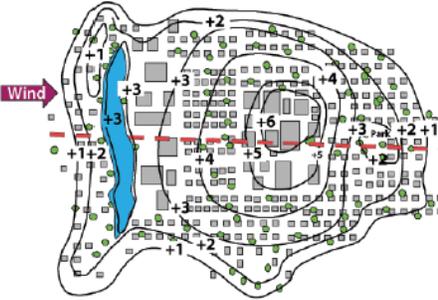


Fuente: Urban Heat Island Basics, 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, U.S. EPA.

En los estudios sobre el fenómeno de las islas térmicas urbanas, se reconocen fundamentalmente dos formas de manifestación espacial y ambiental del fenómeno de las islas térmicas urbanas: la isla térmica superficial y la isla térmica atmosférica. Aunque en realidad, ambas son dos componentes de una misma unidad, que interactúan para formar este fenómeno climático local (Tabla N.º 1; Oke, 1988).

En el caso de la isla térmica superficial, esta se refiere a la presencia de temperaturas superficiales mayores en las zonas urbanas, en comparación con las zonas periurbanas o rurales. La herramienta fundamental de detección y análisis de estas islas de calor superficiales, son las imágenes térmicas y presentan mayor variabilidad diurna (Tabla N.º 1).

Tabla 1. Características de las Islas Térmicas.

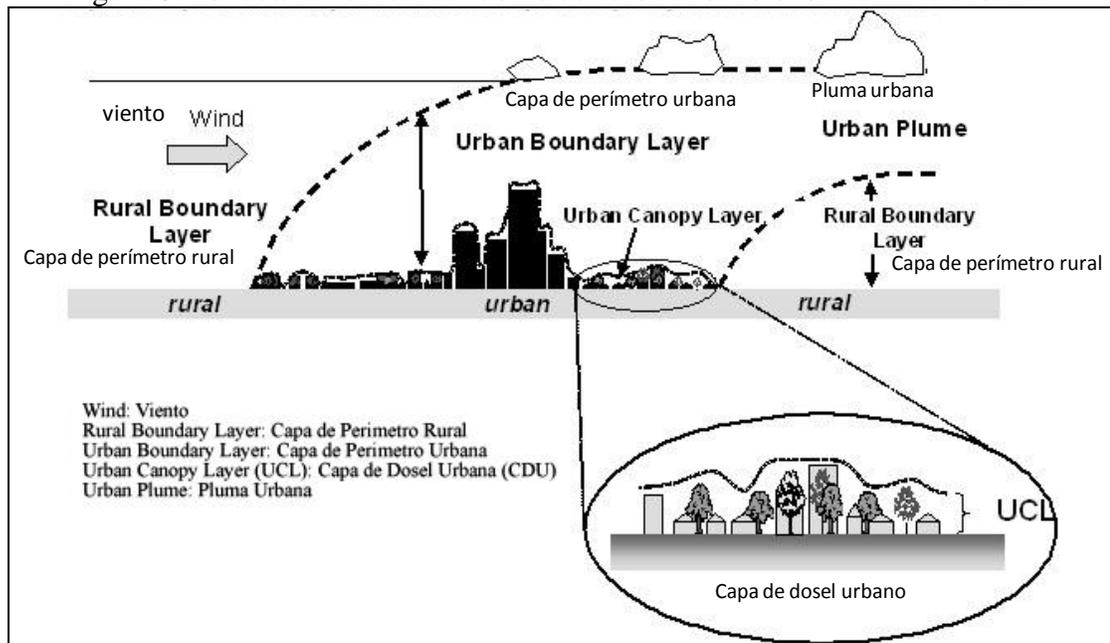
Características	Isla de calor superficial	Isla de calor atmosférica
Frecuencia.	Presente todo el tiempo, durante el día y la noche. Más intensa durante el día y en verano.	De menor magnitud o ausente durante el día según la estación. Más intensa en la noche o al atardecer y en invierno.
Intensidad pico (mayor intensidad de la ICU)	Mayor variación espacial y temporal. Día: 10 a 15 °C Noche: 5 a 10 °C	Menor variación espacial pero mayor variación entre el día y la noche. Día: -1 a 3 °C Noche: 7 a 12 °C
Método de identificación	Mediciones indirectas usando sensores remotos.	Mediciones directas utilizando estaciones climatológicas o instrumentos móviles de medición.
Representación típica	Imagen térmica. 	Mapas de isotermas o gráficos de temperatura. 

Fuente: Urban Heat Island Basics, 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, U.S. EPA, elaboración propia.

En el caso de la isla térmica atmosférica se refiere a la presencia de aires más cálidos sobre las áreas urbanas, en comparación con las zonas peri-urbanas o rurales. Se representa mediante isotermas en mapas y gráficos, para lo cual es fundamental

contar con estadísticas climáticas y una buena cobertura espacial de las redes meteorológicas urbanas, para registrar y monitorear estos eventos climáticos, presenta mayor intensidad nocturna que diurna (Tabla N° 1).

Figura 6. Estructura vertical del domo de calor urbano o isla térmica urbana.



Fuente: Soux, A., Voogt, J.A. and T.R. Oke, (2004).

La atmósfera dentro de este domo o isla térmica atmosférica, no es homogénea (Figura.6) y presenta además una dinámica particular, pudiendo identificarse fenómenos de turbulencia asociados a la perturbación en el flujo de los vientos por las edificaciones, disminución de la visibilidad u opacidad atmosférica por la presencia de abundante material particulado en suspensión, sobre todo durante los meses de sequía o verano, así como aumento de la retención de calor por las emisiones de gases

de efecto invernadero, principalmente CO₂, producto de la combustión automotor y otras actividades en las áreas urbanas (Oke, 1987).

Dentro de este domo de calor o isla térmica urbana (*Urban boundary layer*), es posible identificar 3 zonas o capas de aire (Figura 7):

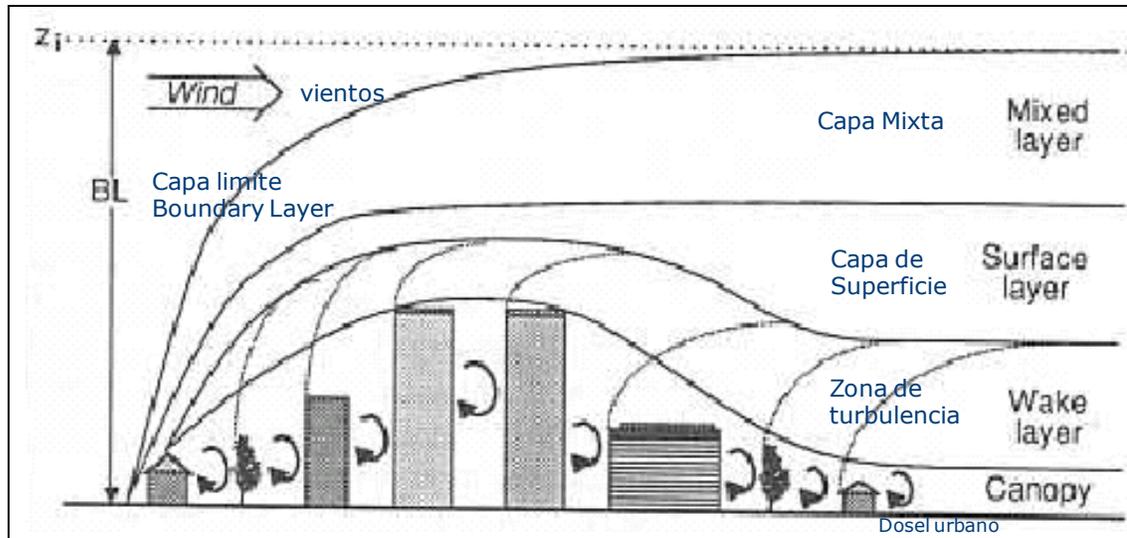
1.- La zona de turbulencia (*Wake layer*) representada por las capas más bajas del aire en contacto directo con el dosel urbano (*Canopy*), donde se registra un mayor aumento en la temperatura y en la turbulencia del aire, debido a la intensificación del calentamiento superficial diurno

2.- Una zona intermedia o capa de superficie (*surface layer*) también afectada por la turbulencia local y las emisiones de calor antropogénicas y,

3.- La capa mixta (*Mixed layer*), que representa el límite superior del domo de calor, coincidente con el límite o línea base de formación de las nubes.

Esta estratificación ocurre dentro de la capa límite (*boundary layer*), que representa la altura o amplitud atmosférica vertical del domo de calor, esta región se extiende en promedio 1,5 Km. desde el suelo o nivel base de la localidad considerada (Oke, 1987; Figura.7).

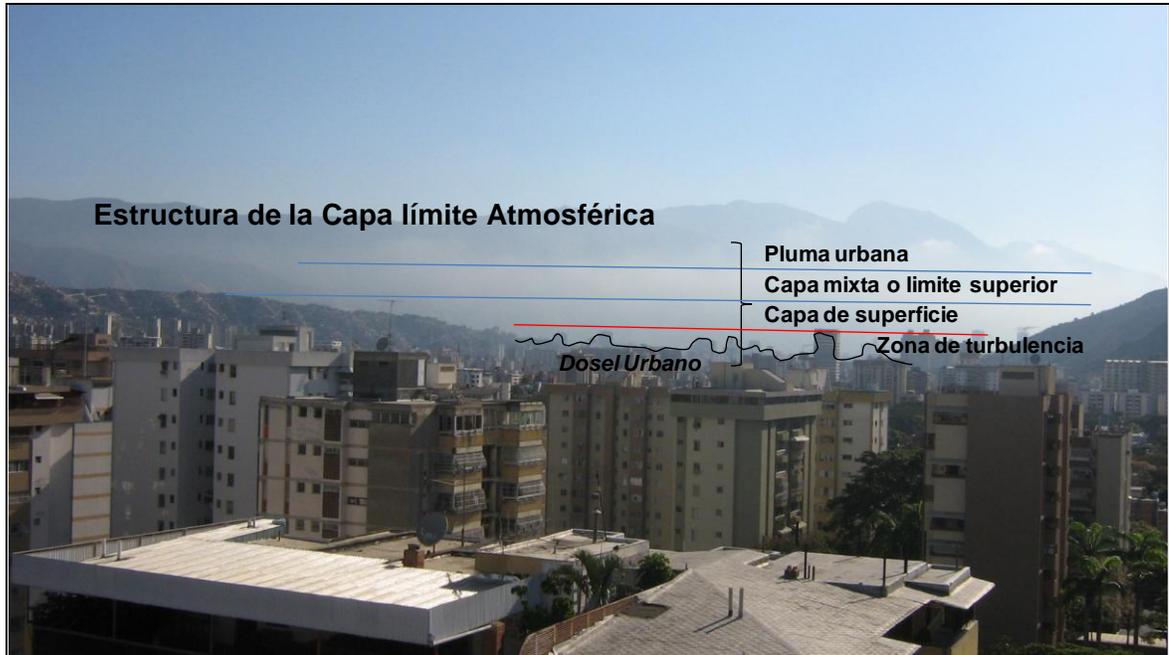
Figura 7. Representación esquemática de los principales componentes de la atmosfera urbana.



Fuente: Oke, 1987.

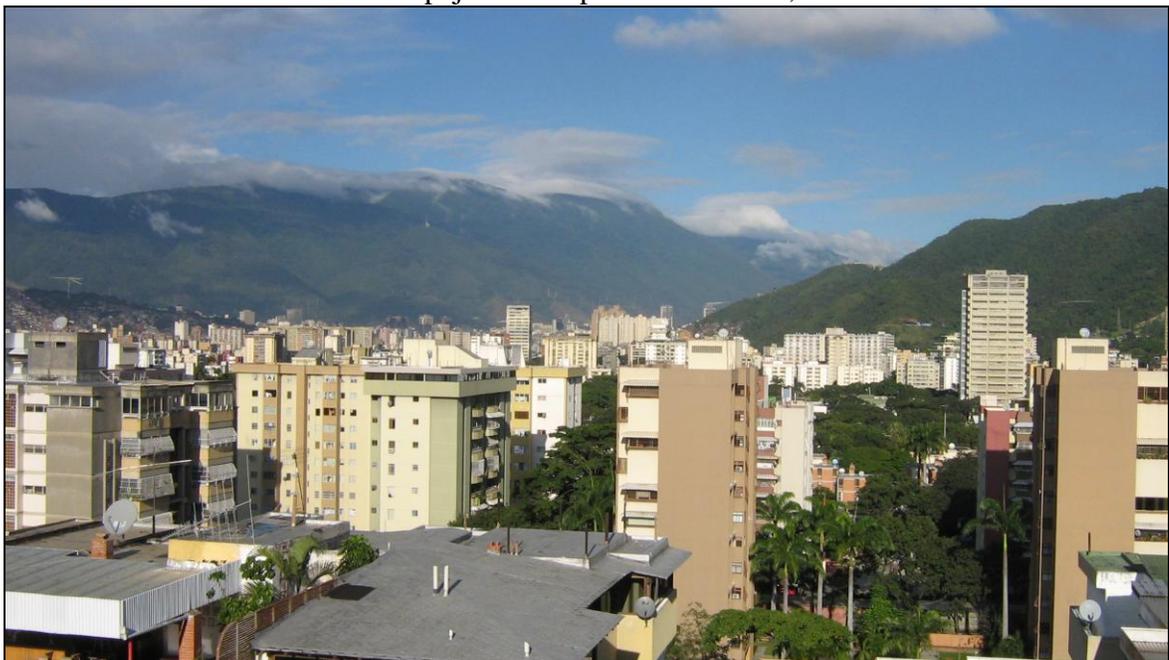
En el caso de ciudades como Caracas emplazada en un valle alto de montaña, la dinámica de la capa límite se ve influenciada por los fenómenos de circulación local, *montaña-valle* y *valle-montaña*, produciéndose variaciones diurnas en la extensión e intensidad de la capa límite o domo de calor, así como variaciones estacionales, más intensa durante los meses de sequía o verano y menos intensa durante los meses de lluvia o invierno (Fotos N° 1 y 2). Registros fotográficos tomados para el valle de Caracas, muestran la estructura y variabilidad diaria de la capa límite (Fotos N° 1 y 2).

Foto 1. Estructura de la capa límite Atmosférica sobre el área urbana de Caracas, Noviembre, 2008.



Fuente: K, Córdova, 2008. Colección personal imágenes valle de Caracas.

Foto 2. Caracas. Cielos despejados después de la lluvia, Noviembre 2008.



Fuente: K, Córdova, 2008. Colección personal imágenes valle de Caracas.

Para analizar mejor la extensión vertical y la dinámica de este domo de calor o isla térmica atmosférica, es necesario contar con sondeos verticales de la atmosfera⁷, lamentablemente los sondeos en el Valle de Caracas no se realizan con la frecuencia que requeriría un estudio de esta naturaleza.

Adicionalmente, para el análisis de la variabilidad espacial de los parámetros climáticos en el valle de Caracas (elaboración de mapas de isolíneas), se requeriría contar con una mejor cobertura en la red de estaciones climatológicas tipo *CI*, que registran, además de la precipitación, otros parámetros climáticos relevantes para este tipo de estudio, como la temperatura, humedad, insolación, radiación, nubosidad, presión, vientos, etc.

Estudios recientes sobre diseño de redes climatológicas en áreas urbanas, para analizar la dinámica y estructura atmosférica de las islas de calor urbano (Oke, 2006), recomiendan densificar las redes urbanas, tomando en consideración la rugosidad o irregularidad del dosel urbano en el diseño y localización de las redes, dado a que el desarrollo urbano, altera los parámetros climáticos generando efectos locales, como corrientes de vientos, turbulencias, reflejos y sombras de edificaciones, irradiación de calor debido inercia térmica de los materiales de construcción o calor antropogénico por combustión (Davenport *et al.*, 2000; Oke, 2004). En consecuencia, se

⁷ Los sondeos verticales son perfiles atmosféricos en altura, de parámetros climáticos como temperatura, presión, humedad, velocidad del viento, y se miden con instrumentos instalados en globos sonda atmosférica o globos meteorológicos.

recomienda tomar en consideración estos efectos, en la localización de los instrumentos de medición (Oke, 1982; 2004).

Las 3 estaciones climatológicas principales en el Valle de Caracas tipo C_1 , Cajigal, Jardín Botánico y la Carlota, son insuficientes para permitir el desarrollo de una superficie de interpolación, que sea representativa de la variabilidad espacial de estos parámetros climáticos a escala urbana. Dadas estas limitaciones, se decidió orientar el estudio hacia la caracterización de la isla térmica superficial en el área urbana de Caracas con técnicas de sensores remotos y análisis combinados de usos de suelo e índices de vegetación (*NDVI- Normalized Difference Vegetation Index*). Estas técnicas permiten, además de obtener el modelo de temperatura superficial del suelo (*LST-Land Surface Temperature*), ayudar a identificar las relaciones entre las características físicas de las coberturas o superficies urbanas (permeabilidad, porosidad, color, etc.) y la respuesta térmica detectada por el sensor, asociada a la formación de las islas urbanas de calor.

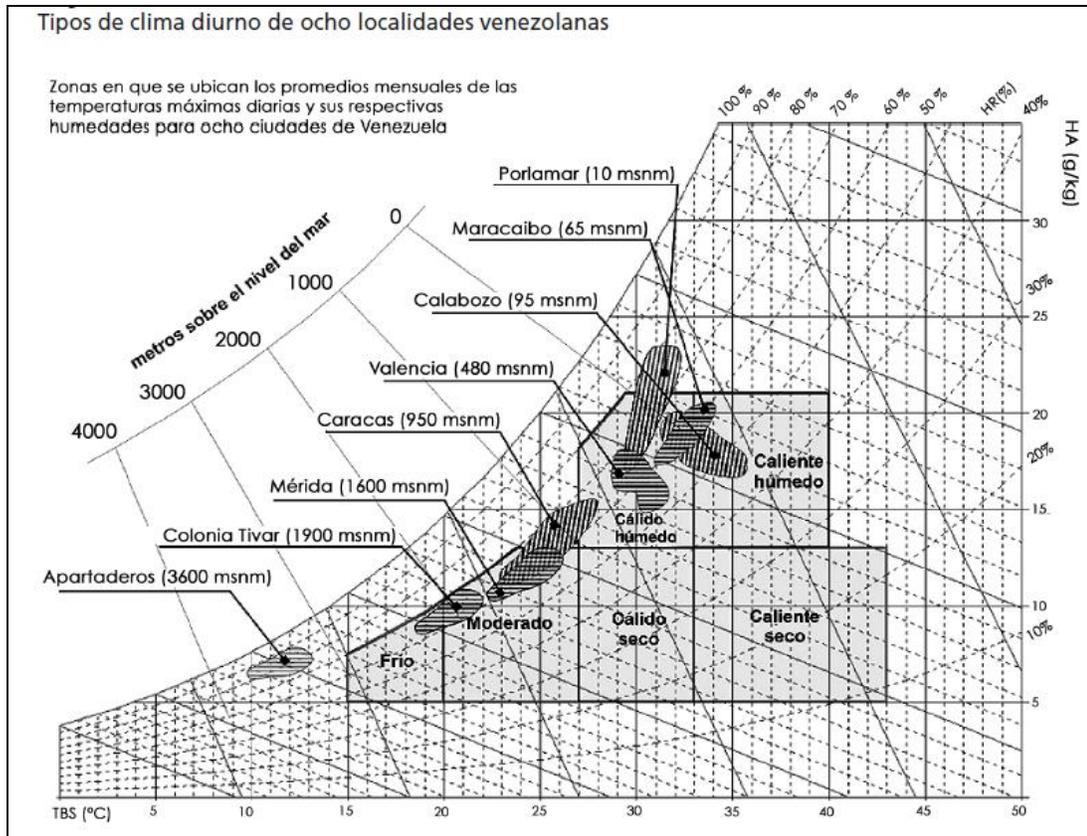
Se realizará además, un análisis de las condiciones climatológicas en el valle de Caracas, que favorecen la formación e intensificación de este fenómeno, con los registros históricos obtenidos en las 3 estaciones climatológicas tipo C_1 , mencionadas.

1.4.-Condiciones climatológicas que favorecen la formación de las islas de calor superficial en el área urbana de Caracas.

La ciudad de Caracas se localiza en la región centro norte costera del país, en un valle alto de montaña con alturas promedio entre 900 a 1000 mts. El clima de la ciudad de Caracas, corresponde a un clima cálido húmedo-moderado (Rosales, 2007), de acuerdo al diagrama de zonas bioclimáticas, que toma como valores de referencia la temperatura, la altitud y la humedad (Figura.8).

Otros estudios climáticos clasifican a la región centro-norte costera, donde se emplazan los valles de la región metropolitana, como un clima subtropical semiárido de tierras altas, entre los 1000 a 1500 mts, con algunas variantes húmedas locales, inducidas por la topografía (Andressen, 2007). Este clima subtropical semiárido, que domina el área del litoral central y los valles de la región central metropolitana, corresponde también al tipo climático *BSi*, o semiárido tropical, de acuerdo al mapa de zonas climáticas según la clasificación de Köeppen, publicada en el Atlas Imagen de Venezuela por PDVSA (PDVSA, 1993), que se caracteriza por una marcada diferencia estacional entre el periodo seco y la temporada húmeda o lluviosa. La estación seca abarca desde diciembre a marzo, para un total en media de 4 meses de sequia, con un periodo de transición (sequia-lluvia) entre abril y mayo (Figura 9).

Figura 8. Tipos Climáticos Urbanos.



Fuente: Rosales, L, 2007, Revista Tecnología y Construcción.

Durante la temporada de sequia pueden presentarse lluvias ocasionales, derivadas del avance de sistemas frontales (frentes fríos) y vaguadas que pueden afectar de la región centro-norte costera del país, durante los primeros meses del año (Andressen, 2007). El periodo lluvioso corresponde a los meses de Junio a Noviembre, para un total de 6 meses de lluvias, interrumpidos por periodos cortos de estiaje sobre todo al inicio de la temporada lluviosa (Velázquez, 2008; Figura 9).

Estas condiciones climáticas están cambiando sobre todo en la última década, debido a los efectos de la variabilidad climática ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), que

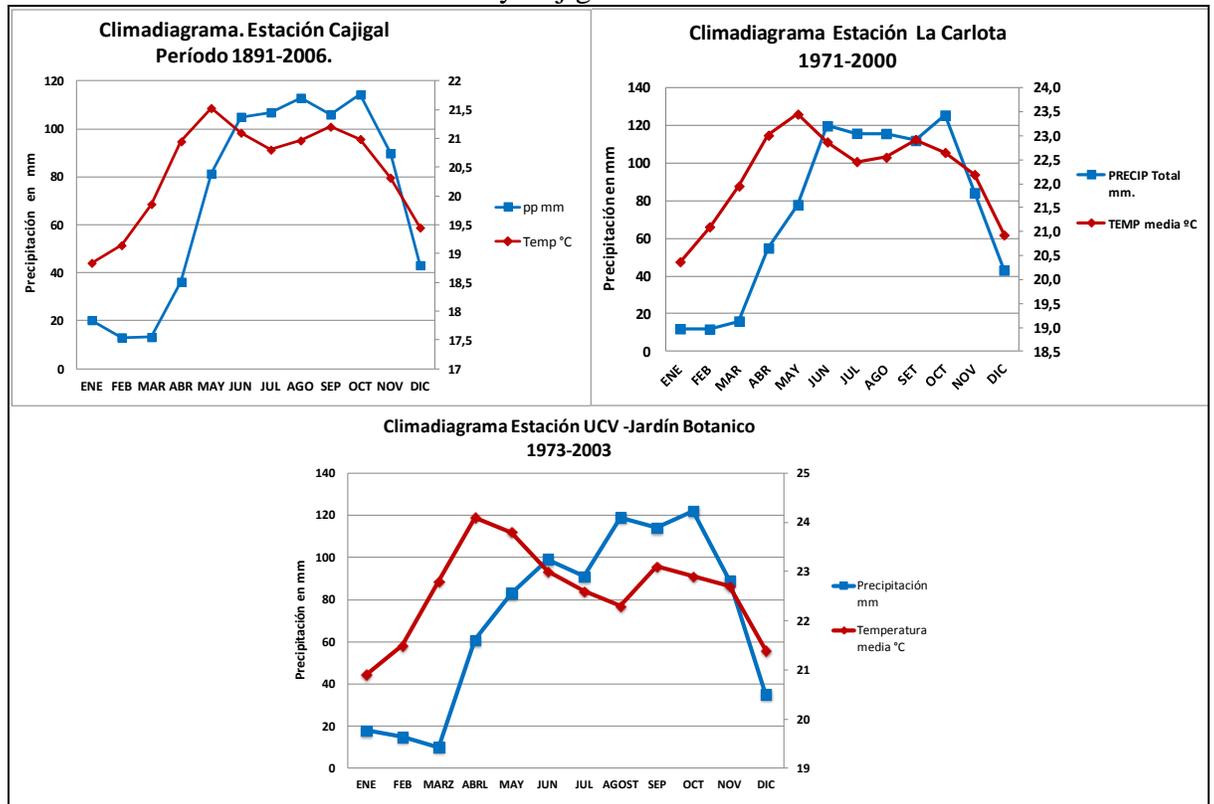
durante la fase fría o eventos *Niña*, debilitan la estación seca sobre todo en la región centro norte costera del país, presentándose abundantes precipitaciones durante casi todo el año y que, durante la fase cálida o eventos *Niño*, intensifica el periodo de estiaje, como ocurrió en el primer trimestre del 2010 (CAF, 2000; Aguilar *et al.*, 2005; OMM 2004; 2011).

A pesar de ello, de manera general podemos afirmar, que las condiciones ambientales y climáticas durante la estación seca en las latitudes tropicales, son las más propicias para la formación del fenómeno de islas térmica superficial (Córdova, 2009; EPA, 2008), ya que los factores que contribuyen a mitigar el fenómeno, como la nubosidad, la sombra, la evapotranspiración vegetal y las precipitaciones, se encuentran fuertemente minimizados, en tanto que los factores que acentúan o intensifican el calentamiento superficial, como las horas de insolación, la radiación incidente, la ausencia de nubosidad y la evaporación, se maximizan (Córdova, 2011a; Figura 10).

Adicionalmente, la vegetación en los climas semiáridos presenta una condición decidua, esta condición es el resultado de mecanismos de adaptación a la ausencia prolongada de lluvias, y produce una pérdida de follaje durante el periodo de estiaje para minimizar la evapotranspiración vegetal y garantizar la subsistencia (Huber, 1993), ello se traduce, a los efectos de la formación de la isla térmica superficial, en la pérdida de la sombra vegetal y de los aportes de humedad atmosféricos por evapotranspiración, aumentando el impacto de la radiación incidente y en consecuencia, el calentamiento superficial (Chen *et al.*, 2006; EPA, 2008; Córdova,

2011a). En los trópicos, se requeriría caracterizar mejor el comportamiento vertical de la atmosfera durante los meses de lluvias (junio-octubre) y de transición sequia-lluvia (Abril-Mayo) en los que la alta humedad y las temperaturas ambientales, son proclives a la intensificación de la isla térmica atmosférica (Córdova, 2011a).

Figura 9. Climadiagramas del Valle de Caracas, Estaciones UCV-0539, La Carlota 0544 y Cajigal 0531.



Fuente: Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidrometeorología- UCV 0539, Fuerza Área de Venezuela 0544, Bases de Datos CLICOM y Observatorio Naval Cajigal 0531, elaboración propia.

Los datos climatológicos promedios, para el valle de Caracas, colectados en las 3 estaciones climatológicas tipo CI principales, estación UCV, serial 0539 (Latitud:

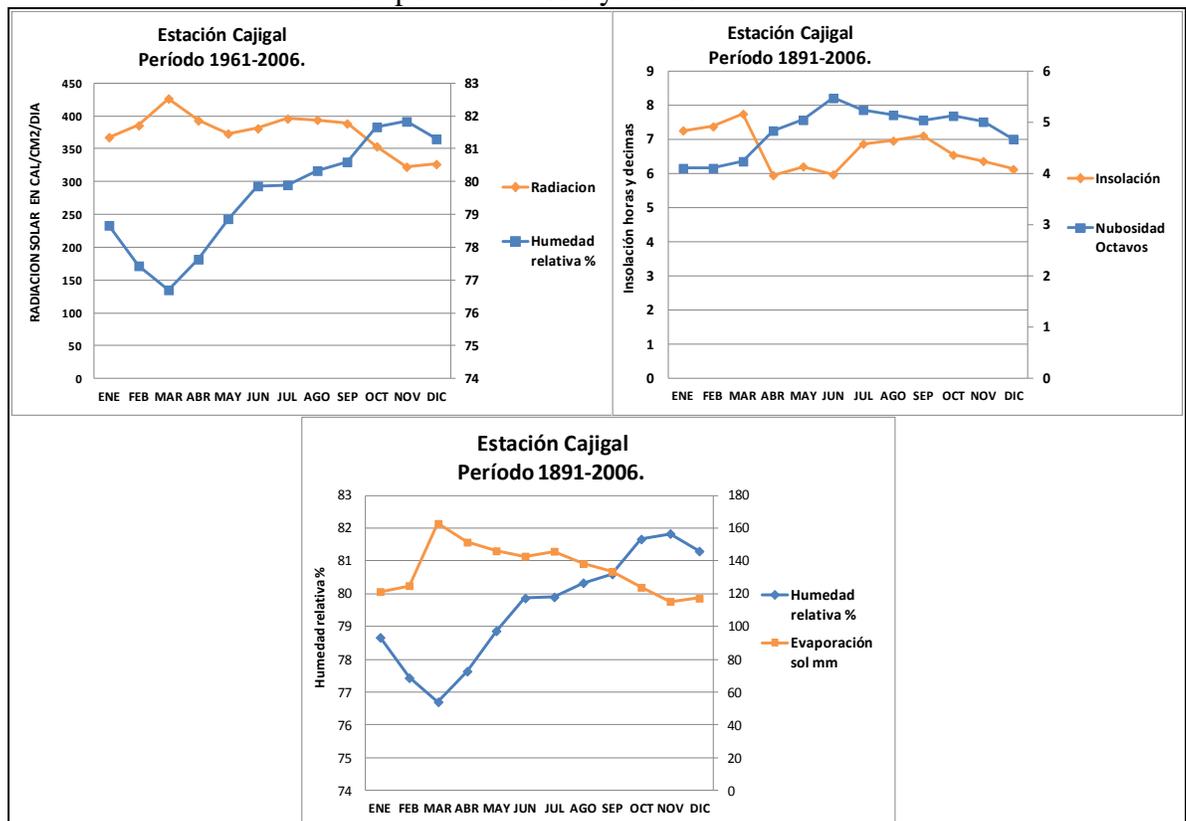
10°29'41" N Longitud: 66°53'12" W, Elevación 884 msnm, periodo 1973-2003), estación La Carlota, serial 0544 (Latitud: 10°30' N Longitud: 66°53' W, Elevación 835 msnm, periodo 1971-2000) y Observatorio Cajigal, serial 0531 (Latitud: 10° 30' 25" norte; Longitud: 66° 55' 39" oeste; Elevación: 1035 msnm.) en el periodo 1891-2006, muestran la estación seca concentrada en los 3 primeros meses del año (enero, febrero, marzo), con un período de transición (sequia-lluvia) entre los meses de abril - mayo, y un máximo anual de precipitación entre los meses de junio a octubre, con un nuevo periodo de transición (lluvia-sequia) en los meses de noviembre-diciembre (Figura 9). La curva de temperatura presenta en todos los casos dos máximos anuales (bimodal), el de mayor intensidad ocurre en los meses de abril, mayo y junio, y el de menor intensidad ocurre hacia finales del año, durante los meses de agosto, septiembre y octubre (Figura 9).

Los meses de abril, mayo y junio, serían los meses en los que la isla térmica atmosférica se formaría con mayor intensidad, lo cual sería interesante verificar con sondeos verticales atmosféricos, ya que las imágenes satelitales en este periodo, suelen presentar problemas debido a la presencia de trazas de humos, nubes estratiformes de alta reflectancia, o nubes tipos cúmulos, lo que limita el uso de este recurso como herramienta diagnóstica.

A los efectos de la formación de la isla térmica superficial en el Valle de Caracas en cambio, el período de sequia correspondería al periodo con mayor probabilidad de ocurrencia de estos eventos climáticos, ya que durante el mismo se registra la mayor

cantidad de horas de insolación y en consecuencia, la mayor cantidad de radiación solar incidente, de la cual depende el calentamiento superficial diurno, e inversamente la menor cobertura nubosa (Figura 10).

Figura 10. Estación Cajigal. Serial 053. Registros de Radiación, insolación, humedad, evaporación al sol y nubosidad.



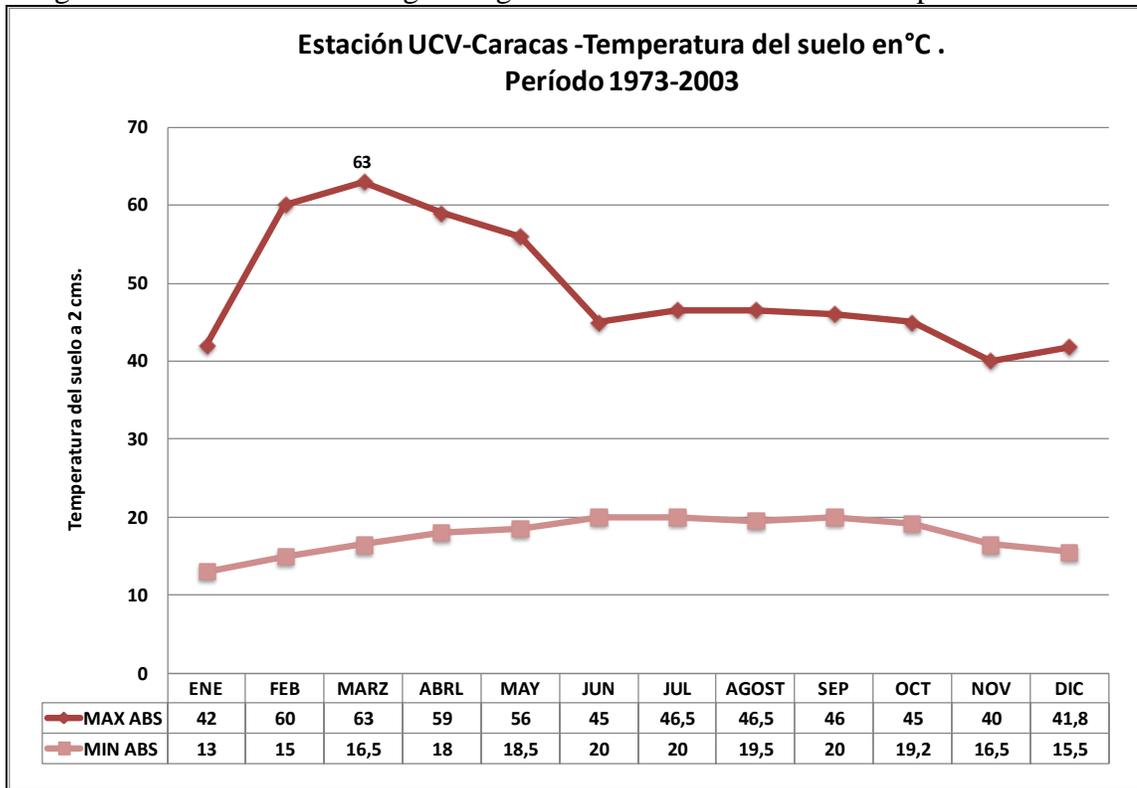
Fuente: Dirección de hidrología y Navegación, Base de Datos CLICOM, Observatorio Naval Cajigal, elaboración propia.

Ello se confirma al observar los registros de radiación e insolación, en la estación Cajigal (Figura 10). Estos muestran un pico de radiación incidente durante el mes de marzo (427 cal/cm2/día), coincidente con la mayor cantidad de insolación en horas

(7,7 horas) así como los más altos niveles de evaporación al sol (162,9 mm) e inversamente, en consecuencia, el menor porcentaje de humedad durante el año (76,70%). El mes de Octubre en contraste, es de acuerdo a los registros, es uno de los meses con mayor precipitación y menor incidencia de la radiación solar (Figuras N° 9 y 10).

Adicionalmente, la estación climatológica UCV-serial 0539, posee registros diarios del régimen geotérmico del suelo. Esta información resulto de suma importancia, ya que nos permitió efectivamente confirmar que el mes de marzo, es el mes donde se alcanzan las mayores temperaturas superficiales del suelo como lo muestra la figura 11. A los efectos de este trabajo se analizaron los registros geotérmicos a 2 cms de profundidad, es decir, la capa del suelo que más se afecta como consecuencia del calentamiento superficial diurno. Este periodo corresponde también, al de mayor amplitud térmica observada, con un pico en el mes de Marzo (63°C) que representa además, la máxima temperatura del suelo alcanzada durante el año en el periodo 1973-2003. (Figura 11).

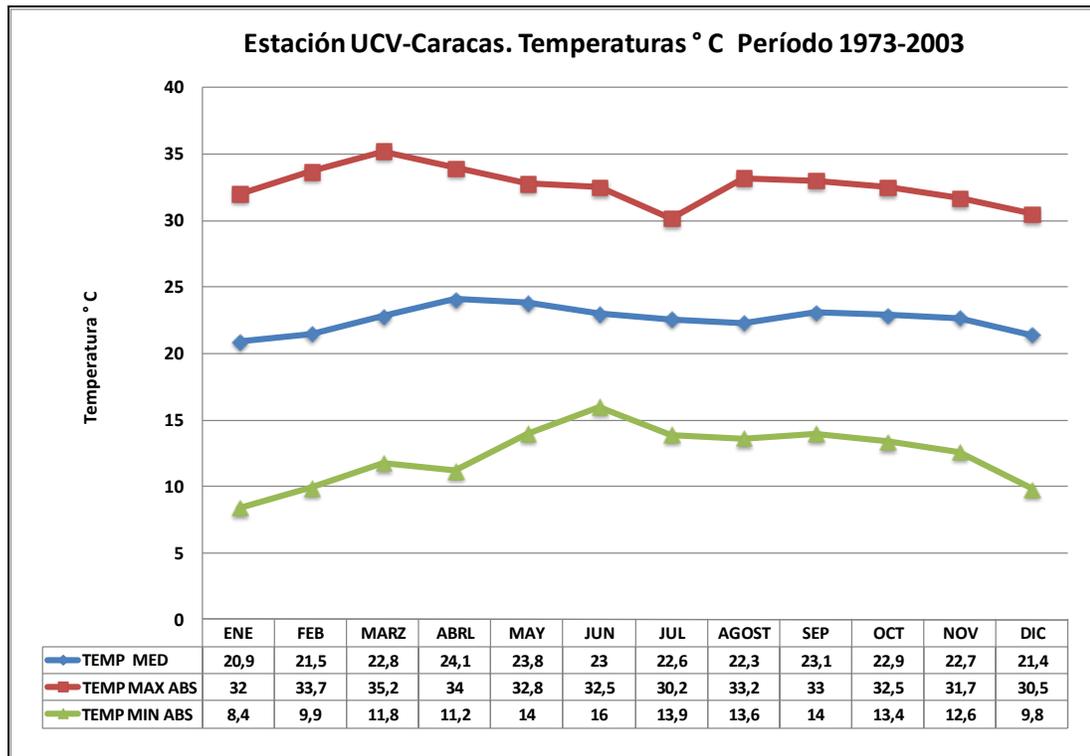
Figura 11. Estación UCV. Registros geotérmicos del suelo a 2cms de profundidad.



Fuente: Departamento de Hidrometeorología, Facultad de Ingeniería, UCV, elaboración propia.

Las temperaturas máximas del aire para el mismo periodo (1973-2003) en la estación UCV-serial 0539 (Figura 12), también alcanzan máximos durante el trimestre de Febrero-Marzo-Abril, aunque la amplitud térmica es mayor en la temperatura del suelo, que en la temperatura del aire (Figuras 11 y 12).

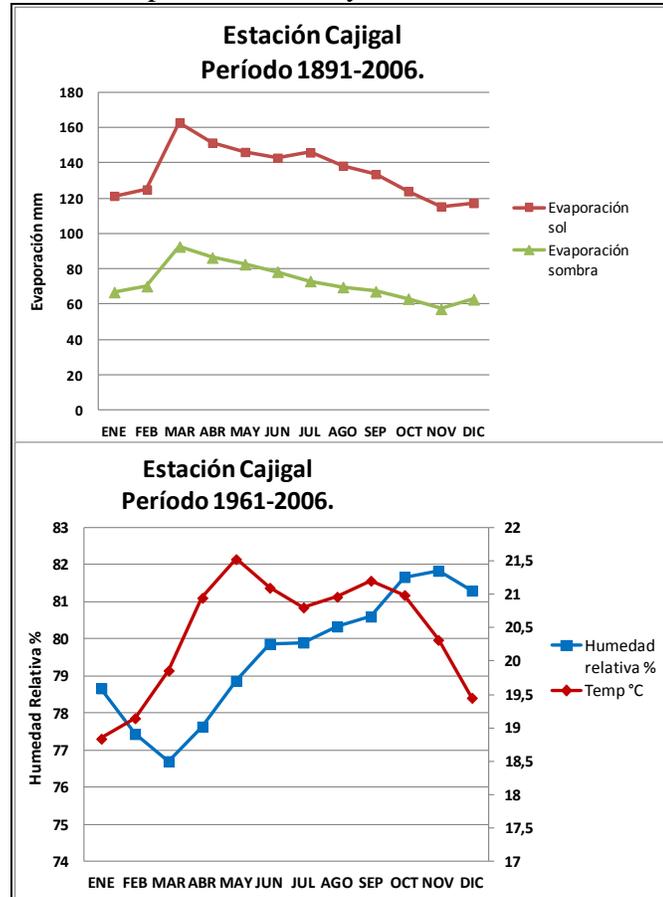
Figura 12. Estación UCV. Registros de temperatura media, máxima y mínima absoluta.



Fuente: Departamento de Hidrometeorología, Facultad de Ingeniería, UCV, elaboración propia.

Otros parámetros climatológicos que refuerzan este criterio de análisis, son la evaporación al sol y en sombra, que registran valores máximos durante el mes de marzo y mínimos en el último trimestre del año (Figura 13).

Figura 13. Estación Cajigal. Serial 0531. Registros de evaporación al sol y sombra, Temperatura media y humedad relativa.



Fuente: Dirección de Hidrología y Navegación, Base Datos CLICOM, Observatorio Naval Cajigal, elaboración propia.

La humedad relativa media en cambio (Figura 13), presenta valores inversos a los máximos de temperatura, y aumenta progresivamente en la medida que avanza la temporada de lluvias. Los meses de julio, agosto y septiembre, serian los meses con mayor registro de temperatura y humedad, en los que se esperaría que aumente la sensación térmica de calor, aunque no necesariamente el calentamiento superficial por el aumento de la nubosidad, en tanto que hacia el final del año aumenta la

humedad atmosférica y las temperaturas del aire disminuyen, en la medida que disminuyen las horas de insolación y la radiación solar incidente (Figura 13).

Con base a los análisis anteriores, el periodo de estudio del fenómeno de isla térmica superficial en la ciudad con sensores remotos, se centrará fundamentalmente en la época de sequía, con énfasis en el mes de marzo (dependiendo de las disponibilidades de imágenes LANDSAT desde marzo del 2001 hasta enero 2011). Se analizarán también imágenes en el periodo lluvioso (de preferencia en el mes de octubre), para observar la variabilidad en los patrones térmicos superficiales, inducida por los cambios estacionales, en el área urbana del valle de Caracas.

En este caso, al utilizar la estacionalidad como criterio para seleccionar las imágenes LANDSAT para los análisis del fenómeno de isla térmica superficial, estaríamos observando dos escenarios contrastados, ello permitirá determinar precisamente cuáles serían los sectores en donde prevalece una alta temperatura superficial, aún bajo condiciones climáticas que favorecen la mitigación del fenómeno durante los meses de lluvia y bajo condiciones inversas, en los meses de sequía.

1.4.1.-Elementos modificadores del clima, su influencia local en la formación y mitigación del efecto de isla térmica superficial en Caracas.

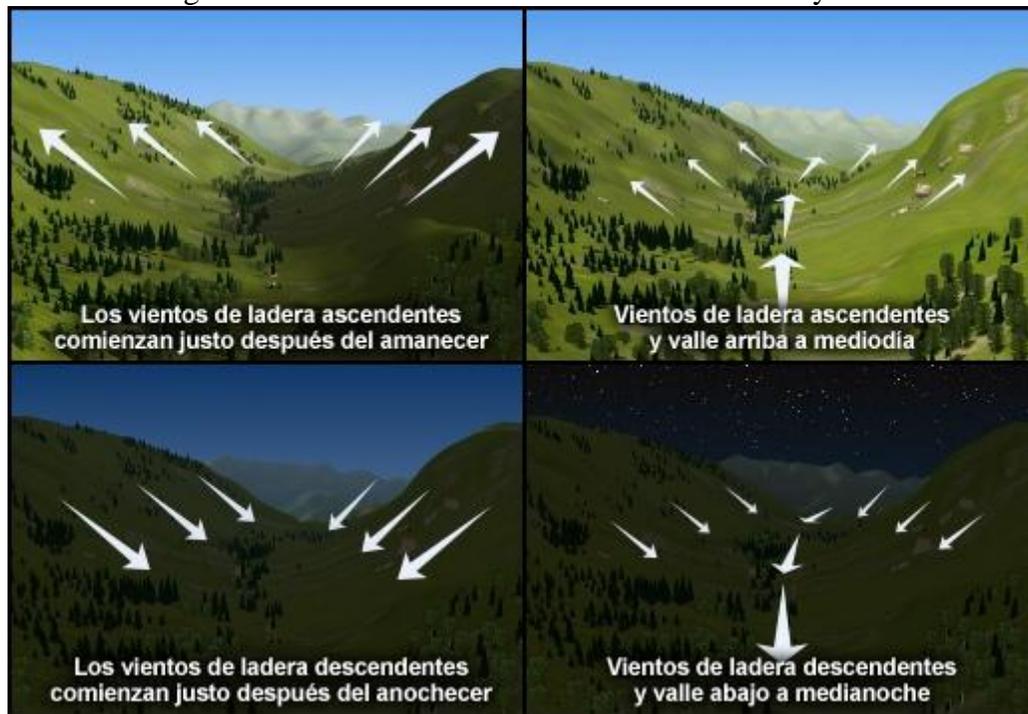
Los elementos modificadores del clima, como ya lo señalamos al inicio de este capítulo son fundamentalmente la latitud, la altitud, el relieve, la continentalidad y la proximidad a cuerpos o masas de agua (Ritter, 2009). En el caso de la ciudad de

Caracas, uno de los elementos que más influye en el clima local, es precisamente el relieve, por estar asentada en un valle alto intra-montano. El mismo modifica las condiciones ambientales y climáticas, sobre todo de los sectores localizados al norte de la ciudad, que se benefician más directamente de los ciclos vespertinos y diurnos de circulación local entre el valle y la montaña, como se muestra en la Figura 14.

Los vientos de ladera ascendentes (Figura 14) durante las horas diurnas ayudan a disipar la contaminación y el calor que se concentra en las capas bajas atmosféricas sobre los centros urbanos, por eso los fenómenos de inversión atmosférica que se observan en Caracas, durante los meses de diciembre y enero, se rompen en las primeras horas de la mañana.

En las primeras horas de la tarde y la noche, los vientos de ladera descendentes recambian y refrescan el aire de la ciudad, las urbanizaciones y comunidades localizadas al norte de la ciudad reciben de manera directa estos aires frescos de montaña, por eso la temperatura tiende a ser menor en estos sectores tanto en horas diurnas como nocturnas (Figura 14).

Figura 14. Circulación local Valle-Montaña diurna y nocturna.

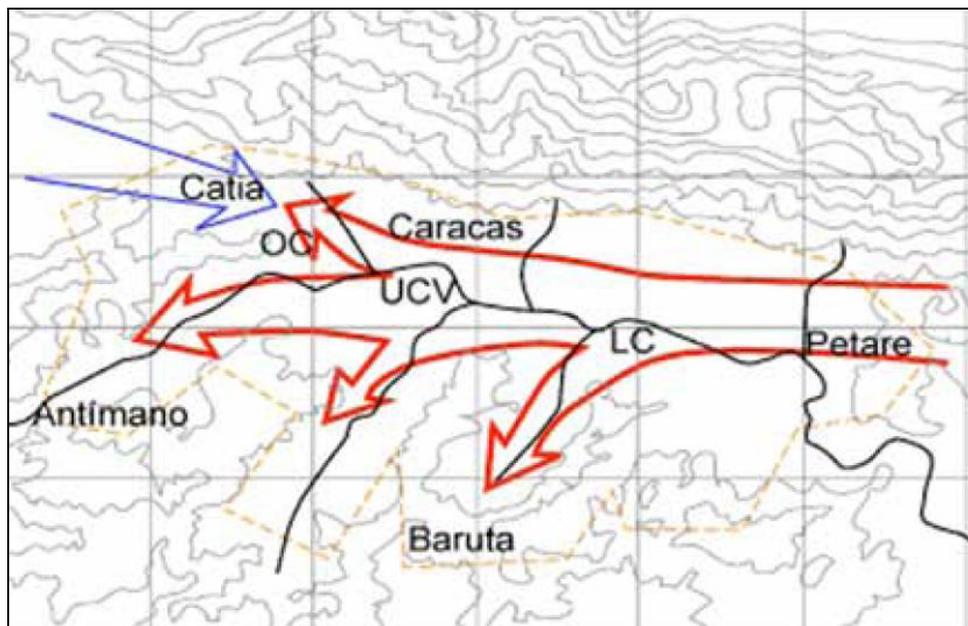


Fuente: The comet program. http://www.meted.ucar.edu/topics_mountain.php

Uno de los sectores directamente beneficiado de este fenómeno de circulación local es el centro histórico de la ciudad, a pesar de su alta densidad constructiva, al estar localizado sobre el sector nor-oeste de la ciudad, recibe las brisas del Ávila (*Parque Nacional Güariara-Repano*) en las horas tempranas de la tarde-noche y las corrientes ascendentes de ladera durante la mañana, contribuyen con la ventilación y disipación del calor en este congestionado sector, con excepción de algunos estrechos corredores viales enmarcados por altos edificios, donde la circulación es insuficiente.

La dirección predominante de los vientos en la ciudad para el periodo 1971-2006, son vientos del Este (90°), de acuerdo con los datos obtenidos del Observatorio Naval Cajigal.

Figura 15. Dirección de los vientos dominantes en el Valle de Caracas.



Fuente: Perdomo, (2009). Contaminantes aéreos y sus efectos en pacientes alérgicos del Valle de Caracas.

Otros estudios realizados en el valle de Caracas, relacionando la contaminación atmosférica a los patrones de circulación del viento (Perdomo, 2009; Figura 15) muestran también un flujo dominante del este (E), que se distribuye a lo largo del valle principal (rio Guaire), alcanzando con menos fuerza, los valles secundarios (Antimano, el Valle y Baruta).

Ello se debe fundamentalmente a la forma alargada y alineado en dirección WNW-ESE del valle de Caracas, en el tramo correspondiente al área urbanizada, y de los

vientos (ESE) que entran al mismo (Perdomo, 2009), y guarda relación con los patrones térmicos observados en la ciudad (Córdova, 2011 a).

Las áreas más favorecidas por el flujo de vientos ESE presentan rangos de temperaturas inferiores a los sectores del WSW de la ciudad. Estos patrones climáticos locales, así como otras características del mosaico urbano, serán también verificados, en el mapeamiento térmico superficial con sensores remotos, en el capítulo III de este trabajo.

1.5.-El mosaico urbano, evolución histórica, variabilidad espacial e incidencias en la formación de islas térmicas superficiales en el área urbana de Caracas.

El espacio construido urbano puede caracterizarse, como un complejo mosaico de superficies y usos asociados, con características físico-naturales y comportamiento térmico diferente, dependiendo de las propiedades físicas, (reflectancia, absorptividad, trasmisividad y emisividad) de los elementos que lo componen, vegetación (arbórea, arbustiva, gramíneas), suelos, coberturas asfálticas, coberturas metálicas, concreto, laminas de agua, roca, etc. De forma general podemos clasificar estas superficies presentes en el mosaico urbano, como espacios naturales o construidos. Los espacios naturales, corresponden en este caso, a ambientes recubiertos por vegetación, bien sea intervenida o sin intervenir por el desarrollo urbano e integrados o no en el tramado urbano, como por ejemplo las áreas naturales protegidas, riberas de ríos y quebradas,

los espacios remanentes de la vialidad, o áreas con restricciones al desarrollo urbano por la pendiente, terrenos municipales no desarrollados, etc.

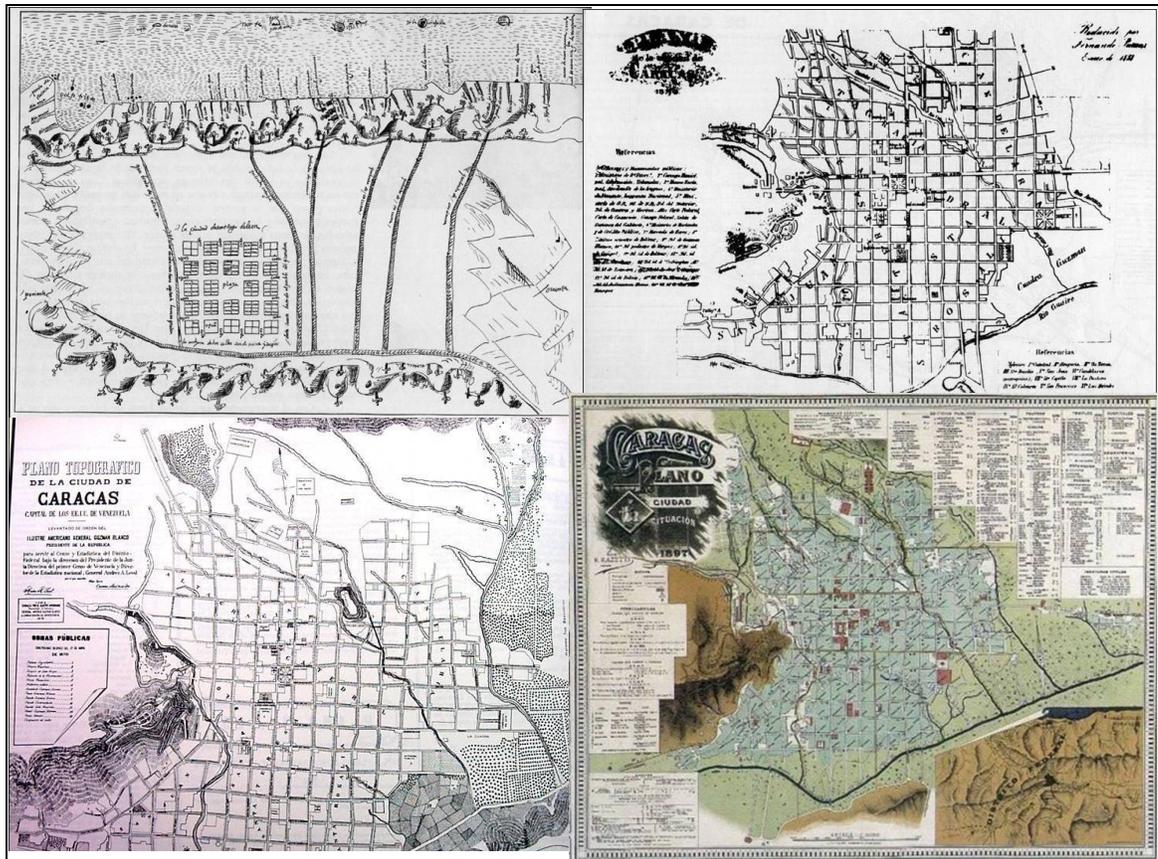
Los espacios construidos, en cambio, son tanto aquellos desarrollados por el urbanismo formal, como los que son incorporados al desarrollo urbano sin un plan de desarrollo formal. El urbanismo formal, incluye no solo el desarrollo de los nuevos espacios habitacionales, sino la planificación de la infraestructura de servicios asociados a los usos nuevos o existentes; las redes viales, los planes de saneamiento ambiental, los espacios educativos, culturales, y recreación, etc.

El urbanismo informal ocupa, en muchos casos, áreas remanentes o con restricciones, y por lo general, presenta un inadecuado nivel de servicios, por lo que suelen presentarse déficit de servicios y carencias de saneamiento que se asocia a situaciones socio-ambientales complejas. Ambos espacios, naturales y construidos se intercalan en el tramado urbano constituyendo el continuo urbano reconocido como ciudad.

El desarrollo histórico- urbano de la ciudad, determina diferencias en la ocupación del territorio sobre la que estas se asientan, definiendo las características morfológicas y socio-naturales de la ciudad. La morfología urbana es pues, la resultante tanto de los procesos socio-históricos y socio económicos de ocupación, como de las características físico- naturales de las tierras o espacios disponibles para el desarrollo urbano (De Lisio, A, 2001). Por lo tanto, el mosaico urbano resultante de estas interacciones, guarda relación con los patrones térmicos superficiales, y con la

formación y extensión de las islas térmicas urbanas, por ello el interés en la comprensión de estos procesos.

Figura 16. Cartogramas Históricos de Caracas 1578, 1870, 1884, 1897.



Fuente: Archivo histórico digital de la ciudad Caracas, Biblioteca Nacional.

El lento crecimiento de la ciudad desde su plano fundacional en 1578 hasta 1897 se observa abajo en las imágenes de cartogramas históricos de la ciudad, todavía el consumo de espacio es incipiente y limitado al sector nor-central del valle de Caracas (Figura 16). La ciudad rompe su confinamiento inicial hacia mediados de los años 30 (1930-1934), en que se desarrolla la urbanización el Paraíso y el Cementerio al

oeste y sur-oeste de la ciudad y se inician los planes de expansión hacia el nor-este de la ciudad (Figura 17). Aun cuando el consumo neto de espacio desde principios de siglo (1897) hasta 1936 (39 años) fue de apenas 104 hectáreas (Tabla N° 2), la población de la ciudad se triplicaría sumando casi 160.000 Hab más, para una densidad de 440 Hab/Ha en 1936. La ciudad comienza desde ya, a configurar los patrones de alta densidad en un espacio con restricciones físicas que la caracterizaran a futuro (Anexo N° 1).

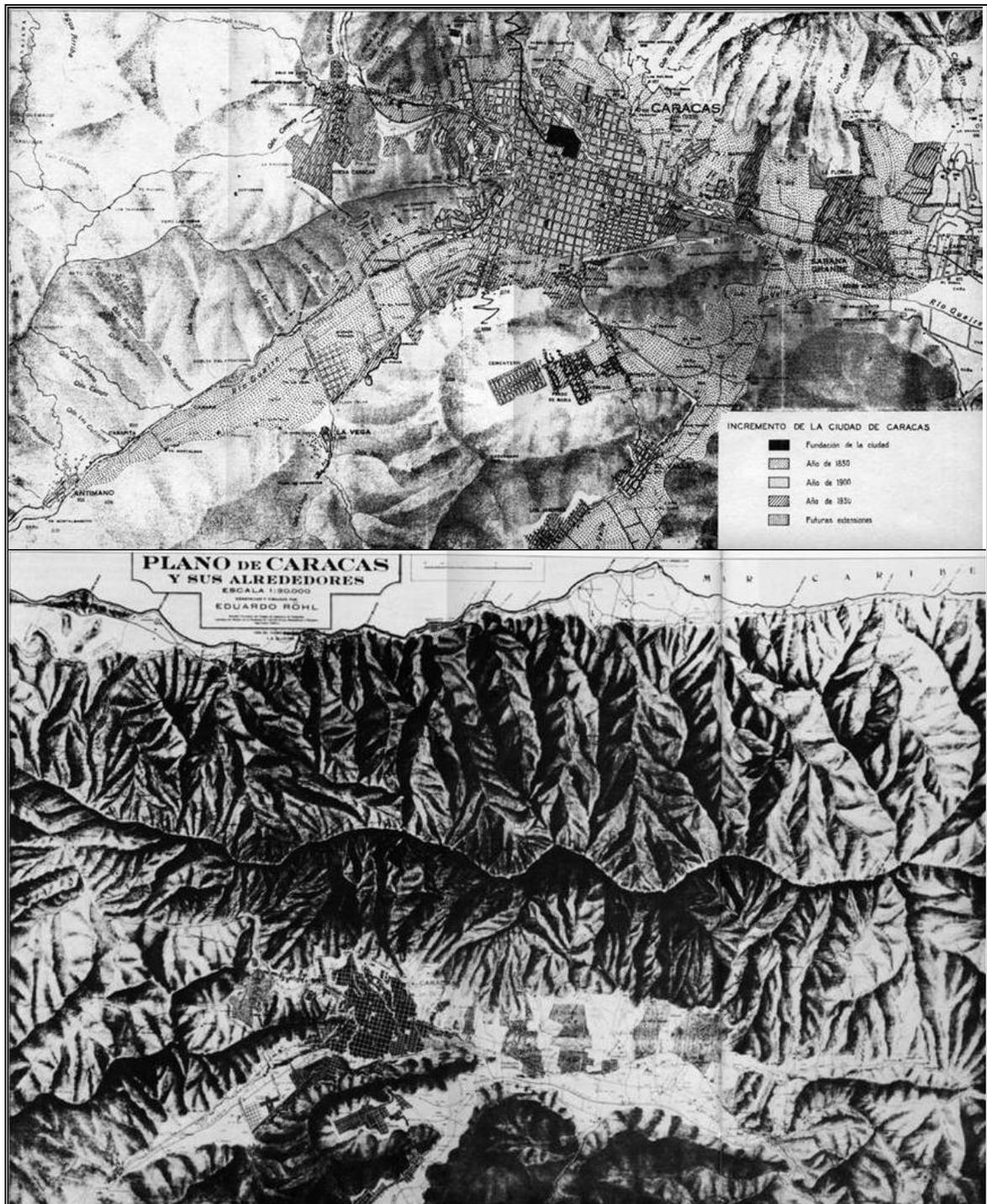
Tabla 2. Caracas. Evolución de la superficie construida y la densidad poblacional.

Años	Superficie Urbana (Has)	Habitantes	Densidad (Hab/Ha)
1897	430	76.140	117
1936	534	235.160	440

Fuente: Rocco, 2005. Caracas Cenital, Fundación para la Cultura Urbana, Critería Editorial C.A, Caracas.

El desarrollo urbano irá progresivamente incorporando los núcleos primarios de desarrollo poblacional en el valle, tanto al oeste (Catia, La Vega) como al este de la ciudad (Chacao, Petare) ya hacia finales de los años cincuenta, la morfología de la ciudad está casi completamente definida, extendiéndose desde el centro urbano localizado al nor-oeste de la ciudad hacia el nor-este y progresivamente también, hacia los valles transversales del sur oeste y sur este, correspondientes a los valles del ríos Guaire y Valle (Figura 17).

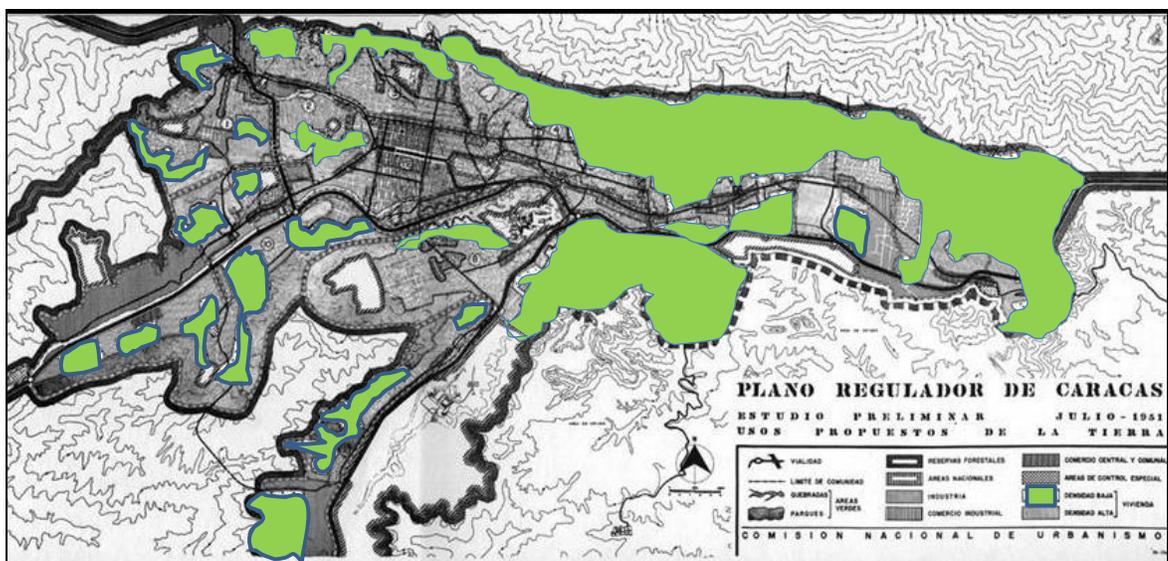
Figura 17. Cartogramas Históricos de Caracas. 1930-1934.



Fuente: Archivo histórico digital de la ciudad Caracas, Biblioteca Nacional.

En los años cincuenta, la comisión nacional de urbanismo del Ministerio de Obras Públicas -MOP, en el estudio de usos propuestos del plano regulador de Caracas, establece las diferencias de densidad urbana que serán características en la ciudad entre el *oeste* y *sur-oeste* y el *nor-este* y *sur-este* de la ciudad, en el plano los sectores resaltados con el color verde corresponden a los sectores de viviendas de baja densidad, en gris claro los sectores de alta densidad y en gris medio los sectores industriales y los corredores mixtos industrial-comerciales (Figura 18).

Figura 18. Caracas, 1951. Plano Regulador de Caracas. Usos propuestos.

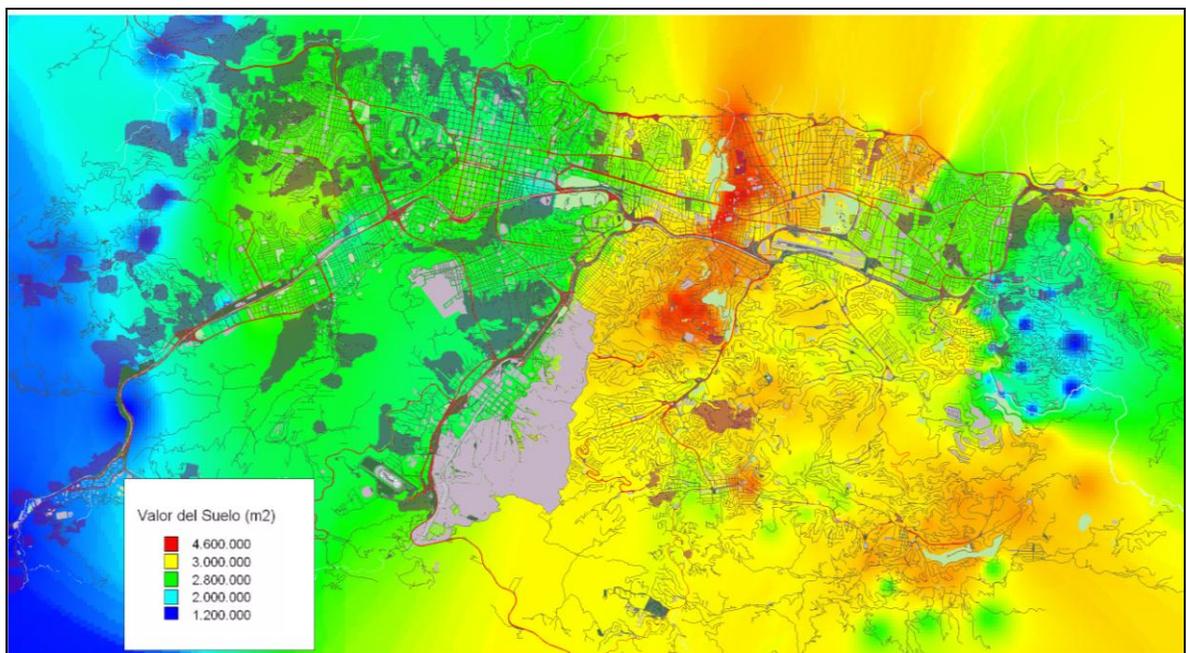


Fuente: Archivo histórico digital de la ciudad Caracas, Biblioteca Nacional.

Resulta obvia en esta sectorización, la conservación de la baja densidad urbana hacia el nor-este y sur-este de la ciudad, en tanto que la mayor saturación del espacio se observa en los sectores del oeste y sur-oeste de la ciudad, con algunos islotes de baja densidad (Figura 18).

La renta diferencial del suelo contribuyó a consolidar este patrón de ocupación en el valle de Caracas que se asoció además a valores estéticos y de calidad de vida, que marcarían notorias diferencias en la densidad del espacio construido, la calidad de la vivienda, la infraestructura y los servicios entre el urbanismo de los sectores del este y oeste de la ciudad. Estas tendencias en términos de la renta diferencial del suelo se mantienen hasta el presente, obsérvese en la Figura 19, los rangos de precios referenciales para el año 2009 (en Bs viejos antes conversión) por sectores en la ciudad. Los precios más altos por m² (en colores de amarillos al rojo) se observan en los sectores del nor-este y sur-este de la ciudad y los más bajos en los sectores del oeste y sur-oeste de la ciudad (Figura 19).

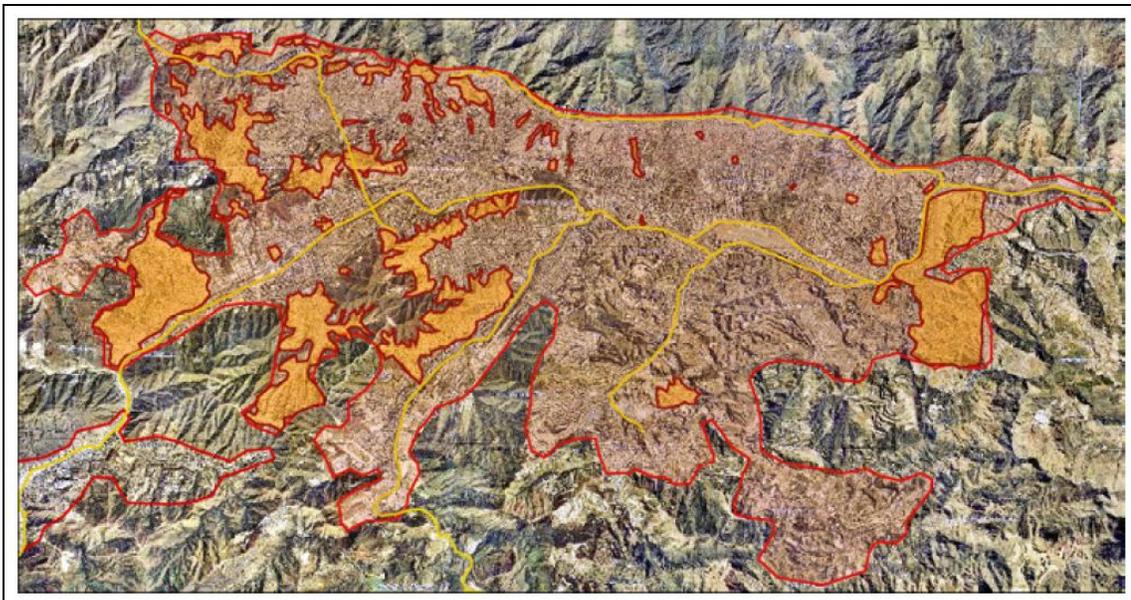
Figura 19. Caracas. Valores referenciales del suelo Bs/m², 2009.



Fuente: <http://www.inmueblescaracas.com.ve>, Bases Cartográficas IGVS, elaboración propia.

Esta constituirá la morfología urbana dominante desde los años 50 hasta el presente, con algunas variaciones debido al crecimiento de las zonas de barrios, mucho más extendidos en los sectores del nor-oeste y sur-oeste de la ciudad (Figura 20), aunque se mantiene la tendencia general observada en la evolución de la morfología y los usos del suelo en la ciudad, de una menor densidad constructiva y poblacional en los sectores del nor-este y sur-este de la ciudad, exceptuando la zona de Petare (Figura 20)

Figura 20. Localización de los barrios en Caracas.

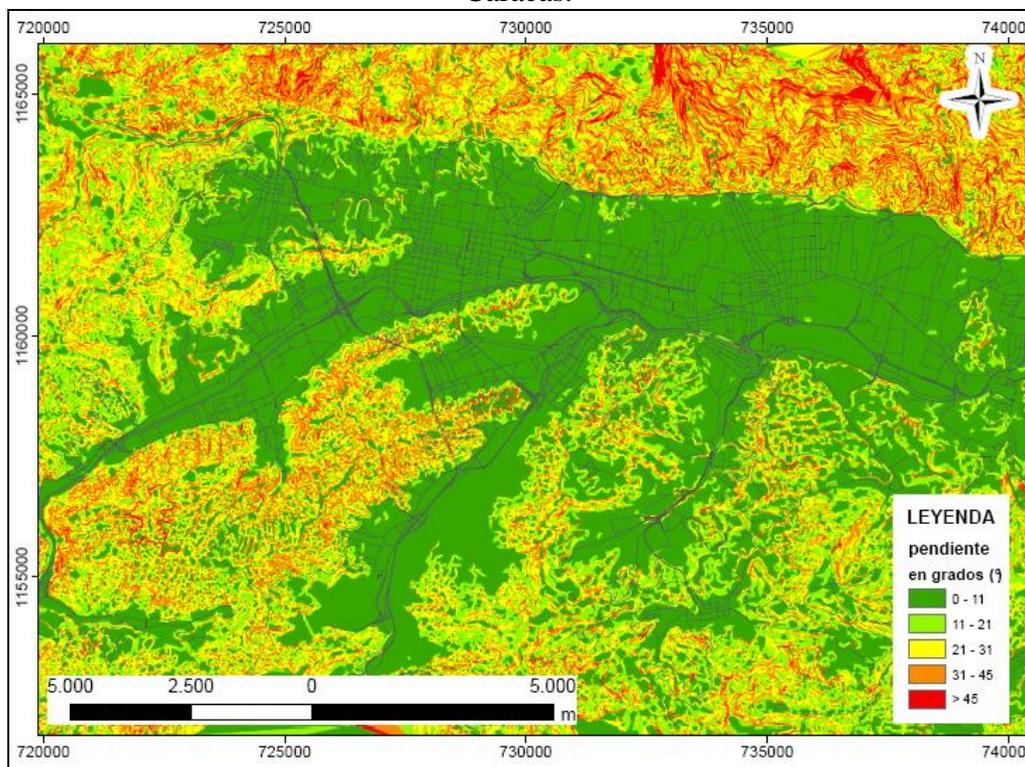


Fuente: Barrios de Caracas. Caracas, disaster resistant, Columbia University, 2001. <http://www.ldeo.columbia.edu/chrr/education/>

Las limitaciones físicas debido a las pendientes pronunciadas (30-45°) que circundan el valle (Figura 20), han contribuido a densificar el desarrollo urbano localizado en los sectores más bajos del valle entre 0-30° de pendiente, sobre todo en los sectores

del oeste de la ciudad, y a profundizar el modelo urbano estratificado, ello debido a que los costos más altos de los urbanismos en colinas y laderas en pendientes superiores a 30°, se compensan con una oferta paisajística bajo el concepto de desarrollos exclusivos, en los que estos costos se transfieren al consumidor final, tornando menos accesibles a los inmuebles desarrollados bajo este concepto, en los nuevos sectores del sur-este de la ciudad (Rocco, 2005; Figuras 19 y 21).

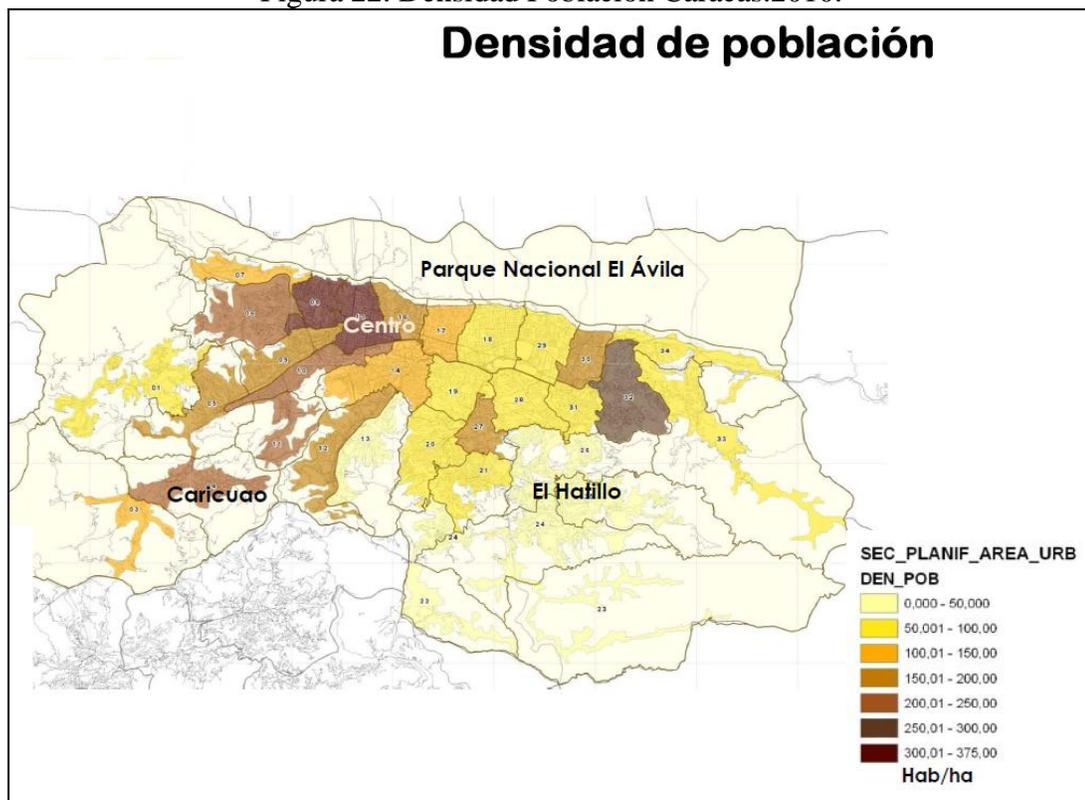
Figura 21. Mapa clinométrico de las laderas circundantes del Área Metropolitana de Caracas.



Fuente: “Proyecto de Microzonificación Sísmica en las Ciudades Caracas y Barquisimeto 2005-2009”, FUNVISIS. Mpp CyT, Caracas, 2009.

De acuerdo a los estudios realizados por Instituto Metropolitano de Urbanismo, para la elaboración del Plan Caracas 2020 (Alcaldía Metropolitana, 2010), las mayores densidades de población se observan en el Distrito Capital en los sectores del centro, oeste y sur-oeste de la ciudad (Figura 22), correspondientes a las parroquias de Candelaria, 23 de Enero, San Agustín, San Juan, Sta. Teresa, Sta. Rosalía, La Pastora, El Paraíso, La Vega, El Valle y Macarao (Figura 22).

Figura 22. Densidad Población Caracas.2010.



Fuente: Alcaldía Metropolitana de Caracas, Plan Caracas 2020; IMU, <http://imutc.org/portal>

En tanto que las mayores densidades de los municipios del estado Miranda que integran el área urbana de Caracas, se observan en el municipio Sucre, parroquias Urbina y Petare, y en el municipio Baruta, en la Parroquia Concreta (Figura 22).

Las diferencias actuales, entre los sectores sur-este y sur-oeste de la ciudad son notorias en términos no solo en términos de la densidad de población y la densidad del espacio construido⁸, sino también en lo referente a la calidad ambiental, la infraestructura y los servicios. Ello se refleja en el nivel del índice de desarrollo humano (IDH) por municipios, un indicador socio-económico que refleja la calidad de vida de la población, este muestra claras diferencias entre los sectores del este municipios Baruta (IDH 0,842); Chacao: (IDH 0.860) y sureste (El Hatillo 0,839) y el sector oeste y suroeste de la ciudad correspondiente al municipio Libertador (IDH de 0,793) donde se aloja el 67% de la población (Colmenares, 2008).

Estas diferencias se reflejan también en la distribución de las áreas verdes y recreacionales en la ciudad, de acuerdo al estudio realizado por el Instituto Metropolitano de Urbanismo de la Alcaldía Metropolitana (Alcaldía Metropolitana, 2010; Tabla N° 3). Los datos aportados por el estudio muestran que el municipio Libertador con la mayor cantidad de habitantes, tiene el menor número de metros²/habitante de áreas verdes en la ciudad, en tanto que los municipios Sucre y Baruta al

⁸ La densidad constructiva puede considerarse, como el consumo de espacio (del territorio sobre el cual se asienta la ciudad) por infraestructura física asociada a actividades urbanas.

este y sureste de la ciudad tienen comparativamente, los mayores índices de áreas verdes por habitante (Tabla N° 3).

Tabla 3. Caracas. Áreas verdes por habitante en M².

Municipios	Población (Hab)	Áreas Verdes (M ²)
Libertador	2.109.166	1,4
Chacao	67.804	1,8
Baruta	353.549	2,86
Sucre	1.104.494	2,86
El Hatillo	70.635	0,91

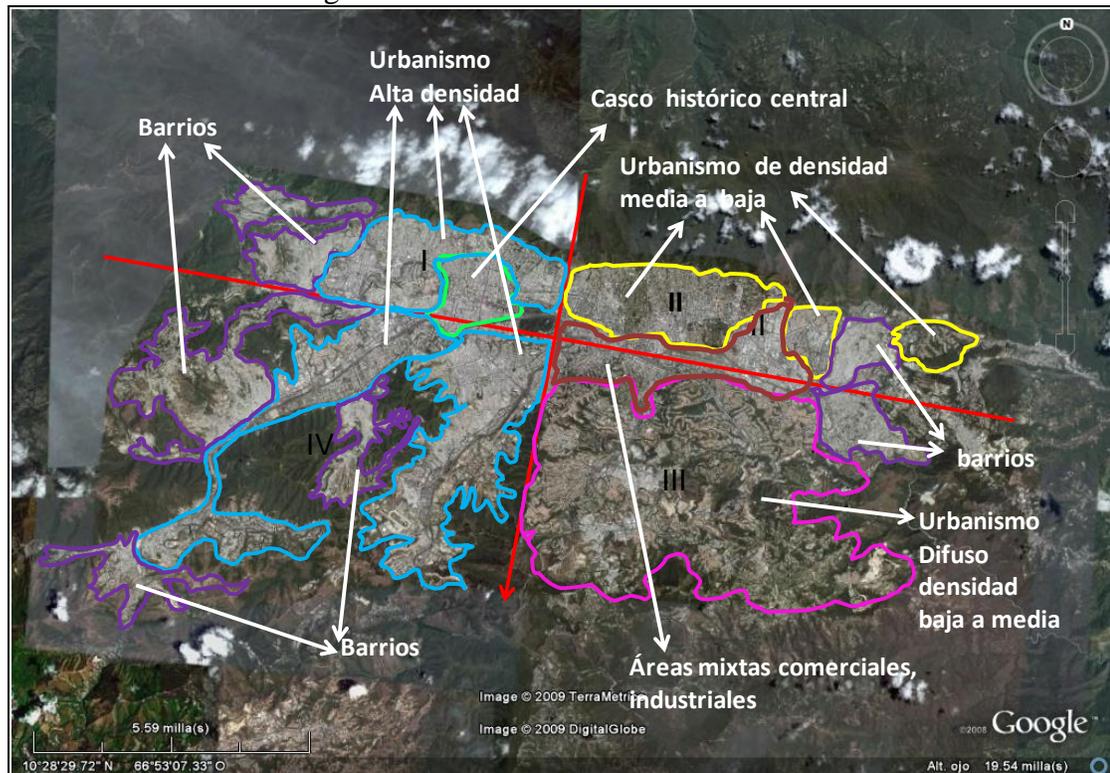
Fuente: Instituto Metropolitano de Urbanismo, Alcaldía Metropolitana, 2010.

Estas diferencias en los patrones de ocupación de la ciudad de Caracas, fueron el origen de las primeras hipótesis de trabajo, al considerar, que el comportamiento térmico de las superficies que integran el mosaico urbano de la ciudad, debía poseer una estrecha relación con la densidad del espacio construido y la pérdida creciente de espacios naturales y, en consecuencia, sería lógico esperar diferencias térmicas importantes entre los sectores del este y oeste de la ciudad. En efecto, si dividimos la ciudad en cuatro (4) cuadrantes⁹ es posible apreciar diferencias en los patrones de

⁹ Los cuadrantes urbanos fueron delimitados considerando los linderos naturales de la ciudad, como el canal del río Guaire, que a la altura de Plaza Venezuela y en su trayectoria hasta Petare, divide los sectores del noreste y sureste de la ciudad, y las filas que dividen los sectores del sureste y suroeste de la ciudad, así como también los ejes viales E-O como la autopista Francisco Fajardo.

ocupación del suelo que deberían, de igual manera corresponder, a diferentes patrones térmicos en la ciudad (Figura 23).

Figura 23. Cuadrantes Urbanos- Caracas



Fuente: Google Earth, Noviembre, 2009, elaboración propia.

De manera general se aprecia una ciudad más densamente ocupada y construida alrededor de la cuadrícula histórica de la ciudad y sus áreas adyacentes al nor-oeste (Cuadrante I), uno de los sectores más densamente construidos y con escasa presencia de corredores o áreas verdes intra-urbanas, con excepción del jardín botánico y el parque los Caobos en el límite inferior derecho del área (Figura 23).

Hacia el nor-este de la ciudad en contraste (II cuadrante), se aprecian sectores de menor densidad intercalados con espacios de áreas verdes recreacionales, (Campos

Golf Caracas Country Club, Parque del Este, Parque Miranda, Parque Los Chorros) aumentando la densidad constructiva hacia las zonas industriales y el sector de Petare. En el cuadrante III, hacia el sur-este de la ciudad se observa una ciudad más difusa y extendida, con mayor presencia de áreas residenciales de baja densidad. Aun cuando se observa una mayor arborización intra-urbana, también se aprecia una fuerte intervención y modificación de las colinas y espacios verdes naturales circundantes (Figura 23)

Al sur-oeste de la ciudad (IV cuadrante), en cambio, se observa un desarrollo urbano concentrado, mayormente emplazado en las áreas bajas o fondos de valle, con una buena conservación de las filas y colinas verdes circundantes a pesar de las crecientes presiones de la ocupación urbana no planificada (Figura 23).

Se espera que la composición del mosaico urbano, sea entonces determinante en el comportamiento térmico de la ciudad, en donde los sectores con menor presencia vegetal y mayor superficie construida e impermeable localizados los cuadrantes I y IV, presenten mayores rangos de temperatura superficial, en tanto que en los sectores urbanos localizados en los cuadrantes II y III, se espera obtener rangos de temperaturas superficiales más bajos. Un análisis detallado de estas relaciones se realizará en el análisis de resultados correspondiente al capítulo III.

Capítulo II.-Aplicaciones de los sensores remotos en la interpretación del fenómeno de islas térmicas o islas de calor urbano.

En el capítulo II de este trabajo se analizarán los principios básicos de la teledetección espacial y los sensores remotos, así como las características de las diferentes plataformas geoespaciales de generación de data satelital, y su utilidad en los estudios de la isla térmica superficial. También se describirán en este capítulo, las diferentes etapas de procesamiento de las imágenes satelitales trabajadas, así como también el procedimiento de cálculo de los diferentes indicadores y variables que se utilizaran, de forma complementaria, para determinar las asociaciones entre la temperatura superficial, la densidad del espacio construido y la variabilidad de la cobertura vegetal.

Desde los años sesenta los avances en la navegación espacial y en la electrónica han permitido el estudio y reconocimiento de la superficie terrestre, con modernas técnicas de sensores remotos¹⁰.

Un sensor remoto como su nombre lo indica, es un instrumento de percepción capaz de detectar, caracterizar y cuantificar la energía que proviene de objetos situados a distancia, para obtener información de ciertas características o propiedades físicas de

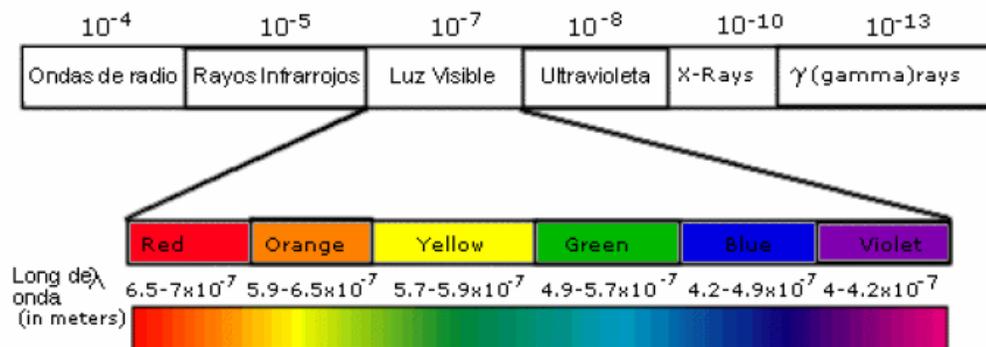
¹⁰ <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history.html>

esos objetos (Lillesand *et al.*, 2008). Según los principios y leyes físicas de la radiación electromagnética todos los cuerpos con una Temperatura T° superior a 0°C grados, emiten radiación electromagnética y esta se incrementa con la temperatura (*Ley de Planck*). A medida que la temperatura T° de un cuerpo cambia, la longitud de onda dominante se desplaza (*Ley de desplazamiento de Wein*) y todo cuerpo negro es un emisor-receptor de energía perfecto (*Ley de Stefan-Boltzman*).

Estos son los principios sobre los cuales se fundamenta la teledetección con sensores remotos, la captación de las señales de energía electromagnética emitida por los cuerpos u objetos de la superficie terrestre, mediante un instrumento de percepción o sensor (Lillesand *et al.*, 2008; Chuvieco, 2007).

Ello requiere, la existencia de una fuente de emisión de energía electromagnética, en este caso el sol, que es reflejada o remitida por la superficie terrestre. Esta energía electromagnética o espectro electromagnético está dividido en regiones o rangos energéticos, que permiten clasificar las radiaciones del espectro de acuerdo a su amplitud e intensidad en: ondas de radio, radiación infrarroja, espectro visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma. (Figura 24).

Figura 24. Espectro electromagnético



Fuente: <http://www.inta.gov.ar/>

Los rangos del espectro electromagnético de interés para la teledetección son la luz visible o espectro visible que abarcan desde 0,4 a 0,7 μm , el infrarrojo cercano de 0,7 a 1,3 μm , infrarrojo medio de 1,3 a 1,8 μm , infrarrojo lejano o térmico de 1,8 a 14 μm y microondas a partir de 1 mm (Lillesand *et al.*, 2008).

A los efectos de este trabajo interesan fundamentalmente las regiones del espectro electromagnético en el rango del espectro visible (*Visible-VIS*), del infrarrojo cercano (*Near infrared-NIR*) y del infrarrojo térmico o lejano (*Thermal infrared-TIR*), ya que a partir de la combinación de la información codificada por el sensor en estas bandas o regiones del espectro, es posible realizar los análisis de usos de suelo, índice de vegetación (*Normalized Difference Vegetation Index-NDVI*) y temperatura superficial del suelo (*Land Surface Temperature-LST*), que constituyen los indicadores básicos

de análisis, a partir de los cuales poder estimar la extensión, intensidad y variabilidad espacial de la islas térmicas o islas de calor superficial en las zonas urbanas.

Existen en operación diferentes sensores remotos o plataformas de teledetección espacial, que pueden proveer esta información en el rango del espectro del infrarrojo térmico (*Thermal infrared-TIR*). Los satélites de la serie LANDSAT (*Thematic Mapper-TM* y *Enhanced Thematic Mapper Plus-ETM+*), así como las plataformas espaciales MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), con diversas características y capacidades de recolección de la información, pueden recabar esta información, dependiendo de los equipos o componentes sensibles de captación de las señales re-emitidas por la superficie terrestre (Richards & Jia, 2006).

En el caso de esta investigación se seleccionó la plataforma espacial LANDSAT 7 ETM+, la resolución radiométrica del sensor y de los satélites de la serie LANDSAT se aprecia en la información de la tabla adjunta (Tabla N° 4), también pueden consultarse en línea, otros datos técnicos en la página web del programa LANDSAT¹¹.

La selección de un determinado sensor o satélite depende de las necesidades del proyecto de investigación en sí mismo, las variables en análisis, el nivel de resolución, la cobertura del sensor, las bandas del espectro en que se colecta la

¹¹ <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

información, la frecuencia con que se genera, la accesibilidad y el costo de la data. En el caso que nos ocupa, la plataforma LANDSAT 7 ETM+, está equipada con instrumentos de teledetección multiespectral¹², por lo que brinda una amplia posibilidad y recursos de análisis, pues no solo colecta data en el rango del espectro visible (*VIS*), sino también en los rangos del infrarrojo cercano (*Near infrared- NIR*) e infrarrojo térmico o lejano (*Thermal infrared-TIR*), fundamentales para los estudios de islas térmicas, además de poseer la mejor resolución disponible en el rango del infrarrojo térmico (60 mts- banda 6), lo cual resulta ideal para los estudios a escalas urbanas (Richards & Jia, 2006; Tabla N° 4).

Aunque LANDSAT 5 TM continua en operación, su resolución espacial en el rango del infrarrojo térmico es comparativamente más baja (120 mts) para estudios a escala urbana (Tabla N° 4), en relación con otras plataformas satelitales que operan en los rangos del infrarrojo térmico (*TIR*) como LANDSAT 7 ETM+ (60 mts) y ASTER (90 mts)¹³.

Los sensores MODIS¹⁴ y AVHRR¹⁵ tienen resoluciones espaciales, más apropiadas para estudios a escalas regionales (1 Km), como los fenómenos de expansión urbana (*urban sprawl*) o los estudios de ecosistemas, cuencas hidrográficas, etc., pero no para estudios que requieren mayor nivel de detalle, como los análisis a escala urbana en este caso asociados al fenómeno de las islas térmicas.

¹² <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

¹³ <http://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp>

¹⁴ <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

¹⁵ http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/AVHRR

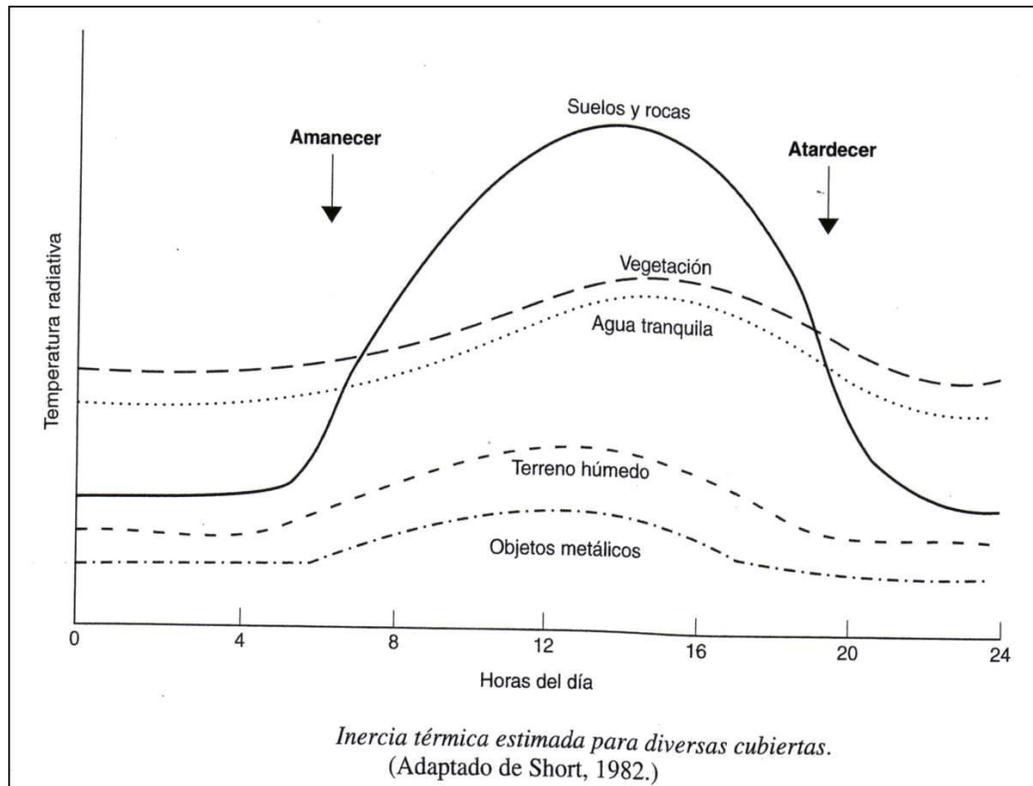
Tabla 4. Resolución espacial de la Serie LANDSAT.

Satellite	Sensor	Bandwidths	Resolution	Satellite	Sensor	Bandwidths	Resolution	
LANDSATs 1-2	RBV	(1) 0.48 to 0.57	80	LANDSATs 4-5	MSS	(4) 0.5 to 0.6	82	
		(2) 0.58 to 0.68	80			(5) 0.6 to 0.7	82	
		(3) 0.70 to 0.83	80			(6) 0.7 to 0.8	82	
	MSS	(4) 0.5 to 0.6	79			(7) 0.8 to 1.1	82	
		(5) 0.6 to 0.7	79			TM	(1) 0.45 to 0.52	30
		(6) 0.7 to 0.8	79				(2) 0.52 to 0.60	30
		(7) 0.8 to 1.1	79				(3) 0.63 to 0.69	30
LANDSAT 3	RBV	(1) 0.505 to 0.75	40	(4) 0.76 to 0.90	30			
		(6) 0.7 to 0.8	79	(5) 1.55 to 1.75	30			
	MSS	(4) 0.5 to 0.6	79	(6) 10.4 to 12.5	120			
		(5) 0.6 to 0.7	79	(7) 2.08 to 2.35	30			
		(7) 0.8 to 1.1	79	LANDSAT 7	ETM ⁺	(1) 0.45 to 0.52	30	
(8) 10.4 to 12.6	240	(2) 0.52 to 0.60	30					
		(3) 0.63 to 0.69	30					
		(4) 0.76 to 0.90	30					
		(5) 1.55 to 1.75	30					
		(6) 10.4 to 12.5	60					
		(7) 2.08 to 2.35	30					
		PAN 0.50 to 0.90	15					

Fuente: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Otro detalle importante a considerar es la hora de toma de la imagen, que depende de las condiciones orbitales del satélite. Esta debía ser, de preferencia, a una hora en que la inercia térmica de los suelos, rocas y superficies impermeables como las que conforman el espacio urbano, se diferenciara claramente de otras coberturas como la vegetación natural y los cuerpos de agua (Lillesand *et al.*, 2008).

Figura 25. Diagrama adaptado de Short.



Fuente: Chuvieco, E, 2007.

Según el diagrama adaptado de Short (Lillesand *et al.*, 2008; Chuvieco, 2007) las mayores temperaturas radiantes en el rango térmico para los sensores remotos, en el caso del suelo y rocas, se alcanzan entre las 8 a.m. y las 16 p.m. (Figura 25), el agua, la vegetación y los suelos húmedos en cambio, observan menor contraste térmico y alcanzan sus mayores temperaturas en horas de la tarde, entre las 13 p.m. y las 18 p.m. (Figura 25).

Los satélites de órbita geo-sincrónica como LANDSAT¹⁶, están diseñados de tal modo que cada vez que éstos cruzan el Ecuador lo hacen de Norte a Sur, entre las 10:00 y las 10:15 de la mañana hora local, por lo resultan ideales para el estudio de fenómenos térmicos ya que a esa hora se está realmente captando, la temperatura radiante de los objetos inertes como suelos, rocas o superficies impermeables, (concreto, asfalto, rocas, suelo desnudo, etc.), que constituyen la mayoría del espacio urbano construido (Figura 25).

2.1.-Ventajas del uso de sensores remotos en el estudio del fenómeno de islas térmicas urbanas.

La aplicabilidad de los satélites de la serie LANDSAT y en particular LANDSAT 7 ETM +, al estudio de fenómenos como las islas térmicas urbanas, es por lo tanto significativa, ya que se pueden obtener no solo imágenes térmicas de moderada resolución (60 mts) de una determinada superficie, sino también análisis complementarios fundamentales para estos estudios, como la caracterización de los usos del suelo asociados al análisis térmico e índices de vegetación, en el mismo tiempo y espacio, y de forma simultánea (Richards & Jia, 2006; Lillesand *et al.*, 2008).

¹⁶ <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Adicionalmente, utilizando técnicas de corrección geométrica de las imágenes en el caso de LANDSAT 7 ETM + (*VIS-NIR* 30mts-*TIR* 60 mts de resolución), se pueden lograr acercamientos a 15 mts de resolución utilizando la banda pancromática para mejorar la resolución espectral en el rango visible, y a 30 mts en el rango térmico, lo cual permite una mayor capacidad de identificación y análisis de las estructuras urbanas, así como de la respuesta térmica observada.

Ello representa una ventaja considerable respecto a otras técnicas convencionales de evaluación de estos fenómenos, como las imágenes térmicas captadas por cámaras o sensores térmicos portátiles (pistola láser infrarroja) y/o los sensores climatológicos, ya que estos solo pueden tomar, registros puntuales, o escanear y registrar datos para áreas o superficies limitadas (Figura 26).

Estos recursos pueden ser de gran utilidad en la realización de auditorías térmicas en empresas y edificaciones, para detectar, fallas, fugas, sobrecargas, etc., pero no para análisis de grandes superficies como centros poblados, ciudades o urbanizaciones (Figura.26).

Figura 26. Pistolas térmicas con o sin cámara infrarroja.



Fuente: <http://www.flir-press.com/>, <http://www.automat.com.ar/x/0/pistolas-infrarrojas.html>

En el caso de sensores como los radiómetros y cámara térmicas infrarrojas, instalados en aviones especiales de investigación y que tienen capacidad de cubrir mayores superficies, estos recursos suponen un alto costo de instalación y operación y son utilizados por agencias espaciales de investigación, generalmente en asociación con las fuerzas armadas de los países, como la NASA, la NOAA¹⁷, etc. En el caso de Venezuela, no se hace uso de estos recursos (Figura 27).

¹⁷ NASA: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.

Figura 27. Sensores térmicos aerotransportados.



Fuente: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/technology/psr/>

2.2.- Estrategias metodológicas de análisis para el caso de estudio de la ciudad de Caracas: Criterios de selección y de preparación de imágenes.

Uno de los pasos previos de análisis de la técnica de detección de temperatura superficial con sensores remotos, supone una revisión exhaustiva de las bases de datos geo-espaciales locales y globales existentes, para determinar la calidad de las imágenes existentes y en consecuencia, la calidad de la información a obtener a partir de las imágenes seleccionadas.

Localmente se visitaron la Agencia Bolivariana Espacial- ABAE, y el Centro de Procesamiento Digital de Imágenes- CPDI, perteneciente a la Fundación Instituto de Ingeniería-FII adscrita al Ministerio del poder popular de Ciencia y Tecnología. Se revisó el banco de datos local disponible para imágenes LANDSAT 7 ETM +, encontrándose dos, de buena calidad y resolución, ambas de la temporada seca para Marzo 2001 y Marzo 2003.¹⁸

Los criterios de selección que se tomaron en consideración en esta primera etapa fueron: 1.-El porcentaje de errores en la imagen o pérdida de información, 2.- estacionalidad, 3.-cobertura de nubes y 4.-metadata¹⁹ completa o disponible. En esta primera etapa se descargaron también vía FTP (*File transfer protocol*), las imágenes satelitales de la serie LANDSAT 7 solicitadas (*Path-row*²⁰ *p004-r053*) para los años 2000, 2001 desde el portal WEB de la Universidad de Maryland (<http://glcf.umiacs.umd.edu/portal/geocover>) y se solicitó al Centro de Procesamiento Digital de Imágenes- CPDI- MppCyT-Venezuela, la correspondiente al año 2003 (<http://www.fii.org/CPDI>).

¹⁸ (LANDSAT 7 ETM+ p004r053_7t20010314_z19_nn) y (LANDSAT 7 ETM+ p004r053_7t20030320_z19_nn).

¹⁹ Metadata: son datos o información complementaria, en formato de tablas o archivos de textos adjunta al archivo de imagen, con información relevante a los efectos del procesamiento de la imagen, como hora y fecha de la toma, elevación, ángulo solar, zona geográfica en UTM, datos técnicos del sensor, etc.

²⁰ El Sistema de Referencia Mundial (Worldwide Reference System - WRS) es un sistema global de numeración para las imágenes LANDSAT. Este sistema de numeración permite al usuario obtener la ubicación de una imagen satelital obtenida por los satélites LANDSAT de cualquier parte del planeta simplemente especificando el par ordenado de la escena (imagen) que está definido por el PATH (órbita aproximada del satélite) y ROW (centro nominal de la escena o imagen). <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/wrs.html>

La actualización de esta información, bajo los criterios de selección anteriormente definidos a partir del año 2003 hasta el presente, requería la revisión de bases de datos más extensas donde pudiera obtenerse información satelital para años más recientes, ya que en las bases de datos locales nacionales, la información disponible solo abarca hasta marzo del año 2003.

Se realizaron búsquedas vía Internet en repositorios globales de datos para la adquisición de imágenes satelitales más recientes, como el portal WEB de la *Global Landcover Facility-USGS: GloVis* (<http://glovis.usgs.gov>), donde existen recursos disponibles para investigadores y académicos a nivel global. Se consultaron también portales WEB y documentos técnicos de la misión LANDSAT de la NASA, para revisión de datos técnicos de la serie LANDSAT 7 ETM+, fundamentalmente por los problemas de balanceo del satélite, que originan un bandeo o saltos de información (*Scan Line Corrector- SLC-Off mode*), en las imágenes adquiridas por el sensor a partir de Mayo del 2003 hasta Febrero 2012 (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>).

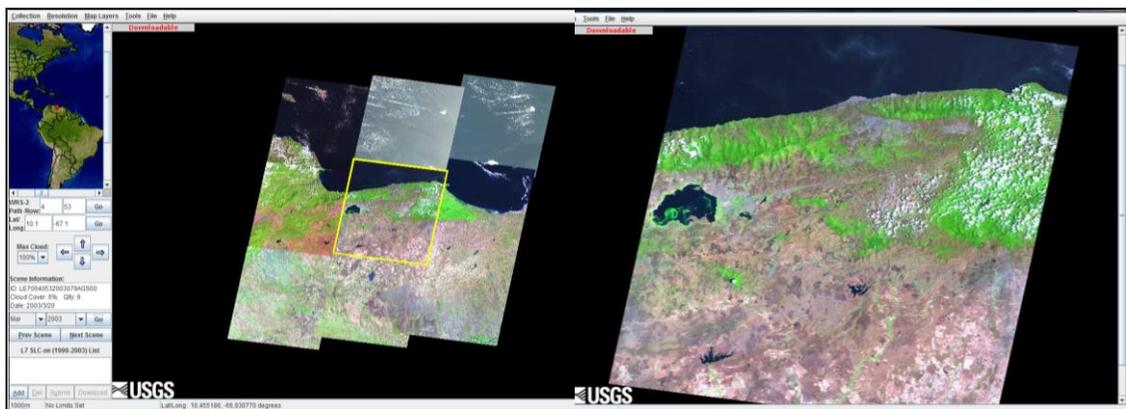
El archivo global de datos Geo-espaciales más extenso con información sobre distintos sensores remotos es el portal *GloVis* de la USGS (<http://glovis.usgs.gov>), desde aquí se pueden realizar descargas de datos satelitales orto-rectificados²¹ en formato *Geotiff*, para la serie LANDSAT 4, 5 y 7, MODIS, AVHRR, ASTER, entre otros sensores. Las colecciones de imágenes LANDSAT 7 ETM +, sin problemas de

²¹ Data satelital corregida geoméricamente con modelos topográficos o de elevación DEM, que permiten su uso en sistemas de información geográfica.

balanceo o en modo *SLC On mode*, abarcan desde Agosto de 1999 hasta Mayo del 2003 y en modo *SLC-Off mode*, desde Agosto de 2003 hasta Febrero del 2012. Las imágenes LANDSAT 7 ETM+ ya incorporan correcciones geométricas para compensar el error, lo que permite su uso e integración en un Sistema de Información Geográfica-SIG (USGS 2011; NASA, 2010).

El visualizador del portal permite además realizar una primera inspección de la información seleccionada (Figura 28) e inclusive de la metadata de la imagen, este recurso es de gran ayuda en la escogencia de los datos ya que no requiere descarga previa para revisar las informaciones relativas a la calidad de la imagen escogida, lo que supone un ahorro considerable de espacio y horas de computación.

Figura 28. Repositorio Global-Glovis-USGS.



Fuente: <http://glovis.usgs.gov>

Adicionalmente, el portal posee otros recursos SIG (sistemas de información geográfica) que permiten desplegar capas con información sobre límites territoriales,

centros poblados, vialidad, para facilitar la identificación y localización de la información requerida, aun con una cobertura de nubes importante sobre la imagen.

Una vez seleccionadas las imágenes requeridas se procede a descargarlas en formato comprimido, para luego proceder a su restitución y procesamiento. En total se seleccionaron y procesaron de este portal *GloVis* 32 imágenes LANDSAT 7 ETM+ *Path-row*²² (p004-r053) desde marzo del 2001 a enero 2011, se ajunta en anexo la rutina de procesamiento y un listado de las imágenes seleccionadas (Anexos N° 2 y 3).

En cada caso se intento dar cobertura anualmente a la variabilidad estacional, es decir imágenes del periodo seco y húmedo.

Los problemas más frecuentes encontrados, en términos de calidad de la información en el periodo seco fueron: trazas de humos de incendios en la imagen o de nubes estratiformes de alta reflectancia, típicas de este periodo y que alteran las lecturas de la banda térmica, (como pudo comprobarse posteriormente en el procesamiento de las imágenes) situaciones que ocurren con frecuencia durante los meses de marzo y abril, y en el caso del periodo húmedo, la abundancia en la cobertura nubosa que impide una visualización adecuada del área de estudio.

Las imágenes con alteración en la lectura de la banda térmica, debido a alguno de los problemas anteriormente descritos fueron descartadas en este estudio. La

²² <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/wrs.html>

probabilidad de lluvias en el periodo lluvioso fue verificada con los registros diarios de las estaciones.

2.3-Procesamiento de las Imágenes, etapas y rutinas de procesamiento utilizadas:

Previa a la descarga de la información satelital requerida, fue necesario realizar un inventario de *software* y *hardware* disponible para el procesamiento de imágenes, ello fue fundamental pues definió las necesidades de capacitación, así como las rutinas de procesamiento. Se solicitó la colaboración del Laboratorio de Simulación y Estudios Ambientales SIMEA del Instituto de Zoología y Ecología Tropical- IZET de la Universidad Central de Venezuela, para el préstamo de licencias de software ya que este laboratorio cuenta con Licencias *ERDAS 9.1* y *ArcGis 9.2*, que se utilizaron tanto en la preparación como en el procesamiento de los datos.

Se obtuvo gracias al SIMEA-IZET un préstamo de licencia *ERDAS 9.1* con la que se realizó las rutinas de restitución y procesamiento de las imágenes que posteriormente se integraron en un *SIG* (Sistema de Información Geográfica), que opera de modo alternativo tanto desde *Arcview 3.2 (desktop)* como desde *ArcGis 9.2*.

Las etapas de procesamiento de las imágenes desarrolladas, a los efectos de este estudio, pueden dividirse en 3 fases: Etapa inicial, intermedia y avanzada (Anexo N° 2).

2.3.1 Etapa Inicial.

La rutina o etapa inicial de pre-procesamiento de las imágenes seleccionadas, requiere los siguientes pasos:

- 1.- Selección, revisión metadata, calidad, errores y descarga de la información en formato comprimido (*.winrar) desde el portal *Glovis*.
- 2.- Descompresión y alojamiento de la información en hardware local, en carpeta debidamente identificada con el mes y el año al que corresponde la imagen (repositorio datos del proyecto). Ello para evitar errores de procesamiento, debido a que se cuentan con diferentes imágenes para un mismo año (Anexo N° 3).

Repositorio de datos:

<i>Ejemplo: CCS-may-2001.</i>

2.3.2 Etapa Intermedia.

- 1.-Restitucion o recomposición de la imagen con ERDAS 9.1. Para cada año se generaron dos imágenes: Una con las bandas del espectro visible y otra para el infrarrojo térmico. La imagen del espectro visible se reconstituyó, considerando las bandas del espectro visible *VIS* (1, 2, 3, 4, 5) más el infrarrojo cercano *NIR- Near infrared* (7) todas con 30 mts de resolución y la del térmico *TIR Termal-infrared* con la banda 6 (6-1 y 6-2), a 60 mts de resolución (Anexo N° 2).
- 2.- Las escenas de las imágenes *LANDSAT 7 ETM+ p004r053* fueron re-muestreadas y reproyectadas pixel al pixel con ERDAS 9.1, para generar los *subsets* (Lat/Long,

WGS84) correspondientes al área de estudio localizada entre las coordenadas 66° 70'02'' y 67° 09'98'' con 10 ° 55' 01'' y 10° 35' 01'', (Figura. 1). El objetivo de este procedimiento es integrar la imagen en un *SIG*, para poder desplegar coberturas vectoriales que enriquecen el análisis y facilitan la identificación de los sectores urbanos (Anexo N° 2).

3.- Tomando en consideración las coordenadas del área de estudio, se procedió al corte de los subsets formato *.img, (formato de imagen de ERDAS), tanto para espectro visible- como para infrarrojo térmico, y se les colocó un subíndice (*vis / tir*) para diferenciarlas apropiadamente.

Las etapas avanzadas del proceso de procesamiento de las imágenes, suponen la obtención de las clasificaciones de uso del suelo, índice de vegetación-*NDVI* y análisis térmico-*LST*, a partir de los cuales se elaboraron los diferentes análisis y mapas para los diferentes años del periodo (Anexo N° 2).

2.3.3 Etapa Avanzada.

Las etapas avanzadas de procesamiento implican el desarrollo de los análisis de clasificación de uso del suelo e Índice de Vegetación (*NDVI- Normalized Difference Vegetation Index*) con los subsets de las imágenes en espectro visible y el análisis de temperatura superficial (*LST-Land Surface Temperature analysis*) con los subsets de la banda térmica para cada mes y año seleccionados (Anexo N° 2).

2.4- Recursos complementarios de análisis con sensores remotos.

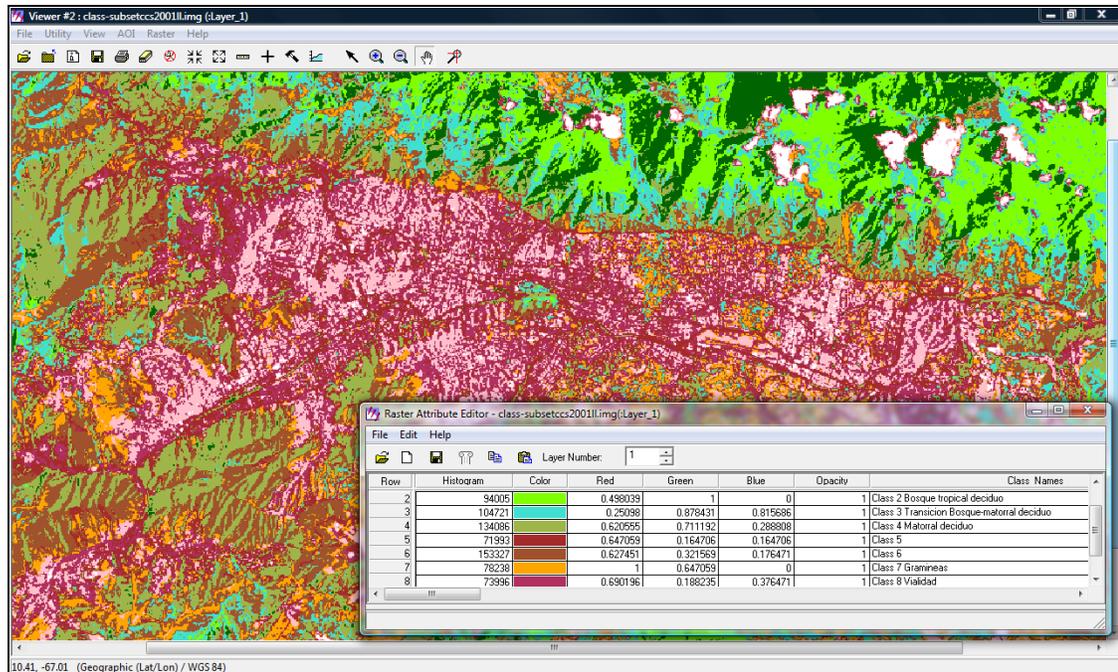
Los recursos complementarios de análisis se refieren a las fases avanzadas del procesamiento de las imágenes seleccionadas. En este caso, se desarrollaron 3 tipos de análisis: Clasificaciones de uso del suelo, Índice de Vegetación y Temperatura superficial. A continuación se describe en detalle, el proceso realizado.

2.4.1-Clasificaciones de uso del suelo.

Las clasificaciones son recursos de análisis de imágenes (*image analysis*), que permiten agrupar píxeles con características similares, para formar clases de acuerdo a los valores digitales (*Digital numbers-DN*) o de reflectancia de los píxeles. Estos análisis pueden realizarse de manera automática, semiautomática o dirigida. Las clasificaciones automáticas se realizan con una mínima intervención del usuario, apenas es posible determinar el número de clases y de iteraciones.

En el caso de la semiautomática, el usuario puede definir criterios de búsqueda o rangos de valores para determinados usos, o coberturas (Figura 29; Anexo 2). Se utiliza para corregir y ajustar las clasificaciones automáticas en los casos en que el usuario tiene un conocimiento previo del área de estudio y la dirigida, cuando se conoce poco el área de estudio y/o se requiere de un alto nivel de precisión en la determinación de clases. En este caso es necesaria la toma de muestras de píxeles o *semillas*, que se asociaran a coberturas o usos específicos (Lillesand *et al.*, 2008; Chuvieco, 2007).

Figura 29. Clasificación Semiautomática



Fuente: USGS Landsat 7 collection. Elaboración propia.

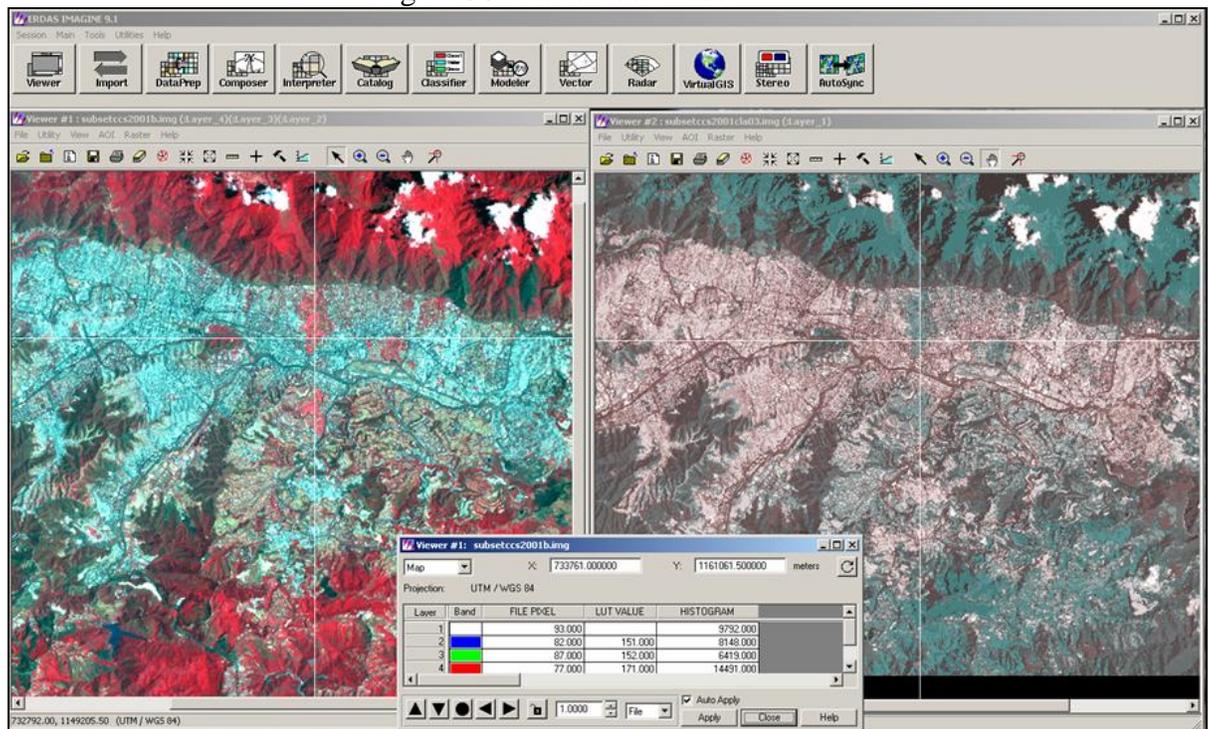
2.4.1.1-Técnicas de exploración y verificación de resultados.

Los programas de procesamiento satelital e información geográfica como *ERDAS 9.1*, permiten una técnica de exploración de datos que geo-vincula los modelos raster producidos, de usos e índice de vegetación, etc., con la imagen fuente o imagen de origen, en este caso los subsets de las imágenes satelitales seleccionadas. Utilizando el modo de doble visor vinculados geográficamente entre sí, (esta es una función directa del programa), se puede explorar el modelo raster²³ y observar sus correspondencias en la imagen fuente, así como los valores espectrales o rangos

²³ El formato raster de la imagen, o imagen matricial, mapa de bits o mapa de píxeles, es un archivo digital de imagen compuesto por píxeles, la menor unidad digital que compone una imagen.

espectrales en que oscilan los píxeles de una determinada categoría de usos o temperaturas del modelo raster, en la imagen multispectral (Figura 30).

Figura 30. Modo doble visor

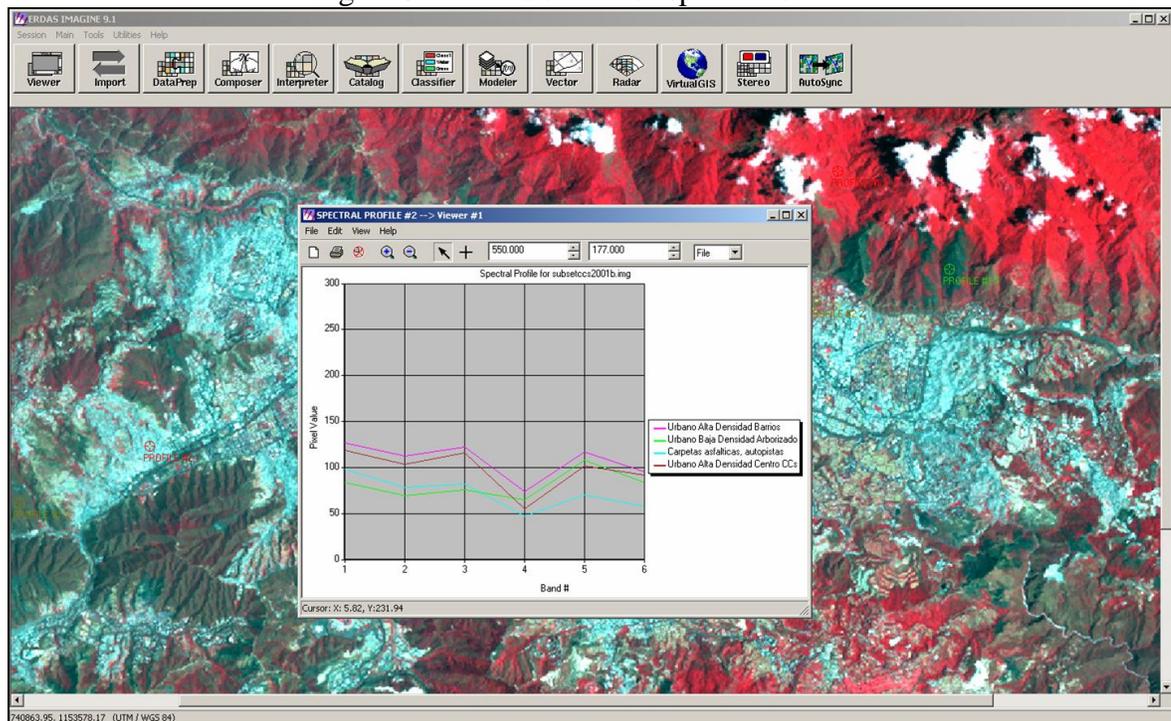


Fuente: USGS Landsat 7 collection. Elaboración propia.

Ello permite, no sólo definir con mayor precisión una categoría de uso, o clase del modelo raster en base a los rangos espectrales, sino también observar las asociaciones de estas clases, con la variabilidad de usos presentes en el mosaico urbano (Figura 30). Para asegurar la representatividad de las clases, deben adicionalmente realizarse análisis de firmas espectrales y separabilidad de clases. Para el análisis de firmas espectrales, se toman muestras de las clases definidas y se analiza la separabilidad de

las mismas en las distintas bandas de la imagen multispectral (Lillesand *et al.*, 2008; Figura 31).

Figura 31. Análisis firmas espectrales.



Fuente: USGS LANDSAT 7 ETM+ Collection. Elaboración propia.

Cuanto mejor sea la separabilidad, mejor será la definición y delimitación espacial de las clases (Anexo 4; Figura 31). El análisis de separabilidad por su lado, permite corroborar estas definiciones, ambas técnicas exploratorias, ayudan a garantizar los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital de imágenes, sobre todo cuando se utilizan técnicas de clasificación basadas en los valores espectrales de los píxeles y no, como en el caso del análisis térmico, basadas en la decodificación de los valores de temperatura de los píxeles en la banda térmica (Lillesand *et al.*, 2008).

Las clases definidas por estos métodos de clasificación anteriormente descritos, deben ser representativas de las unidades presentes en el mosaico urbano. Para la ciudad de Caracas, tomando en consideración el nivel de resolución (30 mts VIS- NIR), se definieron, 15 unidades representativas de los usos predominantes y de la vegetación presente en el área de estudio (Figura 32, Mapas 31, 32, 33).

Figura 32. Leyenda de Clases de Uso de Suelo.

LEYENDA		
Clases de Uso del Suelo.		
1		Bosque húmedo
2		Bosque húmedo vertientes
3		Transición bosque húmedo-bosque semideciduo
4		Bosque semideciduo vertientes
5		Transición bosque semideciduo-matorral deciduo
6		Transición matorral deciduo -gramíneas
7		Vialidad principal
8		Matorral deciduo intervenido
9		Matorral deciduo conservado
10		Urbano media densidad
11		Urbano baja densidad-suelo desnudo
12		Vegetación degradada quemada
13		Urbano moderada-alta densidad
14		Urbano muy alta densidad
15		Superficie de alta reflectancia

Fuente: Bases de datos del proyecto, elaboración propia.

Dado que el fenómeno de isla térmica urbana se expresa con mayor intensidad durante la época de sequía y, en el caso de la ciudad de Caracas (de acuerdo al análisis de los registros climatológicos y de geotermómetros específicamente), durante el mes de marzo, se seleccionaron las imágenes de este mes para realizar los

análisis comparativos de usos del suelo, vegetación y temperatura superficial en la ciudad, respectivamente para los años 2001, 2003 y 2010.

Adicionalmente, las imágenes seleccionadas, resultaron ser las mejores en términos de la calidad información. A los efectos de este trabajo, se utilizó la clasificación semiautomática, debido al conocimiento previo del área de estudio, lo que facilitó la identificación y separación de las clases.

2.4.2- Procedimiento de cálculo de Índice de Vegetación-NDVI.

El índice de vegetación normalizado *Normalized Difference Vegetation Index- NDVI*, permite determinar el contenido de agua en la vegetación, según la Ec.3²⁴.

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

Ec.3:

Donde ρ_{IRC} y ρ_R indican la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y en el rojo, respectivamente. Los índices de vegetación (*NDVI*) desarrollados, igualmente para los años 2001-2003 y 2010 (Mapas N° 28, 29 y 30), no solo ayudan a definir mejor las categorías urbanas, ya que el índice *NDVI* permite diferenciar con gran precisión la presencia de vegetación intra y peri-urbana, (esencial para ayudar a

²⁴ Índice de vegetación de diferencia normalizada (*NDVI*), (Chuvieco, 2007)

diferenciar las superficies impermeables asociadas a los usos urbanos de alta, media y baja densidad con o sin arborización), sino también para determinar los niveles de estrés hídrico de la vegetación. Este aspecto es esencial en esta investigación, ya que el rol de mitigación del calor superficial y ambiental que provee la vegetación, se pierde por la condición de deshidratación y el elevado *stress* hídrico de las plantas en circunstancias de severas sequías y calor (Weng *et al.*, 2008; Córdova, 2011a).

Cuando una planta está sometida a unas condiciones significativamente diferentes de las óptimas para la vida se dice que está sometida a *estrés*; si bien las diferentes especies o variedades difieren en sus requerimientos óptimos y por tanto en su susceptibilidad a un determinado estrés (Hsiao 1973; Levitt ,1980 en: Valladares, F. *et al.*, 2002).

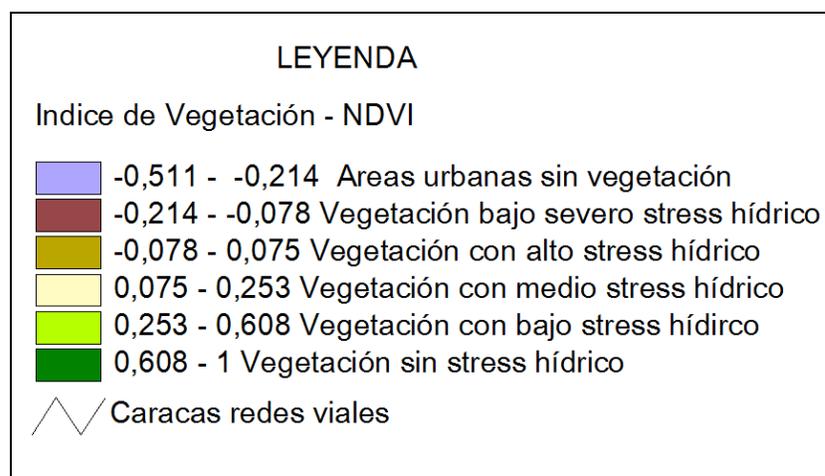
La disponibilidad hídrica está considerada como el principal factor que afecta la actividad de las plantas. Esta falta de agua o déficit hídrico sería la tensión o *estrés* que actuaría sobre las plantas, y toda tensión produce dos tipos de respuesta en los organismos: respuestas que tienden a evitar o prevenir la tensión (*mecanismos evitadores*) y mecanismos o adaptaciones que permiten soportar o resistir el estrés (*mecanismos tolerantes*) (Valladares, F. *et al.*, 2002).

Sin embargo, las plantas han evolucionado hacia el desarrollo de mecanismos que evitan el déficit hídrico como señala Levitt (1980), mientras que los mecanismos tolerantes serían un factor que complementarían a los mecanismos anteriores. En la estrategia *evitadora* del estrés hídrico las plantas previenen o minimizan la

penetración del estrés en sus tejidos, ya que éstos son muy sensibles a la deshidratación. Las especies que siguen esta estrategia o bien maximizan la absorción de agua (*sistemas radiculares profundos*) o bien minimizan las pérdidas de agua (*cierre estomas, hojas pequeñas, bajas tasas de transpiración, caducifoliedad, etc.*) (Levitt 1980 en: Valladares, F. *et al.*, 2002).

Una vez calculados los índices de vegetación-*NDVI*, para los años seleccionados, se utilizó una técnica de coloreado, para ayudar en el proceso de visualización y separación de las clases²⁵, un ejemplo de los resultados obtenidos con la técnica, se observa en la leyenda (*NDVI*, marzo del año 2010) Figura 33.

Figura 33. Ejemplo de Rangos de NDVI.



Fuente: USGS Landsat 7 collection. Elaboración propia.

²⁵ Rangos de estrés hídricos determinados mediante el cálculo del NDVI, como se observan en la leyenda de la figura 33.

De acuerdo con Chuvieco, 2007, los valores de este indicador oscilan entre -1 y +1, siendo el umbral crítico para coberturas vegetales un valor de NDVI alrededor de 0,1. Valores inferiores a 0,1 indican condiciones de alto *estrés hídrico* (colores del marrón al crema), vegetación degradada por quemas y/o desforestación, o coberturas impermeables-artificiales no vegetales (color marrón al gris). En el caso de la vegetación en condiciones normales de humedad (color verde pálido al verde hoja) los valores oscilan entre 0,5 y 0,7 (Chuvieco, 2007).

2.4.3-Procedimiento de cálculo de la temperatura superficial-LST.

La serie LANDSAT 7 ETM + posee una banda termal que recoge datos en la longitud de onda de 10.40 -12.50 μm ., esta banda puede ser convertida a temperatura utilizando la información del manual de calibración de instrumentos para LANDSAT 7 ETM + (*Landsat-7 User's Handbook*, 2007; Schott & Volchok, 1985; Chander and Markham, 2003).

La transformación o decodificación de la información de temperatura captada en la banda térmica del sensor (*método monocanal*), es una técnica de cálculo conocida en sensoramiento remoto, como algebra de imágenes. Mediante esta técnica es posible hacer editable la estructura de datos matriciales de la imagen (formato *GRID), para introducir ecuaciones de cálculo que permiten entre otras funciones, transformar los valores codificados o DN (*Digital Number*) de los píxeles de la imagen. Los valores de temperatura superficial (*Land Surface Temperature-LST*) se derivaron de la banda

6 del infrarrojo térmico (10.44 a 12.42 m), en modo de alta ganancia (6-2 *high gain*) que tiene una resolución espacial de 60 m LANDSAT 7 ETM + (Qin *et al.*, 2001; Barsi *et al.*, 2003; Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003).

Para ello es necesario convertir los números digitales (*DN*) de la banda térmica, en radianza espectral o reflectancia²⁶ (*LA*), utilizando la Ecuación (NASA, 2010; Chander and Markham, 2003):

Ec. (1):

$$LA = GAIN \times 6 \text{ Band DN} + OFFSET$$

(Para LANDSAT 7 ETM+ $LA = 0.0370588 \times 6\text{-}2 \text{ Band DN} + 3.2$)

Donde:

(*LA*): es la radianza espectral de los píxeles de la banda térmica expresados en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,

Gain/DN: es la variación en la función de conversión radianza/DN según el valor de los píxeles de la imagen,

DN: es el valor de un determinado píxel (0-255), y offset es la intercepción de la función de conversión de radianza/DN. Los valores de ganancia (*Gain*) y compensación (*Offset o BIAS*) pueden ser encontrados en la metadata de la imagen.

²⁶ Según los principios y leyes físicas de la radiación electromagnética todos los cuerpos con una Temperatura- T° superior a $0^\circ C$ grados, emiten radiación electromagnética o radianza espectral y esta se incrementa con la temperatura (*Ley de Planck*)

Los valores de radianza para la banda térmica de LANDSAT 7 ETM +, fueron transformados de temperatura superficial radiante en grados kelvin (°K) a temperatura de brillo (T_b) en grados centígrados (°C), usando las constantes de calibración del *Landsat-7 Science Data User's Handbook*, según la Ec.2 (Schott & Volchok, 1985; Barsi *et al.*, 2003; Chander and Markham, 2003; NASA 2010):

Ec. (2):

$$T_s (\text{Landsat}) = K2 / \ln((K1 / L_\lambda) + 1) - 273$$

Donde:

T_s , es la temperatura efectiva del satélite en K, $K1$ y $K2$ son constantes de calibración (Pre-lanzamiento), para LANDSAT 7 ETM + (Schott & Volchok, 1985):

$$K1 = 666.09 \text{ w}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m}) \text{ y } K2 = 1281.71\text{K}.$$

Para obtener la temperatura de superficie (T_s) a partir de la temperatura de brillo se utilizó el algoritmo de corrección monocanal (Qin *et al.*, 2001, Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003).

Ec. (3):

$$T_{sup} = (a6 (1-C6-D6) + [b6 (1-C6-D6) + C6 + D6] T_s - D6 T_a) / C6 \quad (3)$$

Donde

T_{sup} es la temperatura de superficie (K),

T_s es la temperatura de brillo (K) de la banda 6 del satélite LANDSAT 7 ETM +,

T_a es la temperatura efectiva media atmosférica (K), a_6 y b_6 son constantes para temperatura de superficie entre 273.5 K y 343.5 K. ($a_6 = -67.355351$ y $b_6 = 0.458606$).

2.4.3.1 Ajuste por efectos de atmosfera o Corrección atmosférica.

En los días con humedad baja en las latitudes subtropicales, las bandas térmicas de LANDSAT 7 parecen proporcionar estimaciones muy precisas de la temperatura de superficie sin necesidad de corrección atmosférica (Wang y De Liberty, 2005).

La corrección atmosférica de imágenes de satélite es un paso crítico en el procesamiento de imágenes donde la influencia de la atmósfera se elimina o se reduce grandemente. La temperatura radiante en la parte superior de la atmósfera (*TOA-Top of the atmosphere*) es generalmente más baja que la temperatura de la superficie, pero es posible que estos valores se inviertan cuando la atmósfera está más caliente que la superficie. Esta diferencia requiere un proceso de corrección o ajuste atmosférico, para dar cuenta de la absorción atmosférica y la emisión, principalmente causada por el vapor de agua. (Barsi *et al.*, 2003; Wang y De Liberty, 2005).

Un recurso de acceso público es la herramienta de corrección atmosférica MODTRAN, desarrollada en un sitio web (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) para la banda térmica de los sensores LANDSAT-5 y LANDSAT-7. El modulo de Corrección Atmosférica -MODTRAN utiliza parámetros de los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP), para modelar perfiles atmosféricos globales

interpolados a una determinada fecha, hora y lugar como entrada. Estos parámetros se pueden aplicar a la banda térmica del Landsat-5 Thematic Mapper (TM) o de Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) para inferir una temperatura en la superficie cinética para cada pixel en la escena (Barsi *et al.*, 2003).

En este caso se utilizó el módulo AT-COR (corrección atmosférica) de *ERDAS IMAGINE 9.1* (el software de procesamiento de las imágenes) para eliminar trazas de nubes o de humos y el módulo MODTRAN de corrección atmosférica, que se aplica a las imágenes LANDSAT para garantizar que los contrastes térmicos dentro de las imágenes, se deban a diferencias reales en la temperatura de la superficie y no causados por efectos atmosféricos. Ello fue necesario en el caso de algunas imágenes analizadas para los meses de lluvias (mayo, junio, julio, septiembre, octubre), o donde fue detectado con los registros climatológicos diarios (Estaciones La Carlota y UCV) un alto contenido de humedad atmosférica y/o precipitaciones (Anexo 2).

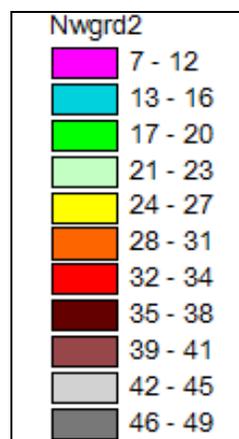
Una vez realizado el procedimiento de cálculo o álgebra de imágenes, se obtiene un modelo raster de temperaturas en °C para las diferentes imágenes analizadas, comprendidas en el periodo entre marzo 2001 a enero 2011 (Anexo 3).

A los efectos del análisis y basados en los resultados obtenidos, fueron generados 11 rangos de temperaturas para diferenciar las distintas categorías de vegetación, de los espacios construidos con mayor o menor presencia vegetal, así como también, superficies quemadas, suelos desnudos, entre otros. Se utilizaron los mismos rangos

de temperaturas para establecer comparaciones entre diferentes los análisis y observar los cambios en los patrones de la temperatura superficial (Figura 34).

Los rangos entre 7-12 °C generalmente corresponden a topes de nubes bajas aisladas, y en algunos casos también, se pueden observar estas temperaturas puntualmente, sobre grandes edificaciones de almacenaje (hipermercados-almacenes) con sistema central de enfriamiento, estos resultados serán discutidos en el capítulo III de este trabajo (Figura 34).

Figura 34. Rangos de temperaturas superficiales.



Fuente: Bases de datos del proyecto.

En las imágenes de LANDSAT 7 ETM+ del 2003 en adelante que presentan bandeo²⁷ (Mayo 2003 hasta Febrero 2012), esta categoría puede coincidir también con el error en la toma de datos por el sensor. Afortunadamente el bandeo no cubre toda el área y permite la interpolación de valores para la generación del modelo raster

²⁷ Bandedo o saltos de información (*Scan Line Corrector- SLC-Off mode*).

de temperatura superficial (*LST*), previo a una selección de los valores de números digitales-*DN* dentro del bandeo, información que se utiliza para acotar la transformación de los *DN* de temperatura de brillo-*Tb* a temperatura superficial-*Ts* fuera de estos rangos.

Los rangos entre 13-16 °C generalmente corresponden a la base de nubes bajas, aunque también es posible encontrar estos valores en los puntos más altos del Parque Nacional El Ávila sobre los 2000 msnm, debido en este caso, al gradiente altotérmico y a la condensación de la humedad en las partes altas de la montaña (Ataroff, M, 2001; Mapas Temperatura superficial 1-27; Mapas clasificación de usos 31-33).

Los valores de temperatura superficial entre 17 a 20 °C generalmente se corresponden con vegetación con alto contenido de humedad, como los bosques húmedos sobre los 1600 msnm que se observan en la ladera sur del Ávila. Los bosques semidecíduos en cambio, presentan rangos de temperatura entre 21-23 °C.

Las gramíneas y el matorral decíduo, que durante la época de sequía presenta niveles más elevados de estrés hídrico (de acuerdo a los resultados obtenidos al realizar los análisis de índice de vegetación-*NDVI*), tienen valores promedios de temperatura superficial entre 24-27 °C. En el caso de la vegetación degradada por deforestación y quemas, los rangos de temperatura aumentan entre 28-31 °C. Donde los focos de incendios se encontraban activos al momento del paso del sensor sobre la zona, las temperaturas se incrementan considerablemente entre 39 a 49°C.

Los rangos de temperaturas urbanas son más elevados que los de las áreas naturales, debido precisamente a que son superficies secas e impermeables, como el concreto, asfalto, ladrillo y otros materiales de construcción, que alteran el balance hídrico y radiativo superficial, induciendo en consecuencia, un aumento de la temperatura en las áreas urbanas (Chen *et al.*, 2006; EPA, 2009; Córdova, 2011a).

Es posible sin embargo detectar diferencias en los rangos de temperaturas urbanas, que guardan relación con la densidad constructiva urbana y con la calidad de los materiales de construcción de las viviendas de los sectores de bajos ingresos (Córdova, 2011a).

Rangos entre 24-27 °C se asocian a sectores urbanos arborizados de baja o moderada densidad. Temperaturas superficiales entre 28 a 31 °C en cambio, son comunes en los sectores menos arborizados y densamente construidos del oeste y sur oeste de la ciudad. Los suelos desnudos por desforestación, movimientos de tierras etc., presentaron altos valores de temperatura superficial entre 32 a 34 °C, estos aspectos serán comentados con más detalle, en el capítulo III de este trabajo (Córdova, 2011a; Figura 34).

2.4.4- Integración bases datos e imágenes raster-vectorial. Desarrollo del sistema de información geográfica-SIG del proyecto.

Uno de los problemas más comunes detectados en la revisión bibliográfica realizada sobre las investigaciones acerca del tema de las islas térmicas urbanas; así como

también en eventos y foros internacionales sobre la temática²⁸, es el problema de la baja resolución espacial de algunos sensores como ASTER, MODIS, AVHRR (90 m a 1 Km), que limitan la comprensión y análisis de fenómenos locales como las islas térmicas urbanas, debido a que los bajos niveles de resolución espacial de la banda térmica de estos sensores, obligan al empleo de escalas de análisis regional por Ejemplo: E: 1.250.000, en los estudios.

La complejidad inherente al mosaico urbano, requiere escalas de análisis detalladas (E. 1: 25.000, 10.000, 5.000) o superiores, en caso de que se trabaje a nivel de unidades residenciales o pequeñas áreas. En este caso la resolución de 30 mts en el visible para LANDSAT 7 ETM+, se ajusta bien a escalas 50.000 (OLAVE-SOLAR *et al.*, 2008) con ajuste pancromático, para llevar el nivel de resolución a 15 mts, se puede trabajar a escala 1:25.000 (Fallas, J; 2003). Las imágenes LANDSAT con niveles de corrección geométrica GI^{29} y ajuste por modelos de terreno (*Digital Elevation Model-DEM*), pueden re-muestrearse para mejorar el nivel de resolución espacial de la imagen, las técnicas más usadas se describen en el manual del sensor (NASA, 2010). La resolución moderada de la banda térmica (60 mts) permite acercamientos a escala 1.100.000, una buena escala de trabajo para visualizar la extensión e intensidad del fenómeno, pero todavía con bajo nivel de detalle a escala urbana (Fallas, J, 2003; Tabla N° 5).

²⁸ <http://green-changemakers.blogspot.com/2010/02/urban-research-symposium-2009.html> ;
<http://urs2009.net/>

²⁹ http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html

A esta escala, a pesar de que es posible identificar algunos patrones en el modelo raster de temperaturas y asociarlos a la morfología urbana de la ciudad, es todavía difícil, determinar con precisión, sectores y elementos propios del paisaje urbano, así como límites administrativos, usos y otras características socio-ambientales en la ciudad (Anexo 2, Figura 35a). A los efectos de mejorar la resolución espacial de los análisis fue necesario re-muestrear con *ERDAS 9.1*, la banda térmica con una resolución espacial de 60 m a 30 m³⁰, para hacer comparables los análisis entre las bandas del espectro visible y el térmico (Wang y De Liberty, 2005).

Tabla 5. Equivalentes Cartográficos de las resoluciones espaciales LANDSAT ETM+

<i>Resolución espacial/tamaño del pixel</i>	<i>Escala cartográfica</i>
15 metros (pancromático)	1: 25.000
30 metros (VIS)	1: 50.000
60 metros (TIR)	1: 100.000

Fuente: Olave-Solar *et al.*, 2008, Fallas, J. 2003. Elaboración propia.

Adicionalmente, la integración de los modelos raster de temperatura con coberturas vectoriales de (topográficas, de calles, límites administrativos) en un sistema de información geográfica, fue la respuesta para obtener mayor precisión en los análisis a escala urbana (Anexo 2, Figura 35b). Para ello fue necesario, como se describió

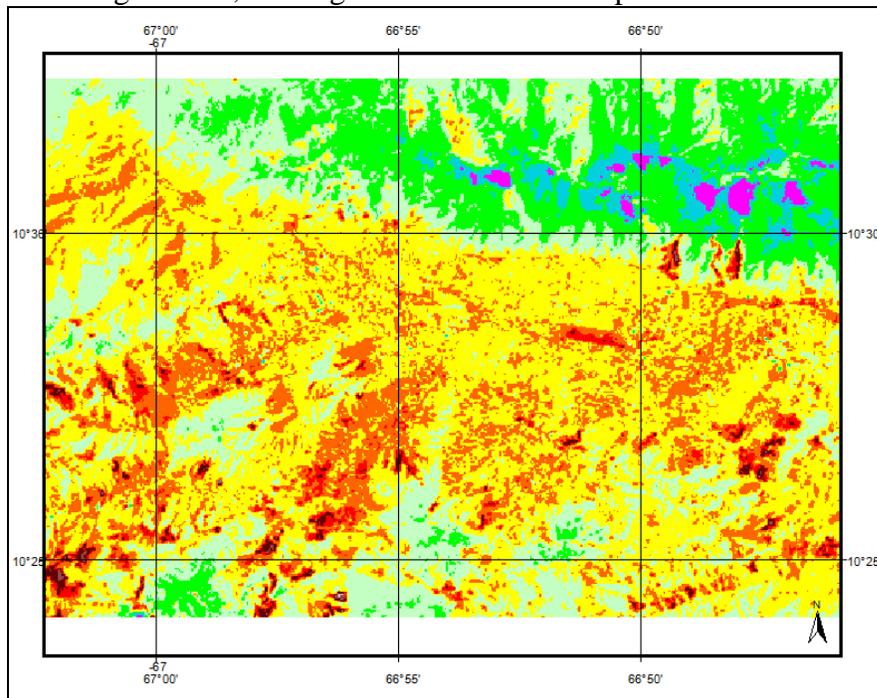
³⁰ http://landsat.usgs.gov/documents/about_LU_Vol_4_Issue_Special_Edition.pdf

anteriormente en las etapas de procesamiento de la data geoespacial seleccionada, corregir geoméricamente (pixel a pixel) con *ERDAS 9.1* las imágenes y los sub-set de imágenes generados de UTM/WGS84 (formato *Geotiff* original de la data) a Lat/LongWGS84 (formato modificada de la data), el ajuste de las capas vectoriales se realizó con *ArcGis 9.2*, a los efectos del desarrollo cartográfico del trabajo.

En ambos casos tanto *ERDAS 9.1* como *Arc-Gis 9.2*, los programas de procesamiento de imágenes satélite e información geográfica, permiten los ajustes de proyección y escala. Este proceso facilitó el aprovechamiento de la información geoespacial derivada de las imágenes satelitales, permitiendo el ajuste de la información de una escala meso (E. 1:100.000) a una escala de trabajo urbana mas local (E.1:50.000-25.000), que pudiera ser de utilidad a los planificadores urbanos y/o a la gestión ambiental de la ciudad.

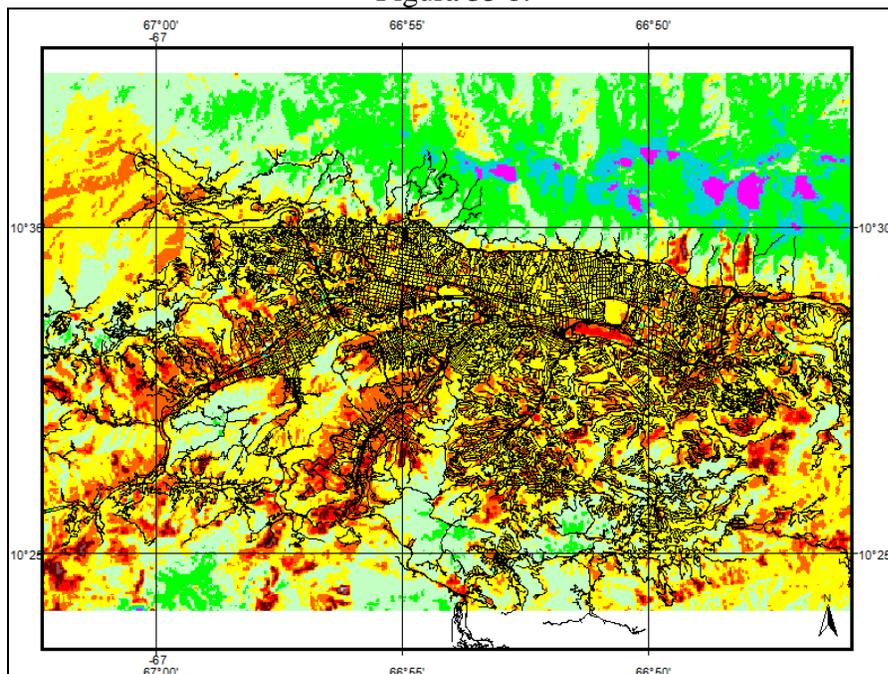
Adicionalmente, gracias a los atributos que describen las coberturas vectoriales de calles, es posible la localización de direcciones y sectores urbanos, permitiendo asociar las respuestas térmicas obtenidas, con estructuras y elementos del espacio urbano. Se utilizaron coberturas vectoriales a escala 1:100.000 para abarcar toda la ciudad, y a escala 1:25.000, para obtener las ventanas de acercamientos a mayor nivel de resolución (Figuras 35 a, b, Ver Anexo 5: Mapas imágenes *LST* del N° 1-27).

Figura 35 a, b. Imagen térmica sin/con capas vectoriales



Fuente: Elaboración propia. Bases cartográficas del IGVS.

Figura 35 b.



Fuente: Elaboración propia. Bases cartográficas del IGVS.

Capítulo III.- Análisis y Discusión de Resultados.

Variabilidad y dinámica de los patrones térmicos superficiales en la ciudad de Caracas.

Una de las contribuciones más importantes de la metodología desarrollada, combinando técnicas de análisis espacial y geotecnologías, fue precisamente el desarrollo de un *SIG*, que permitía diferenciar no solo patrones térmicos (Figura 35a), sino asociar las respuestas térmicas, a sectores de la ciudad con condiciones socio-ambientales diferentes, tanto en la ciudad como en las zonas peri-urbanas (Figura 35 b). El procedimiento de análisis y los resultados se discuten a continuación, mostrando las diferencias térmicas, de usos y vegetación por cuadrantes urbanos y con ventanas de análisis para algunos sectores seleccionados, que permiten asociar respuestas térmicas a estructuras, aumentando el nivel de información disponible a escala urbana.

3.1.-Relaciones entre la respuesta térmica determinada con sensores remotos por cuadrantes urbanos y las variables ambientales locales.

Los resultados obtenidos de los análisis térmicos realizados, en el periodo marzo 2001-enero 2011 (Ver Anexo 5: Mapas imágenes de *LST* 2001-2011) muestran que la isla térmica superficial en la ciudad de Caracas, se expresa espacialmente de modo

diferente al patrón clásico de isla térmica atmosférica o vertical, que sigue un modelo concéntrico desde el centro de la ciudad hacia la periferia (EPA, 2008; Figura 5).

Este patrón clásico es más bien inherente a ciudades de topografía plana, o con pocos contrastes, en donde no hay limitaciones físicas (topográficas) significativas al desarrollo urbano, caso de ciudades como Buenos Aires, Ciudad de México, París, etc., (Figuerola *et al.*, 1998; Jáuregui, 2005; Dousset *et al.*; 2009).

El patrón térmico superficial observado en la ciudad de Caracas es más bien longitudinal, debido a que el desarrollo urbano se concentra en las zonas bajas del valle y se extiende a lo largo del valle principal y los valles secundarios confinados entre colinas, como se observa en el sur-oeste de la ciudad (Anexo 5: Mapas imágenes de *LST* 2001-2011).

La topografía de la ciudad, y los fenómenos de circulación local (*valle-montaña*), condicionan en gran medida los flujos de aire en la ciudad, como se discutió anteriormente en el capítulo I de este trabajo (Figura 15), afectando los patrones de temperatura superficial observados (Anexo 5: Mapas imágenes de *LST* 2001-2011).

En todo el periodo observado (2001-2011), con excepción de las anomalías registradas en marzo del 2010 (Anexo 5: Mapa imagen *LST* N° 25) las temperaturas superficiales urbanas más frescas entre 24 a 27°C (tanto en Marzo de 2001, Marzo del 2003, Marzo 2004, Marzo 2005 y Marzo 2008, Ver Anexo 5: Mapa imagen *LST* N°1, 7, 9, 11, 20), se observan en los sectores localizados al norte de la ciudad,

próximos al Parque Nacional el Ávila (Anexo 5: Mapas imágenes de *LST* 2001-2011; cuadrantes I-II Figura 36 a, 37a).

El centro de la ciudad, que es también el centro fundacional y eje de la actividad pública, muestra también temperaturas frescas entre 24-27°C, con excepción de algunos ejes viales como la avenida Bolívar con amplias carpetas asfálticas, los distribuidores al norte y sur de la Av. Baralt y la Av. Fuerzas Armadas hasta el cruce con la Av. Bolívar, que registraron temperaturas más elevadas entre 28-31 °C.

Esta diferencia se debe fundamentalmente a los efectos modificadores del clima vinculados al relieve y a patrones de circulación local (*Valle-montaña*) que influyen las condiciones observadas sobre todo al norte de la ciudad, tanto al noreste como al noroeste (cuadrantes I-II Figuras 36a y 37a), situación que se verifica de forma consistente en los diferentes análisis térmicos realizados en la ciudad desde marzo del 2001 a enero de 2011 (Anexo 5: Mapas imágenes de temperatura superficial-*LST* 2001-2011; Córdova, 2011).

Al analizar la relación entre temperatura superficial y densidad del espacio construido, los patrones térmicos observados son más consistente con el modelo teórico (EPA, 2008), en donde los espacios más densamente ocupados y con menor presencia de vegetación tienen mayor temperatura superficial que las zonas peri-urbanas o menos densamente construidas (Chen *et al.*, 2006; EPA, 2008), aun cuando el gradiente térmico superficial no se exprese de manera concéntrica (Córdova, 2011b).

Para analizar la densidad del espacio construido y su relación con los patrones térmicos, se utilizaron los análisis de temperatura superficial (*LST*) y el índice de vegetación (*NDVI*) como herramienta auxiliar, ya que este tipo de análisis discrimina bastante bien las superficies impermeables y secas asociadas a los usos urbanos, de la cobertura vegetal, aun si la vegetación está en condiciones de estrés hídrico, por la sequía (Anexo 5: Mapas imágenes N° 28, 29 y 30).

En este caso se tomaron como referencia los análisis de las imágenes correspondientes a los meses de marzo 2001, marzo 2003 y marzo 2010 (imágenes de cielos claros, sin interferencia o casi ninguna interferencia atmosférica), para estudiar los cambios y las relaciones entre los patrones térmicos observados, la densidad del espacio construido y la presencia de vegetación, según los cuadrantes definidos en las premisas de investigación (Figuras 36 a, b; 37 a, b y 38 a, b).

En los análisis de *NDVI* las superficies impermeables están representadas en color gris, los suelos desnudos y la vegetación con severo estrés hídrico en color marrón (*NDVI* entre -0,234 a -0,126), los tonos ocre (*NDVI*-0,126 a 0,005), cremas (*NDVI* 0,005 a 0,131), verde claro (*NDVI* 0,131 a 0,27) y verde oscuro (*NDVI* 0,27 a 1) corresponden a las coberturas vegetales con diferentes grados de humedad y densidad (Anexo 5. Mapa imagen N° 28, 29 y 30; Figuras 36b, 37b y 38b).

A pesar de la alta densidad del espacio construido en el cuadrante I (casi no se observa presencia de espacios verdes y corredores verdes intra-urbanos), este es uno de los casos en que la respuesta térmica superficial promedio observada (24-27°C) no

se corresponde con lo esperado (Figuras 36 a, b; 37 a, b; 38 a,b). Suponemos que ello pueda deberse, como ya se señaló anteriormente, a los efectos modificadores locales del clima. En todo caso, se considera necesario el modelaje 3D de los flujos de vientos en la ciudad y la toma de datos horarios de temperatura para validar los registros obtenidos por el sensor LANDSAT ETM. Las nuevas tecnologías como los radares de superficie LIDAR-*Light Detection And Ranging*,³¹ pueden ayudar a obtener imágenes precisas del entorno urbano, que permitirían realizar modelos 3D del dosel urbano y la instalación *ad hoc* de sensores automáticos de velocidad y dirección de vientos, para este propósito. Ya en el caso del segundo cuadrante (II), correspondiente a los sectores del noreste de la ciudad, la respuesta térmica superficial promedio observada (24-27°C), es más consistente con la mayor presencia de vegetación intra-urbana (corredores verdes, áreas verdes) y la menor densidad del espacio construido, con excepción de las áreas industriales de Boleíta, Los Ruices, Los Cortijos y Petare norte, que presentan rangos promedios entre 28-31 °C (Figuras 36 a,b; 37 a,b; 38 a,b).

Las diferencias entre la respuesta térmica observada entre los cuadrantes III y IV, en cambio es mayor. El cuadrante III corresponde al urbanismo disperso de densidad moderada a baja, localizado al sureste de la ciudad, con mayor presencia de espacios verdes, corredores verdes intra-urbanos y áreas verdes peri-urbanas (Figuras 36 a,b;

³¹ <http://www.stereocarto.com/es/productos/producto.php?id=47> , <http://lidar.cr.usgs.gov/index.php> ,

37 a,b; 38 a,b), en este caso los rangos promedios de temperatura superficial, en las zonas arborizadas de moderada densidad son de 24-27°C, en tanto que en los sectores residenciales de densidad moderada a alta (Sta. Paula, La Trinidad, Alto Prado, Terrazas de Club Hípico, Macaracuay, Colinas de los Ruices, entre otros, etc.), están en rangos entre 28-31 °C. El urbanismo disperso localizado en los sectores de Oripoto, Sarteneja, Los Guayabitos, Alto Hatillo y La Lagunita, muestra temperaturas superficiales más frescas entre 21-23°C, de modo consistente con las mejores condiciones que presenta la vegetación en estos sectores.

El cuadrante IV corresponde al suroeste de la ciudad, más densamente construido y habitado que el sureste, con un desarrollo urbano concentrado sobre todo en las partes más bajas del valle. Aquí los rangos medios de temperatura superficial están entre 28-31 °C en casi todos los sectores residenciales, El Valle, Coche, áreas militares como Fuerte Tiuna, El Paraíso, El Pinar, Las Fuentes, La Vega, Montalbán, Antímano, La Yaguara, Bella Vista, Vista Alegre, etc., a pesar de que todavía se observan áreas verdes peri-urbanas bastante bien conservadas y corredores verdes en algunos sectores (Figuras 36 a,b; 37 a,b).

Algunas urbanizaciones tradicionales unifamiliares con corredores verdes del suroeste de la ciudad como La Paz, El Cementerio-Los Rosales y Santa Mónica, muestran rangos de temperaturas más frescas entre 24-27°C, en comparación con el entorno. En este caso las diferencias se deben precisamente a los cambios en la densidad urbana (altura de las edificaciones), aquí como en el centro de la ciudad,

sería recomendable un modelaje 3D de circulación, para observar otros parámetros que podrían estar influenciando en la respuesta térmica observada.

En lo que respecta a marzo del 2010 (Figuras 38 a, b, Anexo 5: Mapa imagen N° 25), las temperaturas superficiales observadas, están relacionadas con importantes anomalías en las temperaturas superficiales urbanas (+10°C), que se acompañaron también de altas temperaturas ambientales y una elevada incidencia de incendios en las zonas peri-urbanas (Córdova, 2011b).

Los sectores con temperaturas superficiales promedio entre 24 -27 °C predominantes en la ciudad, pasan a rangos entre 28-31 °C durante el evento de calor de Marzo de 2010, del mismo modo los sectores del oeste y sur oeste de la ciudad con rangos de temperatura entre 28 -31 °C registran un incrementos entre 32 a 36°C (Figuras 38 a, b, Anexo 5: Mapa imagen N° 25).

Ello supone una situación ambiental y de salud delicada frente a eventos extremos de sequías o calor, precisamente en el municipio Libertador (Figura N° 22) donde se concentra la mayor cantidad de población de la ciudad (67%), así como los sectores de más bajos ingresos, estos aspectos serán analizados a seguir, en el punto 4 de este capítulo (Alcaldía Metropolitana, 2010).

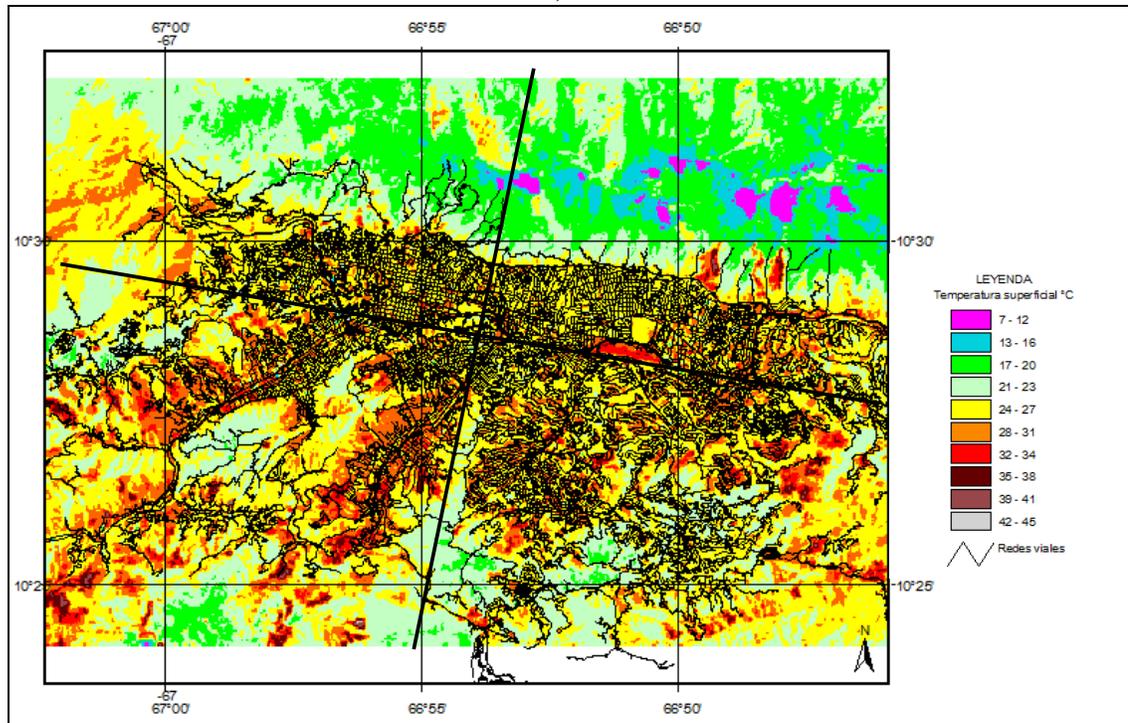
Las áreas verdes peri-urbanas y urbanas, así como los parques recreacionales y botánicos presentaron también altas temperaturas (28-31°C) durante el evento de calor de marzo de 2010, lo que implica mayores niveles de estrés hídrico y sufrimiento vegetal. En este caso, el papel fundamental que desempeña la vegetación

en la mitigación de las altas temperaturas superficiales se pierde por el elevado estrés hídrico vegetal (Córdova, 2011b).

De manera general podría afirmarse, que los supuestos básicos planteados al inicio de esta investigación se verificaron, es decir que la formación de islas térmicas superficiales esta en directa relación con la densidad del espacio construido y la mayor o menor presencia de vegetación y que estas respuestas pueden modificarse en algunos casos, por los fenómenos de circulación local (*valle-montaña*), que pudieran estar jugando un rol importante en la mitigación de las altas temperaturas en zonas densamente construidas como el centro-norte de la ciudad. Se requeriría sin embargo, estudios más detallados de circulación de masas de aire en algunas zonas (modelaje 3D de flujos aire), para explicar mejor las variaciones en la temperatura superficial observada que pudieran estar relacionadas con la altura del dosel.

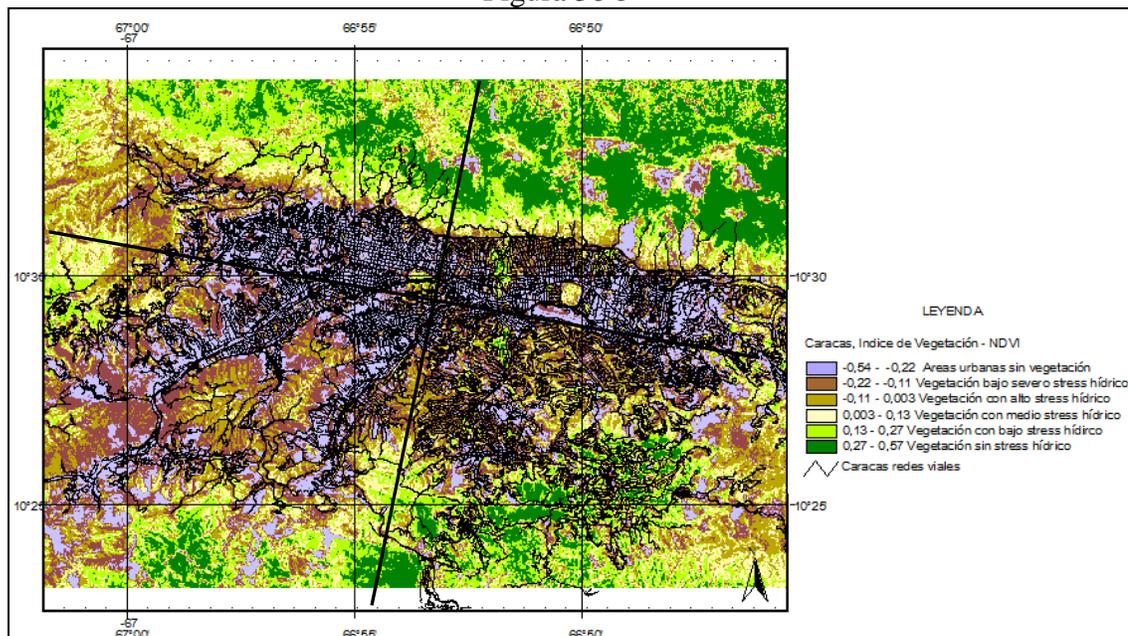
Uno de los resultados más evidentes son las significativas diferencias observadas, entre los espacios de densidad moderada a baja del noreste y sureste Caraqueño (con excepción de las zonas industriales y Petare norte-sur) con mayor presencia de vegetación (cuadrantes II y III), con aquellos espacios más densamente construidos del noroeste y suroeste de la ciudad (cuadrantes I y IV). La mayoría de los sectores de bajos ingresos (barrios) localizados al oeste y suroeste, registraron temperaturas entre 28 °C y 34°C (cuadrantes I y IV).

Figuras 36 a, b. Temperatura superficial-NDVI. Resultados por cuadrantes urbanos.
Marzo, 2001.



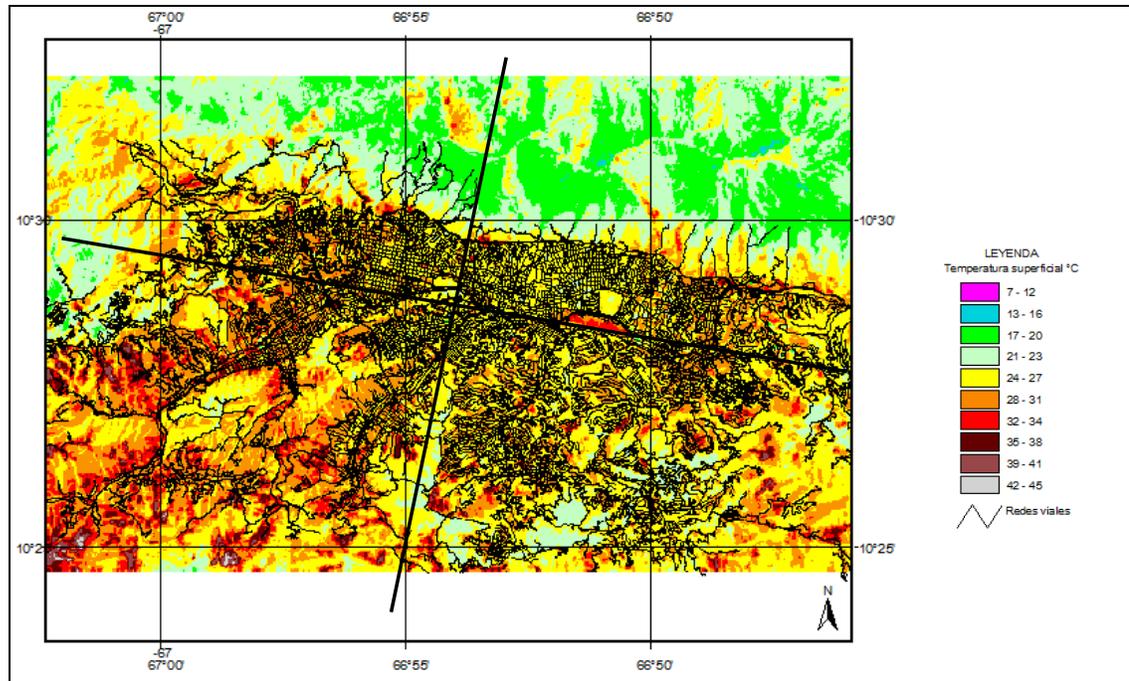
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 36 b



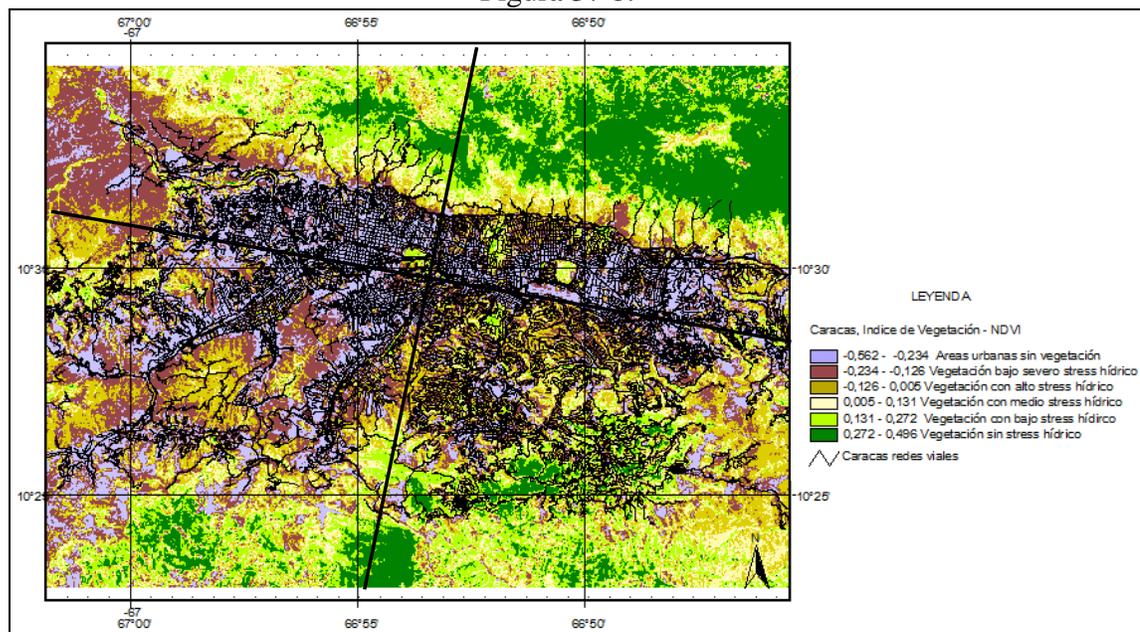
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figuras 37 a, b. Temperatura superficial-NDVI. Resultados por cuadrantes urbanos.
Marzo 2003.



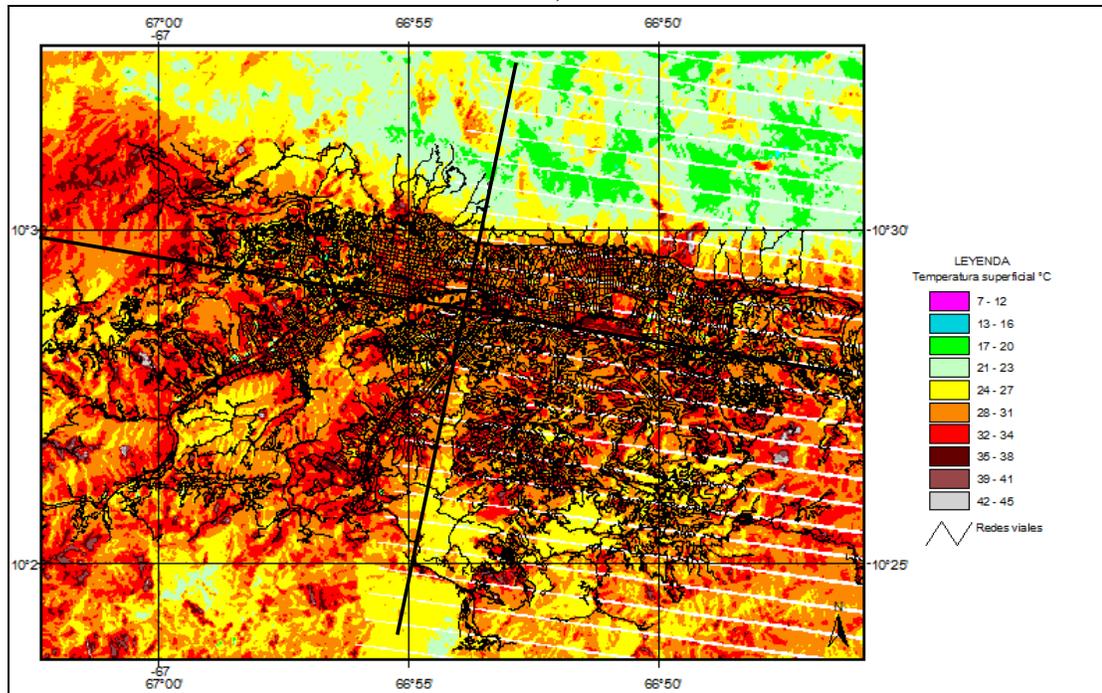
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 37 b.



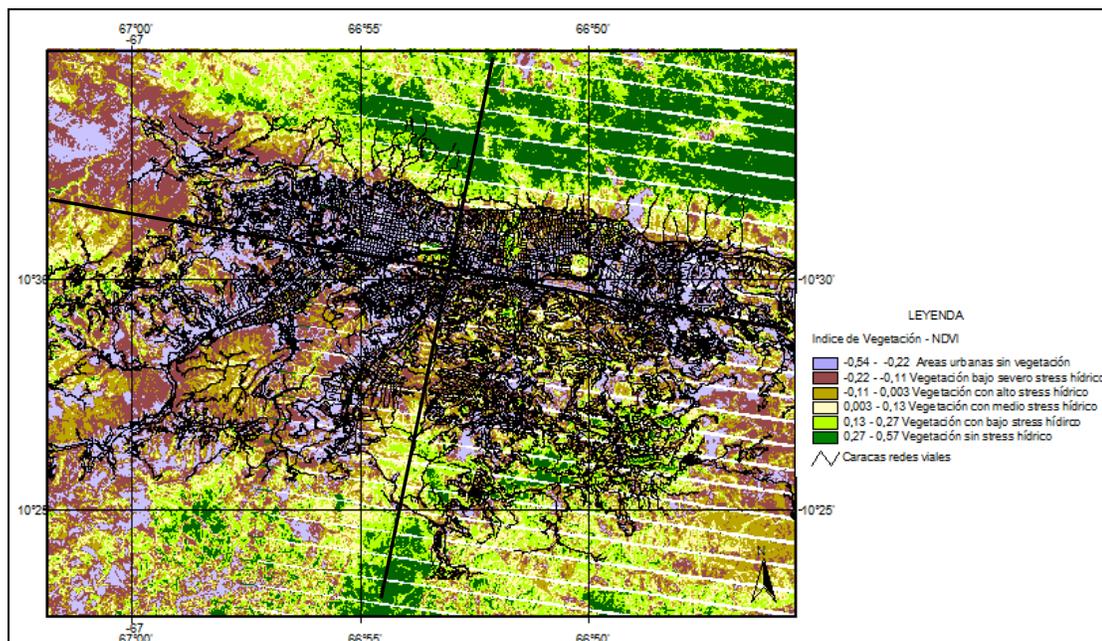
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figuras 38 a, b. Temperatura superficial-NDVI. Resultados por cuadrantes urbanos
Marzo, 2010.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 38b.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Dichas diferencias están relacionadas no solamente a la densidad urbana y la presencia de vegetación, sino también con la calidad de los materiales de construcción en las viviendas de los sectores de bajos ingresos (Córdova, 2011a).

Estos sectores se caracterizan por la presencia de construcción informal, realizada con ladrillos (en las áreas consolidadas) o paneles de madera y techos metálicos (zinc, galvanizados, aluminio), con una infraestructura de servicios improvisada, como las redes eléctricas, de agua potable, vialidad y drenajes (Córdova, 2011a; Figura 39; Anexo 5: Mapas imágenes de temperatura superficial-LST 2001-2011).

Figura 39. Vistas Aéreas de sectores de bajos ingresos (Barrios) en Caracas.



Fuente: Rocco, 2005. Caracas Cenital.

El efecto de estas extensas superficies urbanas recubiertas de techos metálicos, ha sido descrito para algunas ciudades brasileñas como “*ciudades febriles*”. También fueron reportados altas temperaturas superficiales para materiales galvanizados (57.9°C) y laminados de aluminio (69.4 °C), comúnmente utilizados como materiales

de techumbre en los sectores de bajos ingresos (Sant'Anna, *et al*, 2008, Córdova, 2011a).

Los análisis de temperatura superficial-*LST*, densidad urbana y vegetación con *NDVI*, fueron complementados con los mapas de usos para el mismo período (2001-2003-2010), lo que permitió discriminar categorías de vegetación y de usos de suelo urbano. Estas clasificaciones de uso desarrolladas, confirman los patrones de ocupación determinados mediante el índice de vegetación *NDVI*, aunque debido a las limitaciones en la resolución espacial (30 m), no es posible ir más allá de las grandes categorías de uso en los análisis (Anexo 5: Mapas imágenes de uso del suelo 2001, 2003, 2010, N° 31, 32, 33).

Se encontraron sin embargo coincidencias entre las altas temperaturas superficiales observadas en el periodo de análisis, con las clases de usos residenciales de alta y muy alta densidad, así como también entre las superficies de alta reflectancia y valores más bajos que el entorno, como se verá más adelante, en el análisis por sectores.

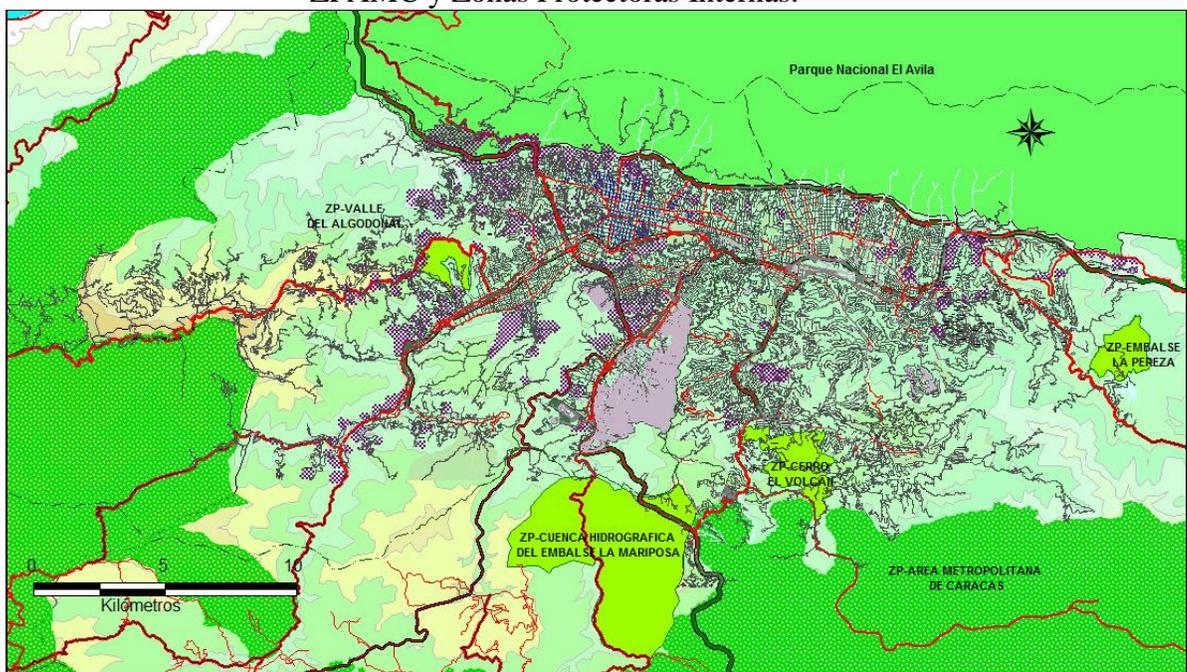
3.1.1 El Rol de la vegetación intra y peri-urbana en la mitigación de las temperaturas superficiales

Las categorías de temperaturas discriminadas en los mapas térmicos, ayudaron a entender las relaciones entre los usos del suelo, los tipos de cobertura vegetal y la temperatura superficial, lo cual fue importante para comprender el rol de mitigación

de las temperaturas superficiales y ambientales que desempeña la vegetación (Anexo 5: Mapas imágenes de uso del suelo 2001, 2003, 2010, N° 31, 32, 33).

Las áreas verdes peri-urbanas comprendidas dentro del ámbito de este estudio (como parte de la diferenciación entre el gradiente térmico urbano y peri-urbano) no forman parte de la Zona Protectora del Área Metropolitana de Caracas-ZPAMC (Decreto N° 1.046 de fecha 19/07/1972, publicado en la Gaceta Oficial N° 28.859 del 20/07/1972), con excepción de la ladera sur del Parque Nacional El Ávila. Este anillo exterior abarca unas 66.295 has, e integra junto con el parque Nacional El Ávila y el Parque Nacional Macarao, una zona de protección que circunda el área metropolitana de la ciudad (Llanos y Almandoz, 2008; Figura.40).

Figura 40. Límites de la Zona Protectora del Área Metropolitana de Caracas-ZPAMC y Zonas Protectoras Internas.



Fuente: Bases cartográficas IGSBV, ECOSIG-IVIC, elaboración propia.

Las áreas verdes que nos ocupan en este caso, son interiores, y generalmente están resguardadas bajo figuras como la de Parques Recreacionales Metropolitanos o Zonas Protectoras, como el caso de la zona protectora del Hospital El Algodonal en Antímano o la Zona Protectora del Cerro El Volcán al sureste de la ciudad (Figura 40).

De manera general se puede afirmar, al observar las características de las áreas verdes peri-urbanas que contornan la ciudad, que el matorral deciduo y las gramíneas son los tipos de comunidades vegetales que se presentan con mayor frecuencia en las zonas peri-urbanas. Este matorral deciduo puede corresponder, a un estrato arbustivo del bosque semideciduo (Fajardo, L.V *et al.*, 2005).

Un buen lugar para observar estas formaciones vegetales, son las áreas verdes peri-urbanas localizadas en las filas y colinas del suroeste (Figura 41), entre los sectores de Caricuao y Montalbán-Universidad Católica Andrés Bello, próximo a la parroquia ecológica de Caricuao, aunque no se pudo determinar si dentro de los linderos del Parque Recreacional Vicente Emilio Sojo (Figura 41).

Figura 41. Área Seleccionada para la verificación en campo de las unidades de vegetación



Fuente: Google Earth, Elaboración propia.

La declaratoria de Caricuao, como Parroquia ecológica, resguarda unas mil doscientas hectáreas de áreas boscosas, integradas por el Parque Caricuao, Leonardo Ruiz Pineda, el Parque Universal de La Paz y del Topo de Itagua (1400 m), según la resolución del martes 8 de septiembre del 2009, donde el Concejo Municipal de Libertador decretó a Caricuao Parroquia Ecológica (Gaceta Municipal N° 3187-A, Acuerdo N° SG-5180-09-A). Estos sectores no forman parte de la zona protectora de Caracas, ni del Parque Macarao, pero se integran al sistema de figuras de protección

ambiental que circundan la ciudad, bajo la figura de la Zona Protectora del Área Metropolitana de Caracas-ZPAMC (Figuras 40 y 41).

Otro caso interesante es el del Parque El Parque recreacional Metropolitano "Vicente Emilio Sojo" decretado con el N° 193 del 13 de Mayo de 1975 en la parroquia La Vega.

“...Colindando con la parroquia La Vega, este Parque Recreacional Metropolitano a Campo Abierto, no cuenta con un plan de manejo integral, ni con infraestructuras, ni mucho menos con una política clara que permita identificar e impulsar su vocación de parque recreacional, lo que ha traído como consecuencia su invasión por áreas no controladas, contaminación por permanentes botadores de basuras y aguas servidas (aguas negras); la tala y la quema para elaborar « conucos» que rápidamente se transforman en construcciones ilegales en las áreas públicas...³²”

La falta de información precisa sobre estas áreas protegidas, linderos, registros cartográficos, planes de manejo, tal y como refiere la cita anterior, ha facilitado la afectación del parque por desforestación e invasiones, cuestionando la existencia misma de estos pequeños parques metropolitanos o zonas protectoras interiores o dentro del anillo de la ZPAMC.

³² <http://lacolumnadecaricuaonoticiasambientale.blogspot.com/2009/07/caricua-se-convertira-en-parroquia.html>

La ventaja de residir en el sector, permitió verificaciones en campo frente al sector del Montalbán III (Figura 41), donde áreas verdes naturales sin desarrollo, son utilizadas para practicar deportes por vecinos de todas las edades, como senderismo, caminatas, trote, excursiones. Estas filas y colinas poseen pendientes promedio de 45°, lo cual de acuerdo con el decreto de Parroquia Ecológica, las hace no aptas para el desarrollo urbano y altitudes entre 900 a 1300 mts (Gaceta Municipal N° 3187-A, Acuerdo N° SG-5180-09-A).

No fue posible sin embargo verificar los linderos de las áreas protegidas bajo esta figura. Fisiográficamente, las filas que se observan entre Montalbán y Caricuao corresponden a dos vertientes de la misma unidad, pero uno de los criterios para delimitar áreas protegidas son las divisorias de aguas, lo que podría afectar a un lado de la vertiente y dejar la otra expuesta o desprotegida (Figura 41).

Otra discusión importante se refiere a la caracterización del bosque semidecíduo tropical y del matorral decíduo tropical (Fajardo, L.V *et al.*, 2005), *sobre todo en áreas urbanas*, donde casi siempre se observan sucesiones vegetales secundarias debido precisamente a la intervención antrópica. Según el criterio de algunos autores, estas comunidades vegetales podrían corresponder a bosques semidecíduos tropófilos o estacionales (Rodríguez *et al.*, 2010).

La estratificación vegetal observada en las visitas de campo al sector, está relacionada con el grado de intervención de las comunidades vegetales. Las gramíneas casi siempre aparecen en los niveles más próximos al desarrollo urbano, a la vialidad, a

medida que se asciende se observa una predominancia progresiva del matorral deciduo con algunos especímenes de cactáceas aisladas, hasta llegar a los topos entre 1100 y 1300 mts, donde aparecen especies de mayor desarrollo vertical, propias de los bosques semidecuidos tropicales (Rodríguez *et al.*, 2010; Fajardo, L.V *et al.*, 2005).

Otro criterio que ayudó a la separabilidad de las unidades vegetales fue la temperatura superficial observada, ya que en las áreas naturales la respuesta térmica observada, guarda relación con la densidad del dosel vegetal y el grado de humedad. Los rangos de temperatura para las gramíneas oscilan normalmente entre 24-27°C durante la temporada seca o en los periodos de transición estacional, aunque durante la intensa sequía de marzo del 2010, se observaron rangos entre 28-31°C (Anexo 5, Mapas imágenes de temperatura superficial-*LST* 2011-2011).

Ello se debe a que las gramíneas durante la temporada seca se deshidratan y dejan mayor superficie de suelo expuesto, aumentando la temperatura superficial, por lo que el rol de este tipo de vegetación en la mitigación del calentamiento superficial durante los críticos meses de sequía, es nulo.

En el caso del matorral deciduo y los bosques semidecuidos, la respuesta térmica superficial asociada a este tipo de vegetación es diferente. Aunque el matorral deciduo y el bosque semidecuido pierden el follaje durante la época de sequía como mecanismo de adaptación, el intrincado ramaje protege el suelo de la radiación solar directa, por lo que las temperaturas superficiales se mantienen en rangos entre 24-27

°C durante la estación seca, pero mejoran rápidamente al reverdecer la vegetación con el periodo de lluvias (21-23°C).

El suelo desnudo, desforestado por urbanismo informal o formal observa en cambio, altas temperaturas entre 32 hasta 36 °C, estos generalmente se localizan en la frontera entre los desarrollos informales y las áreas verdes peri-urbanas remanentes o, en los sectores desforestados por desarrollos urbanos formales (Anexo 5: Mapas imágenes de temperatura superficial-*LST* 2011-2011, Mapas NDVI 28, 29, 30; Mapas uso 31, 32, 33).

Otro resultado derivado de los análisis, confirma que efectivamente las zonas peri-urbanas presentan siempre o casi siempre, menores temperaturas (21-23°C) que los espacios urbanizados. Solo durante los meses de sequia, puede observarse una variación en esta condición, sobre todo si se trata de gramíneas o vegetación decidua (bosques semidecíduos o matorrales deciduos) en estos casos generalmente se observa un incremento entre 24-27 °C o más, dependiendo de la intensidad de la sequia, del tipo de vegetación y del grado de intervención de la vegetación.

Las áreas verdes peri-urbanas que han sido afectadas por deforestación e incendios, también registran altas temperaturas superficiales, entre 35-38°C. Focos activos de incendios presentan temperaturas superiores que oscilan entre 39 y 49 °C (Anexo 5: Mapas imágenes de temperatura superficial-*LST* 2011-2011, Mapas uso 31, 32, 33).

En este caso se incluyó también en el estudio, la ladera sur y parte de la ladera norte del parque nacional El Ávila localizado al norte de la ciudad, para tener una

referencia de valores de temperaturas superficiales de vegetación, bajo mejores condiciones de humedad y conservación.

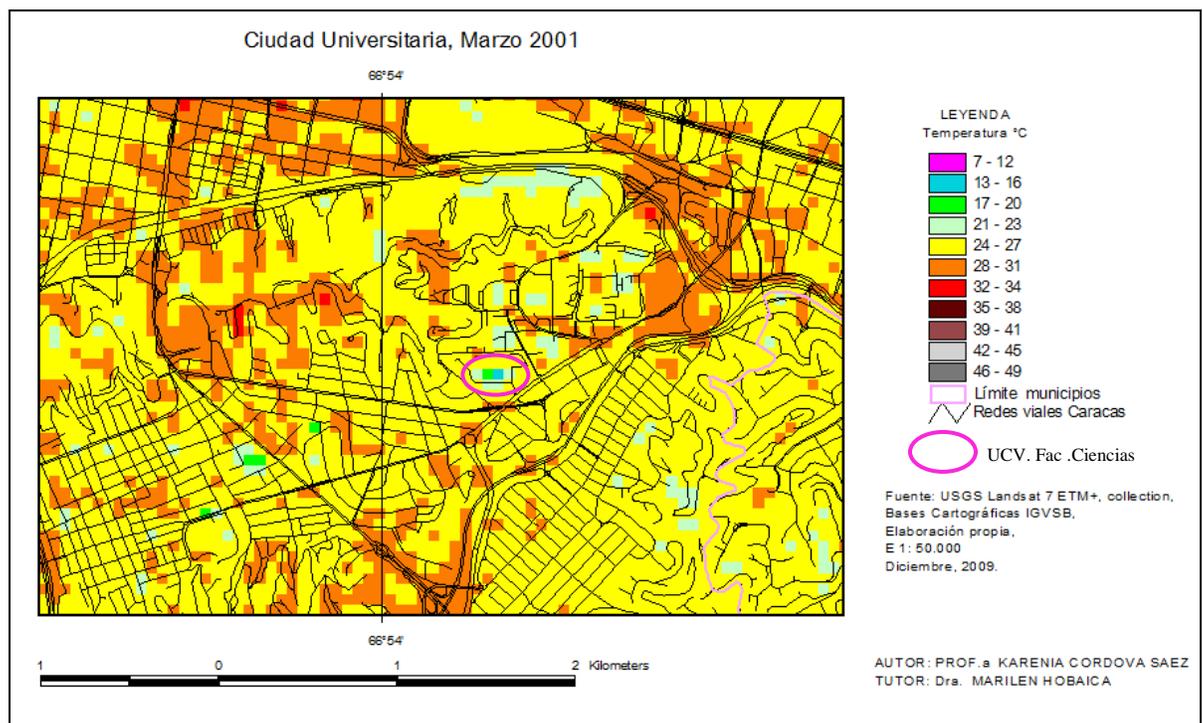
Los resultados de temperatura superficial obtenidos, son consistentes con el tipo de vegetación según las clasificaciones de usos de suelo y con las condiciones de humedad observadas con el índice de vegetación *NDVI*. Los bosques húmedos en las partes altas del parque, muestran temperaturas entre 17-20°C durante los periodos de sequia, y registros más bajos (12-16°C) en la temporada de lluvias. Los bosques semidecíduos, muestran temperaturas entre 21-23 °C, durante la temporada de sequia y entre 17 a 20°C en época de lluvias (Anexo 5: Mapas imágenes de temperatura superficial-*LST* 2011-2011, Mapas *NDVI* 28, 29, 30; Mapas uso 31, 32, 33).

En este caso el parque nacional cumple no solo un papel escénico por su invaluable valor paisajístico, sino que constituye además un pulmón natural para la ciudad, pues la vegetación que mantiene las condiciones de humedad y follaje durante la sequia debido a la interferencia orográfica de las masas de aire, contribuye con la renovación del aire urbano mediante los mecanismos de circulación local, mitigando la contaminación y el calor, aportando además, humedad y frescura a la ciudad (Ataroff, 2001; Manara, 1998; Anexo 5: Mapas imágenes de temperatura superficial-*LST* 2011-2011, Mapas *NDVI* 28, 29, 30; Mapas uso 31, 32, 33).

3.1.2-Ejemplos de ventanas de análisis de casos por sectores.

La corrección geométrica y la integración de la información raster y vectorial en un SIG, permiten ventanas de trabajo a mayor nivel de detalle, que aumentan la cantidad de información que puede obtenerse y posibilitan la identificación y análisis de estructuras y elementos del espacio urbano, más allá de las grandes tipologías de usos. En este caso se seleccionaron algunos sectores y usos representativos de la ciudad, para realizar análisis detallados de las respuestas térmicas observadas, de forma comparativa para marzo 2001, marzo 2003 y marzo 2010 (Figuras 42 a, b, c).

Figura 42 a (b, c). Ejemplo de Ventanas de análisis por sectores. UCV



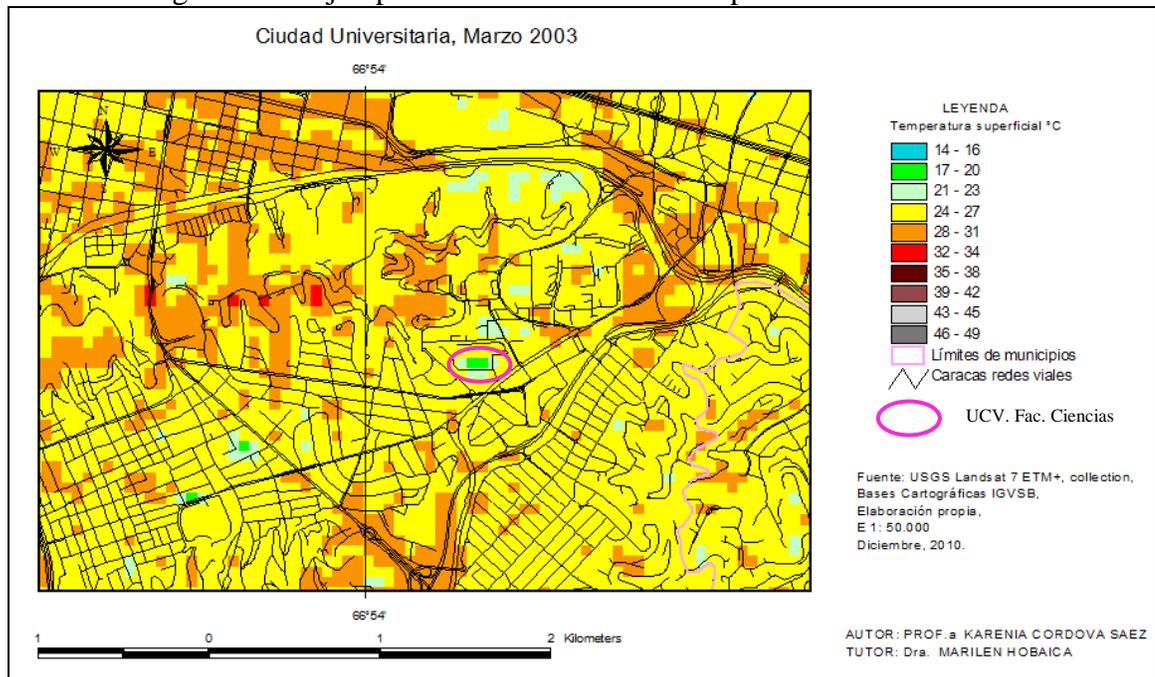
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Uno de los sectores de análisis seleccionados por la representatividad de las coberturas y materiales urbanos que en él se pueden distinguir, es la poligonal de la Ciudad Universitaria de Caracas, que ofrecía además la ventaja de poder realizar verificaciones y contrastaciones en campo de los resultados (Figuras 42 a, b, c).

Los valores de temperatura superficial obtenidos, para marzo del 2001 en Ciudad Universitaria, muestra las mayores temperaturas asociadas a las carpetas asfálticas de los distribuidores viales (28-31°C), también en el sector correspondiente al complejo deportivo de estadios y el estadio cubierto, así como la calle que baja frente a los galpones de la escuela de idiomas, donde están los lotes de estacionamientos de Medicina, la Biblioteca Central e Ingeniería, y en los alrededores del instituto de Higiene. Las más bajas temperaturas (21-23 °C) en este caso se asocian a la zona más densamente arbolada del Jardín Botánico y los techos de algunas edificaciones como trabajo social, nutrición, los galpones nuevos de derecho y el techo del galpón de la biblioteca en la Facultad de Ciencias, posiblemente recubiertos con coberturas reflectivas (pintura- impermeabilizantes) o materiales aislantes (Figura 42 a).

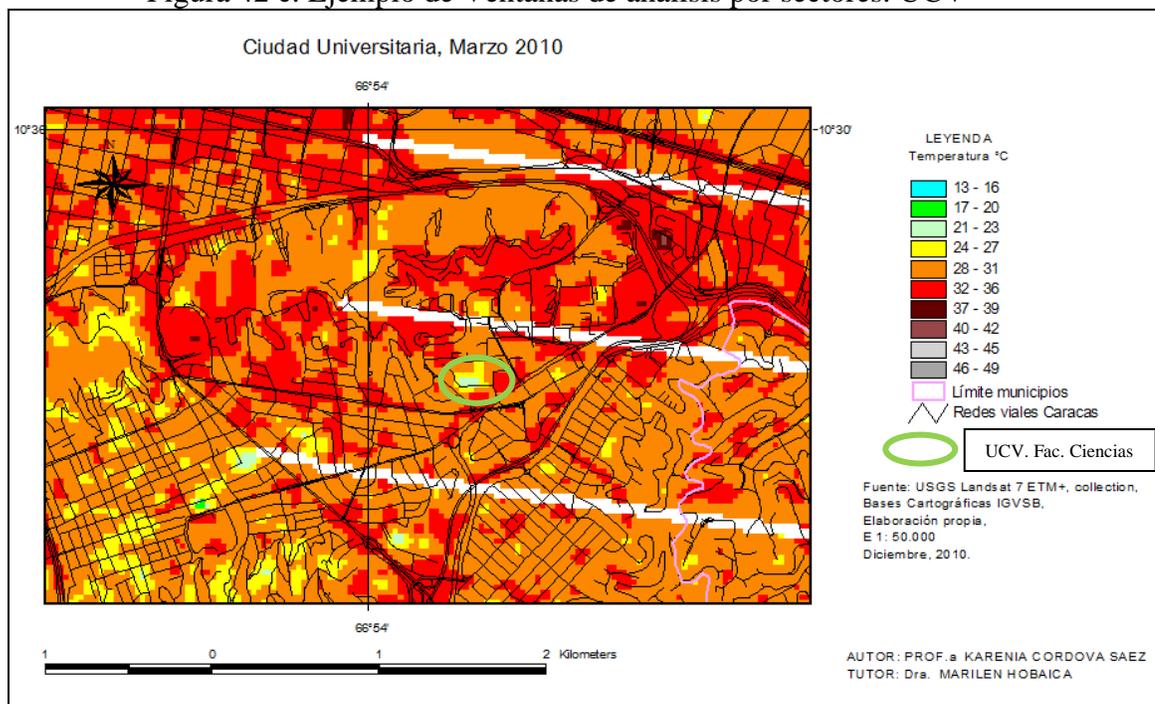
Este cuadro se mantiene casi igual en Marzo del 2003, aunque disminuyen las áreas de temperaturas más frescas en el Jardín botánico fragmentándose, al igual que otras áreas de temperaturas más frescas asociadas a superficies reflectivas. El galpón de la biblioteca de la facultad de Ciencias, se mantiene más fresco que el entorno, aunque ya no se observan las temperaturas más bajas (13-16 °C) que se aprecian en el año 2001 (Figura 42b).

Figura 42 b. Ejemplo de Ventanas de análisis por sectores. UCV



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 42 c. Ejemplo de Ventanas de análisis por sectores. UCV



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

En marzo del 2010 en cambio, los sectores críticos asociados a carpetas asfálticas y grandes estructuras de concreto, aumentan los registros a valores entre 32- 36 °C, en el resto de la ciudad universitaria los valores oscilan entre 28-31 °C. Ni siquiera la vegetación en el Jardín Botánico amortigua las altas temperaturas. Solo en el galpón de la biblioteca de la Facultad de Ciencias las temperaturas continúan siendo más bajas que en el entorno (21-23 °C; Figura 42 c y 43).

Figura 43. Galpón de la Facultad de Ciencias-UCV.



Fuente: Digital Globe-Google Earth- 2012.

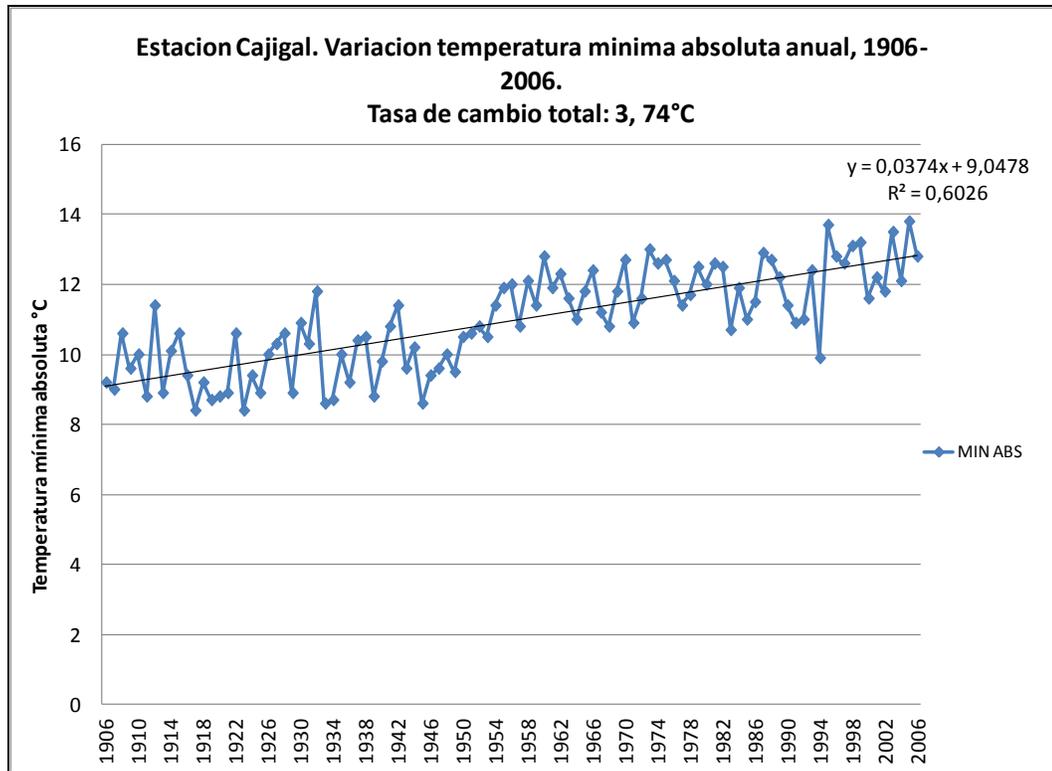
Se estima que ésta respuesta térmica pueda estar vinculada, al diseño del techo (elevado, separado en módulos) y al tipo de material reflectivo utilizado, posiblemente con propiedades térmicas aislantes (Figura 43, Anexo 6).

Estas construcciones tipo galpón industrial son por lo general abiertas, con los ductos expuestos en donde, la altura de la edificación constituye un espacio de amortiguación entre el techo y el ambiente interno. Si además internamente se estuvieran utilizando sistemas de climatización artificial, podrían estarse enfriando también, los techos desde adentro. En todo caso vale la pena realizar un estudio más detallado del funcionamiento térmico de la estructura, para determinar, si la respuesta térmica observada obedece al uso de materiales aislantes o al diseño de la edificación.

3.2.-La asociación entre materiales, estructuras y elementos urbanos con la temperatura superficial observada.

La inercia térmica de los materiales de construcción característicos de las superficies urbanas (Sosa *et al.*, 2004), es uno de los factores que contribuyen con la formación del fenómeno de isla térmica tanto diurna, como nocturna. Los materiales con mejor conductividad como los metales, se calientan y enfrían más rápidamente, en tanto que los materiales con mala conductividad y elevada carga térmica, como el asfalto y el concreto, se calientan más lentamente y remiten la carga térmica adquirida durante las horas diurnas y en las primeras horas nocturnas (Sosa *et al.*, 2004; EPA, 2008). Esta puede ser una de las razones que explican el sostenido aumento de la temperatura mínima en la ciudad de Caracas, aproximadamente desde mediados de los años cincuenta en adelante (Figura 44).

Figura 44. Estación Cajigal. Variación anual de la temperatura mínima absoluta.



Fuente: CLICOM. DHN Observatorio Naval Cajigal, Elaboración propia.

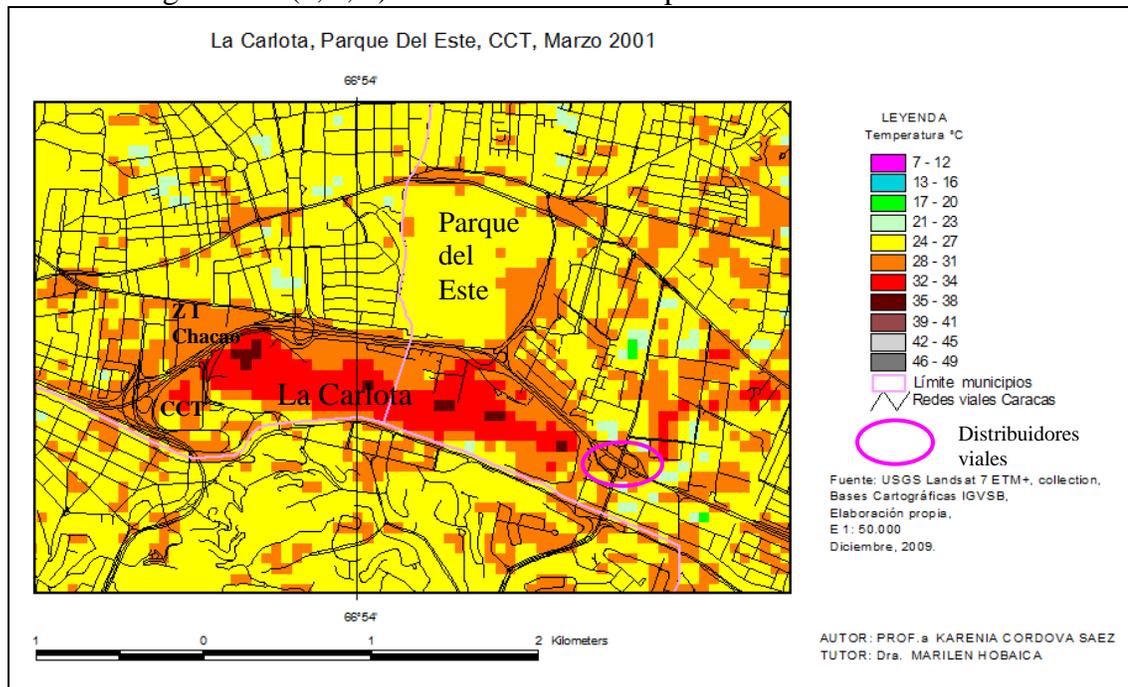
Estos cambios son coincidentes con el periodo de expansión del desarrollo urbano en la ciudad y constituyen un reflejo de las transformaciones ambientales experimentadas en la ciudad, tendencia que se mantiene de forma sostenida hasta el presente (Delgado, 2004). Para analizar la repuesta térmica de los materiales constructivos en la ciudad a partir de los datos generados por la banda térmica de LANDSAT 7 ETM+, se escogieron (aprovechando las ventajas de la integración en un SIG para los análisis por ventanas sectoriales) superficies claramente asociables a materiales de construcción presentes en los espacios urbanos, y que por su extensión

podieran ser representativas de la respuesta térmica asociada de estos materiales. Se requería además, que los sectores seleccionados, tuvieran poca o ninguna interferencia de edificaciones o arboles que pudieran proyectar sombra. El aeropuerto de la Carlota, un espacio abierto sin interferencia, expuesto a la radiación solar directa y con una amplia carpeta asfáltica, rodeado de terrenos despejados recubiertos sólo de gramíneas, resultaba ideal para observar los valores para este tipo de superficies y cuantificar los cambios observados (Figura 45 a, b, c).

Los rangos de temperaturas para las superficies asfaltadas también fueron observados en los tramos más anchos de las autopistas (sector Altamira, la Urbina) y en los distribuidores viales. La respuesta térmica de las superficies recubiertas por techos metálicos, predominantes en los sectores de bajo ingresos, fue observada en los barrios Caraqueños, como la Vega, Carapita, Petare y El Valle (Figura 45 a, b, c).

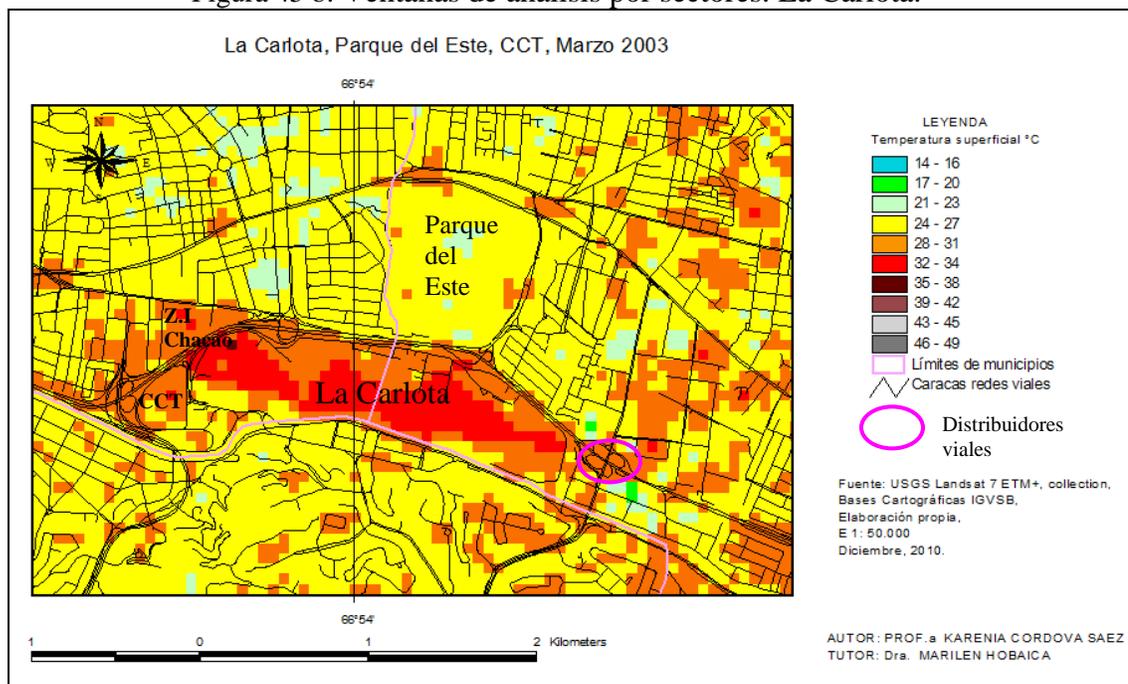
Los grandes complejos comerciales como el CCT-Sambil y los complejos deportivos de la Ciudad Universitaria-UCV, sirvieron para observar la respuesta térmica de extensas superficies recubiertas por concreto. Materiales como las tejas y ladrillos rojos utilizados en techos y plazas abiertas, fueron observados en la plaza de Los Estadios de la UCV y sobre sectores residenciales como el Llanito al este y Vista Alegre al oeste. Estos análisis fueron la base a partir de la cual se elaboró la Tabla N° 6, con los valores promedios de temperatura superficial observados para los diferentes tipos de coberturas en el área urbana de Caracas, con la banda térmica de LANDSAT 7 ETM+ (Tabla N° 6).

Figura 45a. (b, c, d) Ventanas de análisis por sectores. La Carlota.



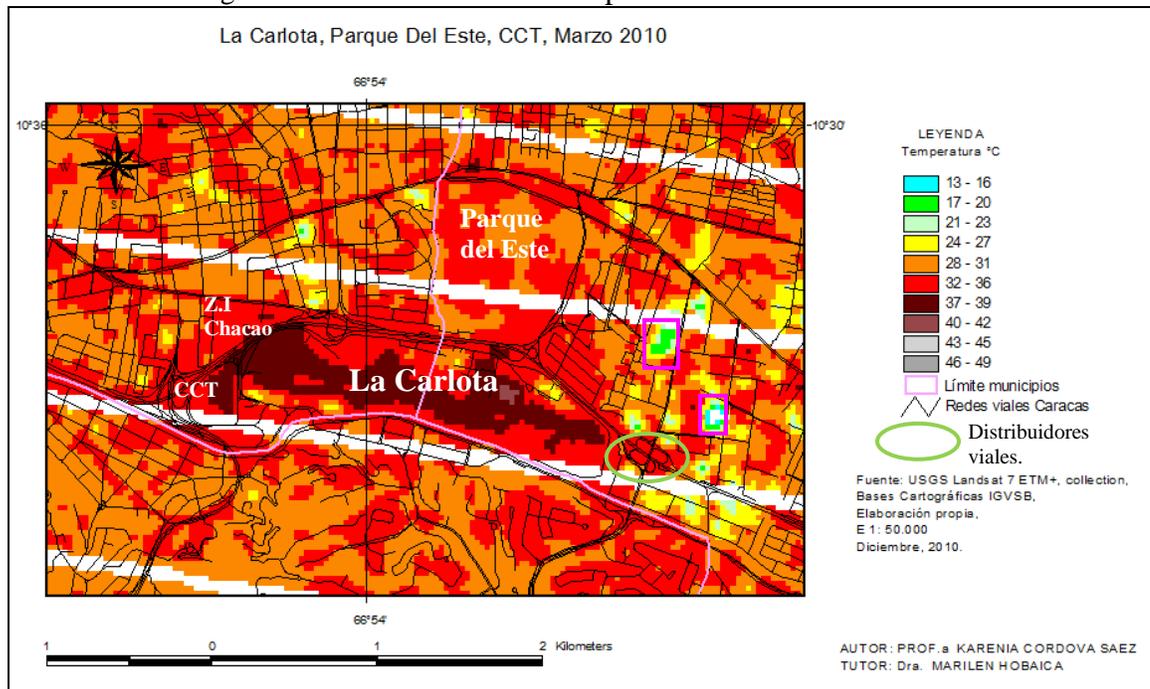
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 45 b. Ventanas de análisis por sectores. La Carlota.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 45c. Ventanas de análisis por sectores. La Carlota.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 45.d. Ventanas de análisis por sectores. La Carlota.



Fuente: Digital Globe-Google Earth 2012. Elaboración propia.

Tabla 6. Valores promedios de temperatura superficial observada para algunas superficies urbanas.

<i>Estructuras del espacio urbano- Caracas</i>	<i>Temperatura superficial en °C</i> <i>Marzo 2001</i>	<i>Temperatura superficial en °C</i> <i>Marzo 2003</i>	<i>Temperatura superficial en °C</i> <i>Marzo 2004</i>	<i>Temperatura superficial en °C</i> <i>Marzo 2005</i>	<i>Temperatura superficial en °C</i> <i>Marzo 2010</i>
<i>Vías asfaltadas, estacionamientos</i>	28-31°C	28-31°C	28-31°C	28-31°C	32-36°C
<i>Pista La Carlota</i>	32-34°C	32-34°C	28-31°C	28-34°C	37-39°C
<i>Superficies de concreto</i>	28-31°C	28-31°C	28-31°C	28-31°C	32-36°C
<i>Complejo comercial CCT</i>	28-34°C	28-34°C	28-31°C	28-34°C	32-39°C
<i>Tejas Rojas/Plazas abiertas recubiertas de ladrillo rojo</i>	28-31 °C	28-31 °C	28-31°C	28-31°C	32-36°C
<i>Residencial baja densidad</i>	24-27°C	24-27°C	24-27°C	24-27°C	28-31°C
<i>Residencial alta densidad</i>	28-31 °C	28-34°C	24-31°C	28-31 °C	28-36°C
<i>Zonas de Barrios</i>	28-31 °C	28-34 °C	28-31°C	28-31°C	32-36°C
<i>Suelos desnudos</i>	32-34°C	32-34°C	32-34°C	32-34°C	37-39°C
<i>Áreas verdes intra-urbanas</i>	24-27°C	24-27°C	21-27°C	24-27°C	28-31°C
<i>Áreas verdes peri-urbanas</i>	21-23°C	21-27°C	17-23°C	21-23°C	24-31°C
<i>Superficies quemadas</i>	39-49°C	39-45°C	35-41°C	35-41°C	40-49°C
<i>Superficies alta reflectancia</i>	12-16 /17-20°C	17-20/21-23°C	12-16 /17-20°C	17-20/21-23°C	17-20/21-23°C

Fuente: SIG y bases de datos del proyecto de tesis doctoral, Elaboración propia.

Como se aprecia en la Tabla N° 6, los valores registrados para los diferentes materiales y elementos presentes en el mosaico urbano, son valores promedios que oscilan en rangos entre valores máximos y mínimos. Ello se debe a que la respuesta observada (aun cuando se hace una selección de localidades para intentar lograr representatividad) no es un valor puro, es decir, que los píxeles seleccionados para representar un determinado material, no son puros. Resulta difícil, con una banda térmica re-muestreada de 60 a 30 m (que no permite escalas de trabajo detalladas), obtener valores de píxeles puros.

Para ello sería necesario de trabajar con sensores que tengan mayor nivel de resolución espectral y espacial en el rango térmico, estos pueden estar disponibles para propósitos militares, pero no para propósitos civiles, por lo que todavía la expectativa de tomar muestras de píxeles puros representativos de registros térmicos con sensores remotos para diferentes materiales constructivos, deberá esperar a que se pongan a disposición del público, sensores con banda térmica de alta resolución.

La nueva generación de satélites LANDSAT 9, previsto para ser lanzado en 2013³³, promete mejorar este desempeño. Sería interesante además, verificar estos patrones térmicos con el uso sensores térmicos portátiles (pistola láser infrarroja), de preferencia a la misma hora aproximada y bajo las mismas condiciones ambientales, para estimar las diferencias entre la temperatura obtenida por el sensor (Δ) y las que

³³ http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php

pueden obtenerse por lectura directa con la pistola infrarroja (*Td*). A pesar de estas limitaciones, llaman la atención algunos resultados que vale la pena destacar, como los valores promedios de las carpetas asfálticas de la vialidad, entre 28-31 °C, en la mayoría de los casos (Tabla N° 6).

Se debe recordar, que afortunadamente, muchos de los grandes ejes viales de la ciudad son arbolados (árboles que proyectan sombras sobre el asfalto dependiendo de la orientación del sol), y están orientados en el sentido de la dirección dominante de los vientos (E-W), como el caso de la Autopista Francisco Fajardo, o la Cota Mil o en sentido norte sur (N-S), aprovechando la circulación local que se genera entre el valle de Caracas y el Parque Nacional del Ávila.

Ello representa sin duda, una ventaja a la hora de mitigar y/o evacuar las cargas térmicas diarias generadas por el calentamiento directo o por el tránsito automotor (Fotos 3, 4 y 5).

Sin embargo, aquí como en otros elementos y superficies del espacio urbano, sería interesante realizar un muestreo de temperaturas con pistolas térmica, o cámaras infrarrojas, para determinar el diferencial entre la temperatura observada por el sensor y la temperatura superficial tomada *in-situ* con otros instrumentos de medición en el rango térmico.

Foto 3. Corredores viales Arbolados. Autopista Fco. Fajardo dirección W-E.



Fuente: Colección personal fotos de la ciudad.

Foto 4. Corredores viales arbolados. Vista autopista Fco. Fajardo altura Jardín Botánico de Caracas. Sentido W-E.



Fuente: Fuente: Colección personal fotos de la ciudad.

Foto 5. Corredores viales arbolados. Autopista altura Urbina. Sentido N-S.

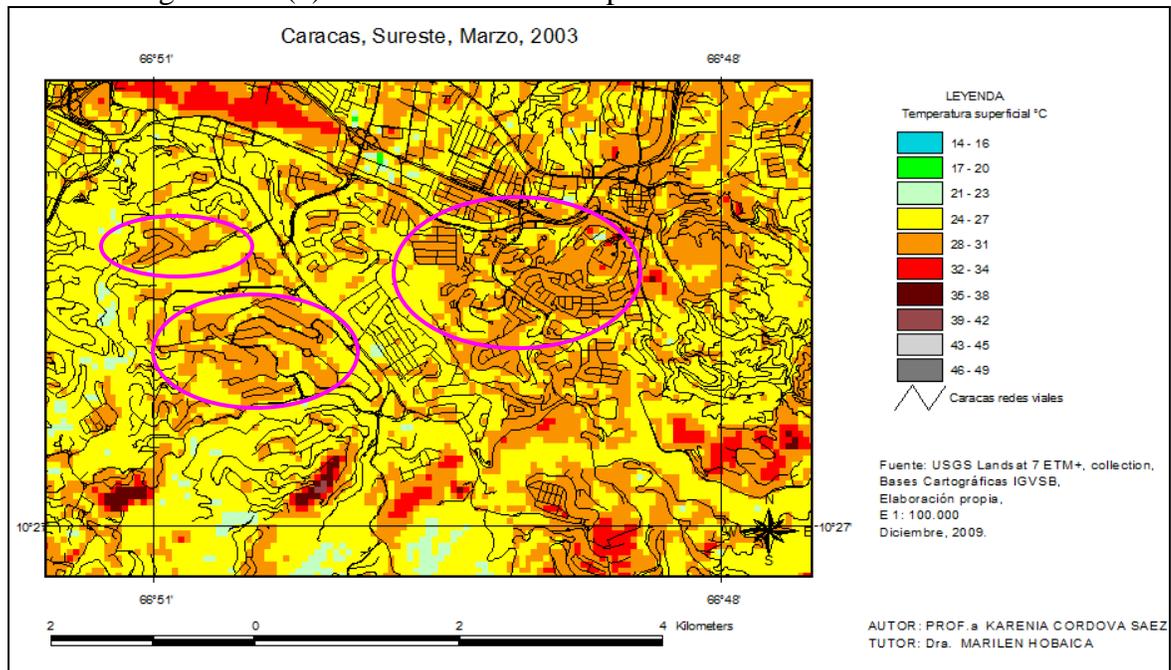


Fuente: Fuente: Colección personal fotos de la ciudad.

Otra de las respuestas térmicas que resulta interesante destacar, es la del ladrillo rojo, (Tabla N° 6) utilizado como teja, o adoquín en plazas abiertas (Sosa *et al.*, 2004; Amigo-Vázquez, 2006).

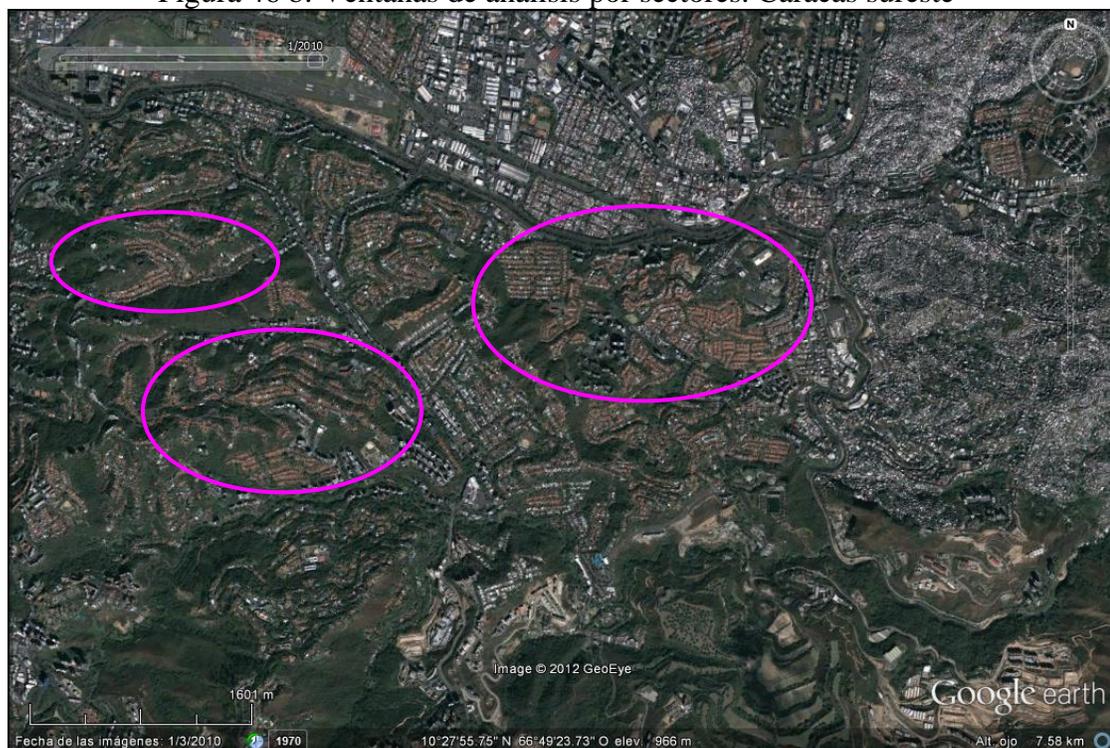
A pesar de los elementos culturales que vinculan su uso a la reminiscencia de tradiciones coloniales en la ciudad, este tiene una respuesta térmica no muy favorable, a los efectos de la formación de la isla térmica en la ciudad (Amigo-Vázquez, 2006), como puede observarse en algunos sectores del sureste de la ciudad, aun a pesar de la baja densidad de estos sectores y la abundante presencia de vegetación intra- y peri-urbana (Figura 46 a, b; Anexo 5: Mapas imagen LST N° 1, 7, 9,11, 25).

Figura 46 a (b). Ventanas de análisis por sectores. Caracas sureste.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 46 b. Ventanas de análisis por sectores. Caracas sureste



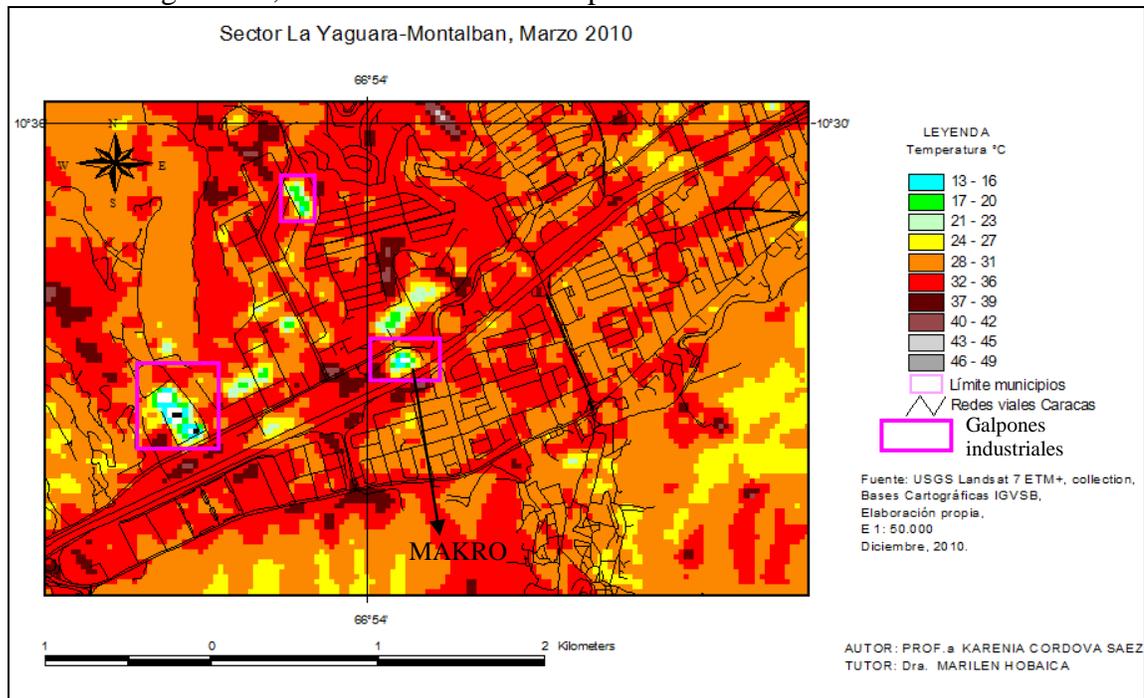
Fuente: Digital Globe-Google Earth, 2012. Elaboración propia.

3.2.1-Anomalías térmicas.

Otro resultado de investigación que resulta interesante destacar, son pequeñas superficies entre 0,2 hasta 1 Ha, correspondientes a galpones industriales, almacenadores e hipermercados, que muestran valores de temperatura superficial significativamente más bajas que el entorno, y que pudieran considerarse como atípicas dentro del contexto general observado. Para observar estos casos analizamos la imagen raster de temperatura superficial generada para el mes de Marzo del 2010 (Ver Anexo 5: Mapa imagen LST N° 25, Figuras 45c y 47 a), período excepcional en el que se registró una intensificación de la temporada de sequia, acompañada de anomalías térmica superficiales (+ 10 °C) en la ciudad de Caracas (OMM, 2010, Córdova, 2011b).

En este caso el entorno esta tan caliente, que las bajas temperaturas de estas estructuras destacan más fácilmente facilitando su identificación, como se observa en la zona industrial de la Yaguara, donde es fácilmente reconocible el galpón del hipermercado MAKRO (Figura 47a, b). Ello sucede también en otros sectores industriales de la ciudad. En la Figura 45c de marzo del 2010, correspondiente al sector de La Carlota, se observa también la zona industrial de Boleíta-Los Cortijos, donde se aprecian superficies con anomalías de temperatura, correspondientes a galpones industriales con temperaturas más bajas que el entorno (Figura 45c).

Figura 47a, b. Ventanas de análisis por sectores. Caracas suroeste.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Figura 47 b. Ventanas de análisis por sectores. Caracas suroeste.



Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Estos hallazgos, que no son fácilmente apreciables a escala 1:100.000 (Anexo 5: Mapa imagen *LST* N° 25), pueden ser explorados en ventanas con mayor nivel de resolución en el sistema de información geográfico-SIG desarrollado, que permite visualizar con mayor nivel de detalle, informaciones que de otra forma no serían perceptibles y que podrían ser de interés para investigar, por ejemplo, los elementos constructivos o el diseño de las edificaciones que originan estas respuestas (Figuras 42 c, 45 c y 47 a).

3.3.- Estacionalidad, variabilidad climática y su relación con la dinámica de las islas térmicas urbanas.

Los efectos de la estacionalidad sobre la formación e intensidad de las islas térmicas urbanas, ya han sido descritos con anterioridad en el capítulo II de este trabajo. Los 27 Mapas-imágenes de temperatura superficial para Caracas (Anexo 5: Mapas imágenes *LST* 2001-2011), en temporada de sequía o lluvia, muestran el efecto de estos cambios estacionales. La variabilidad de los patrones térmicos superficiales observados en la ciudad de Caracas, está en efecto vinculada con la cantidad de radiación solar incidente, que aumenta durante los meses de sequía, porque los factores ambientales y climáticos que contribuyen a mitigar la intensidad del calentamiento superficial diurno se encuentran minimizados (cobertura vegetal, nubosidad, humedad), en tanto que se maximizan aquellos factores (horas insolación, radiación solar incidente, caducifoliedad de la vegetación) que intensifican la formación de la isla térmica superficial urbana (EPA, 2008; Córdova 2011a; 2011b).

Al observar secuencialmente los mapas podemos ver como varían los patrones térmicos entre los meses de sequía, generalmente Enero, Febrero, Marzo, los meses de transición sequía- lluvia, Abril -Mayo, los meses de lluvia, Junio, Julio, Septiembre y Octubre, y nuevamente los meses de transición lluvia-sequía, Noviembre y Diciembre para las imágenes seleccionadas (Anexo 3, Anexo 5: Mapas imágenes LST 2001-2011).

Durante los meses de sequía la isla térmica parece extenderse fuera de los linderos de las zonas urbanas hacia las zonas peri-urbanas, ello en realidad se debe, a la pérdida en la capacidad de mitigación del calor por la vegetación decidua y las gramíneas en las áreas peri-urbanas, aumentando las temperaturas en las zonas urbanas. Esto se aprecia en los mapas correspondientes a los meses de marzo de los años 2001, 2003, abril 2009 y marzo 2010 (Anexo 5: Mapas imágenes LST 2001-2011 N° 1, 7, 9, 11 y 25).

En contraste, durante los meses de lluvia (Junio, Julio, Septiembre) el fenómeno de isla térmica se mitiga, pero no desaparece por completo, permanecen los sectores críticos al sur-oeste sobre las zonas de barrios y las carpetas asfálticas de los ejes viales (Anexo 5: Mapas imágenes LST 2001-2011 N° 3, 4, 5, 14, 18). En algunos casos se observa una respuesta térmica más baja durante los meses de lluvia, ello puede deberse también al efecto de las precipitaciones, que mitigan el calor superficial.

Los meses de menor intensidad del fenómeno de isla térmica superficial en Caracas son, precisamente aquellos durante los cuales la intensidad de la radiación solar disminuye, es decir los meses de Octubre, Noviembre, Diciembre y Enero (Anexo 5: Mapas imágenes LST 2001-2011 N° 6, 8, 10, 12, 15, 16, 19, 23, 24, 26, 27).

También se investigo el impacto de los eventos de variabilidad climática ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) ó ENOS (*El Niño Oscilación del Sur*), sobre la dinámica del fenómeno, ya que estudios realizados a este respecto señalan que durante los eventos ENSO cálidos o Niños de gran intensidad, se intensifica el periodo de sequia en la región centro-norte costera del país, en tanto que durante los eventos Niña o fríos, ocurren excedentes hídricos, que afectan el régimen de las precipitaciones en esta región (CAF, 2000; Aguilar, 2005; Martelo, 2003).

En efecto fue posible comprobar, analizando los valores de los indicador ENSO (SOI- *Southern Oscillation Index* ³⁴) para los meses de las imágenes seleccionadas (Tabla N° 6), que durante los eventos ENSO cálidos (de moderada intensidad, en Marzo 2003 (-0,5) y de intensidad alta (-1,8) en Marzo 2010, se registro un incremento en las temperaturas superficiales observadas para la ciudad de Caracas. Este incremento además, es proporcional a la intensidad del indicador (Tabla N° 7).

³⁴ <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/>

Tabla 7. Valores Indicador SOI-ENSO.

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	1.1	2.7	2.2	2.0	0.6	-0.3	-0.3	1.2	1.4	1.8	3.0	1.3
2001	1.6	2.8	1.5	0.3	-0.8	0.5	-0.3	-0.7	0.3	-0.1	1.1	-1.4
2002	0.7	1.8	-0.4	-0.1	-1.4	-0.4	-0.8	-1.6	-1.0	-0.6	-0.7	-1.8
2003	-0.3	-1.1	-0.5	-0.2	-0.5	-1.0	0.5	0.2	-0.2	0.0	-0.5	1.8
2004	-2.2	2.0	0.7	-1.5	1.7	-1.4	-0.8	-0.5	-0.6	-0.1	-1.1	-1.3
2005	0.6	-5.2	0.5	-1.0	-1.3	0.7	0.3	-0.6	0.6	2.0	-0.3	0.0
2006	2.7	0.2	2.9	1.8	-0.8	-0.4	-1.0	-1.7	-1.0	-2.1	0.1	-0.5
2007	-1.3	-0.1	0.3	-0.2	-0.2	0.9	-0.5	0.7	0.3	1.2	1.4	2.7
2008	2.9	4.4	2.4	1.1	-0.1	1.0	0.5	1.7	2.0	2.1	2.2	2.4
2009	1.8	3.1	0.7	1.3	-0.2	0.2	0.4	-0.3	0.5	-2.0	-1.0	-1.2
2010	-1.8	-2.4	-1.1	2.0	1.5	0.6	3.0	3.0	3.7	2.9	2.1	4.8
2011	3.8	4.5	4.2	3.1	0.6	0.4	1.6	0.7	1.7	1.2	1.8	4.1

SOI (STAND TAHITI - STAND DARWIN) SEA LEVEL PRESS ANOMALY.

Meses Niña estudiados 0.5 - 5

Meses Niño estudiados -0.5- -5

Meses Estudiados sin anomalías ENSO

Fuente: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>

Contrariamente durante los eventos ENSO fríos o Niña, (Marzo 2001, Marzo 2004, Marzo 2005-sequia, Enero 2008, Diciembre 2010 y Enero 2011-lluvias), las temperaturas mejoran en las zonas peri-urbanas y la isla térmica se restringe a los espacios construidos. Ello se debe a que durante los eventos Niña, la temporada de sequia se debilita, aumentando las precipitaciones durante los meses secos, por lo que la vegetación decidua mantiene el follaje y no se observa un aumento de temperatura en estos sectores peri-urbanos (Aguilar, 2005; Martelo, 2003).

En los meses de diciembre del 2010 y enero del 2011 en cambio, en presencia de un evento Niña fuerte (SOI 4,8 y 3,8; Tabla N° 7), las temperaturas superficiales fueron

significativamente más bajas, que durante el año 2009 (Anexo 5: Mapas imágenes LST 2001-2011).

Estos hallazgos parecen estar indicando la necesidad de hacer un seguimiento permanente del impacto de los eventos ENSO sobre las áreas urbanas, para prevenir los riesgos derivados de los eventos hidrometeorológicos asociados a las fases cálidas y frías de estos eventos.

3.4.- Impactos de formación de las islas térmicas urbanas sobre la salud y el ambiente.

En los últimos años, a raíz de las cada vez más intensas olas de calor que afectaron importantes ciudades norteamericanas y europeas (2003-2010), el análisis de las islas térmicas urbanas, la caracterización de su intensidad y extensión vertical (atmosférica) y horizontal (superficial) así como de las interacciones entre el dosel urbano y la atmosfera, han tomado un renovado interés en las comunidades de científicos que estudian el ambiente y el clima urbano, debido fundamentalmente a que el impacto de las olas de calor, se ve intensificado por la formación de la isla térmica en las áreas urbanas (Smith, and Levermore, 2008; UN-Habitat, 2011).

La ocurrencia de estos eventos de calor (que se intensifican por la formación de la isla térmica urbana), sucede en la mayoría de los casos durante la temporada de verano en las latitudes subtropicales o en la época de sequía en las latitudes tropicales. El aumento de la incidencia de la radiación solar asociado a las condiciones

meteorológicas de la temporada de sequía o de verano (altas presiones, cielos claros), origina también un aumento del calor superficial, que incrementa el nivel de stress hídrico de la vegetación, la deshidratación del suelo y la sequedad del aire (Córdova, 2011b). En consecuencia, estos eventos de calor se acompañan también de una alta incidencia de incendios forestales y otros fenómenos atmosféricos como la calima por el aumento de material particulado en suspensión y la intensificación del smog por los humos de incendios³⁵, ocasionando un incremento en la morbilidad y mortalidad por patologías asociadas al calor, cuadros alérgicos y respiratorios (Perdomo, 2009; CDC, 2010).

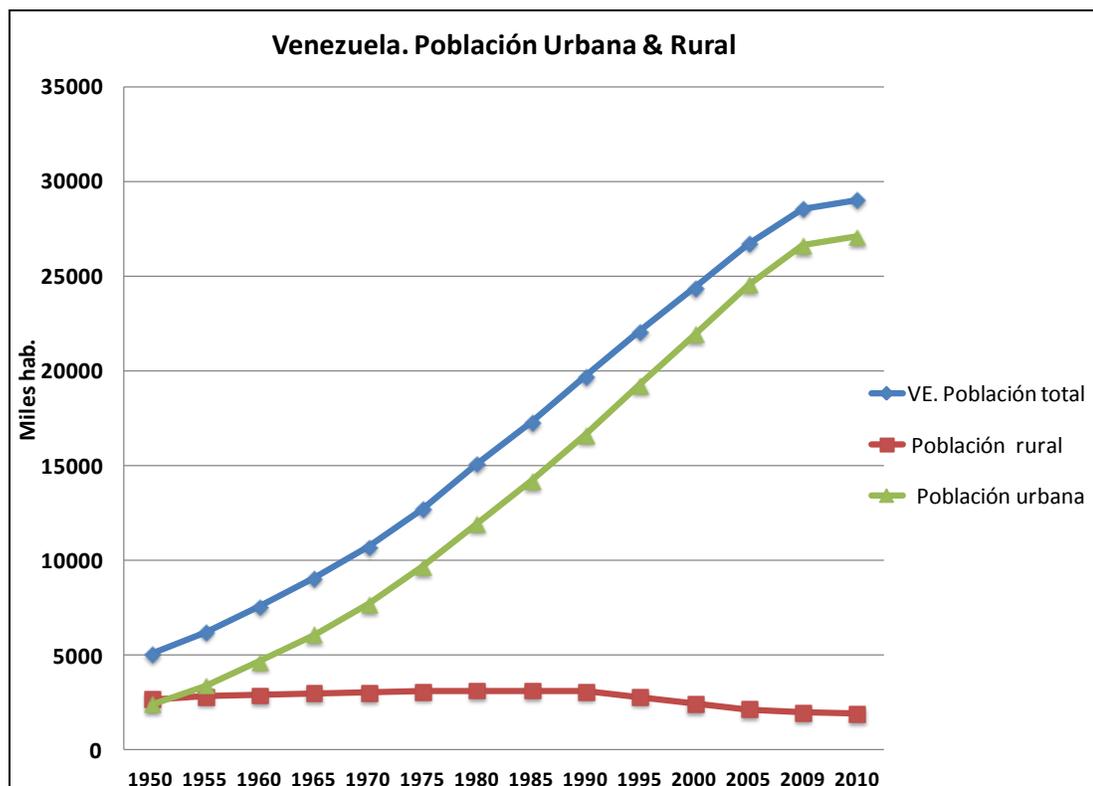
Según las previsiones de importantes agencias ambientales y climáticas como el Panel Intergubernamental de Cambio Climático-IPCC (IPCC, 2007) y la Organización Mundial de Meteorología-OMM (OMM, 2011), la intensificación en la ocurrencia de las olas de calor puede estar vinculada a los efectos del cambio climático, de allí la importancia de monitorear estos eventos, así como la intensidad y extensión de la isla térmica en las áreas urbanas, por la vulnerabilidad de la población urbana frente a estos eventos climáticos. En el contexto latinoamericano esta labor particular reviste importancia, debido a que las ciudades en el año 2010³⁶, albergan alrededor del 90% de la población.

³⁵ <http://www.bt.cdc.gov/disasters/wildfires/espanol/>

³⁶ <http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm>

En el caso de Venezuela para este mismo año, el porcentaje de la población urbana correspondería al 94% de la población total, es decir, que apenas el 6% de la población se localizaría en medios rurales (United Nations, 2009, Figura N° 48).

Figura 48. Venezuela. Crecimiento de la población rural y urbana



Fuente: World urbanization prospects: The 2009 revision. (United Nations, 2009)

Las islas térmicas urbanas suelen asociarse también, con anomalías superficiales de temperatura por ello es primordial su cuantificación y caracterización, ya que son indicadores importantes de cambio, bien sean positivas + o negativas-, es decir, por encima o por debajo de los valores medios estimados o registrados para la

temperatura superficial y tienen impacto inmediato sobre el ambiente y el clima local, como lo ocurrido en el año 2010 en varias regiones del globo (OMM, 2011; Trenberth and Fasullo, 2009).

En el año 2010 importantes anomalías climáticas fueron registradas en todo el planeta. Según las estimaciones de la Organización Mundial de Meteorología-OMM, la década de 2001-2010 es también la más cálida de la que se tiene registro, siendo el año 2010, uno de los años más cálidos desde 1998 (OMM, 2010; 2011). Estas circunstancias son preocupantes, debido precisamente a que la intensidad de los eventos extremos de calor en el planeta ha ido en aumento en las últimas décadas (Arndt, *et al.*, 2010), y se estima que podría aumentar significativamente tanto en frecuencia como en intensidad en el siglo 21 (Meehl y Tebaldi, 2004).

Ello significa que los riesgos a la salud derivados del calor extremo se incrementarán, y por las condiciones particulares de la climatología local (la formación de la isla térmica), la población residente en los espacios urbanos será particularmente vulnerable a la ocurrencia de estos eventos (Córdova, 2011b).

A los efectos de este trabajo consideraremos como calor extremo a aquellas temperaturas que se sitúan en 10 grados o más por encima de la temperatura alta promedio para una región y permanecen así por varias semanas, y puede ocasionar diversas afecciones que van desde las quemaduras de piel, calambres, agotamiento, insolación, golpe de calor (CDC, 2010).

En un estudio recientemente publicado sobre ciudades de América latina, realizado en Sao Paulo, Santiago de Chile y Ciudad de México, se reportó una asociación importante entre la elevada temperatura y el riesgo de mortalidad (Bell *et al.*, 2008; Ribeiro, 2005). Las conclusiones generales del estudio señalan que en todas las ciudades estudiadas la población más vulnerable son los ancianos. En Sao Paulo, la ciudad con mayores registros de temperaturas, se mostró una fuerte asociación entre la vulnerabilidad al calor extremo y el nivel educativo, en tanto que en la ciudad de México los resultados mostraron que la población femenina es más vulnerable que la masculina frente a la ocurrencia de eventos extremos de calor (Bell *et al.*, 2008; Ribeiro, 2005).

Por su parte, la agencia federal para el manejo de emergencias-FEMA, afirma que las personas que residen en zonas urbanas tienen un mayor riesgo de sufrir los efectos de una ola de calor prolongada, que los que residen en zonas rurales; también afirman que la población más vulnerable son los ancianos, los niños pequeños, los enfermos crónicos y las personas obesas (FEMA, 2010).

Según el Centro para el Control de Enfermedades (CDC, 2010) y la FEMA (FEMA, 2010), las patologías por calor excesivo más comunes son:

-Calambres por calor: Espasmos musculares (calambres), transpiración intensa, fatiga, temperatura del cuerpo ligeramente elevada.

-Agotamiento por calor: Debilidad extrema, agotamiento, cefalea, mareos, náuseas, sudoración profusa, piel fría, temperatura del cuerpo ligeramente

elevada, pulso rápido, a veces se desarrolla un estado comatoso (inconsciencia).

-Golpe de calor: Transpiración interrumpida, piel seca y caliente, cefalea, náuseas, confusión, marcha tambaleante, temperatura extremadamente elevada, colapso, riesgo de muerte (FEMA, 2010).

En términos de la gestión del riesgo asociado a la ocurrencia de eventos extremos de calor, la producción de estos mapas térmicos (Anexo 5: Mapas imagen LST 2001-2011) posibilita la identificación de las áreas expuestas a mayor riesgo, y contribuye con el diseño de estrategias de mitigación y/o de atención a la población.

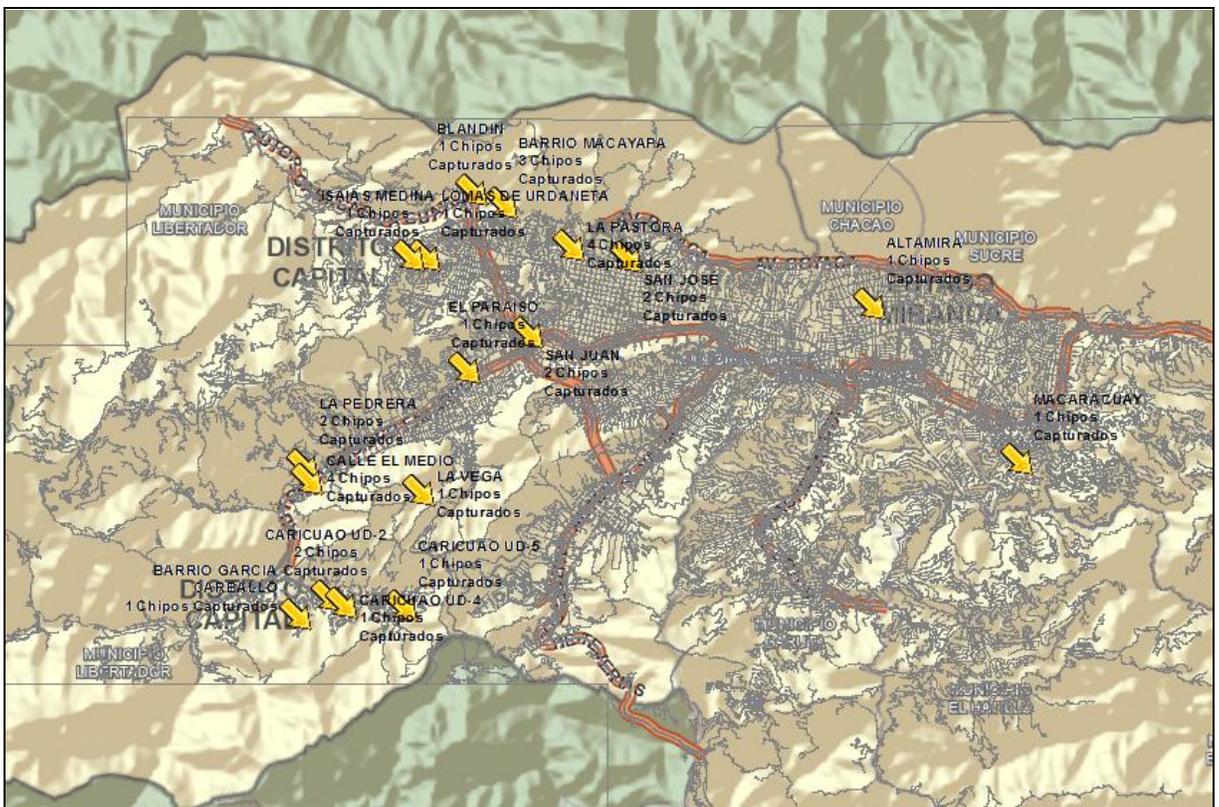
Es necesario considerar además, que la incidencia de incendios forestales en las zonas peri-urbanas cercanas a los sectores de bajos ingresos, aumenta no solo por las condiciones de *stress* hídrico de la vegetación (que se incrementa durante la ocurrencia de eventos extremos de calor), sino también por la práctica recurrente de quemar basuras debido a la inexistencia y/o ineficiencia de los mecanismos de recolección, y a la tala y quema intencional de vegetación, para expandir las áreas ocupadas por urbanismo informal (Córdova, 2011a).

Este aumento en la incidencia de prácticas como la tala y quema de vegetación ha propiciado el desplazamiento desde su hábitat natural, hacia las zonas periurbanas y urbanas de vectores como el chipo (*P. geniculatus*) portador del parásito *Trypanosoma cruzi*- *T. Cruzi* transmisor de la enfermedad de Chagas y facilitado la

adaptación del ciclo biológico del *T. Cruzi* (hemoparásito flagelado) al medio urbano, para lo cual se requieren de nuevas estrategias de control (Noya et al, 2009).

Un reciente análisis publicado por la alcaldía metropolitana de Caracas, muestra la mayor cantidad de reportes de chipos capturados, precisamente en el suroeste de la ciudad, donde la incidencia de incendios forestales en zonas peri-urbanas es mayor, (Figura 49, Anexo 5: Mapas imágenes LST 2001-2011 N° 1, 7, y 25).

Figura 49. Caracas. Localidades urbanas donde fueron capturados Chipos, 2010.



Fuente: <http://caracasenunlick.com/c1c/>

La introducción de chipo (*P. geniculatus*) en las viviendas de estos sectores, usualmente ocurre luego de que su hábitat es perturbado por desmontes, movimientos de tierra, talas y quemas. Adicionalmente durante las noches, la luz de las casas y del alumbrado público, atrae a estos vectores desde su hábitat natural (matorrales ó bosque), hacia las viviendas (Reyes, 2011).

El ciclo de vida del vida del vector (*P. geniculatus*) en la región centro-norte de Venezuela, se completa durante los meses de marzo y mayo, es decir, a finales del periodo seco e inicios del lluvioso, momento en el cual los adultos abandonan sus nidos y emprenden el vuelo en la búsqueda de ingesta sanguínea y nuevos lugares donde realizar la postura de los huevos e iniciar una nueva colonia (Reyes, 2011).

La desaparición del hábitat de estos vectores, implica también la desaparición de sus fuentes naturales de alimentación, sangre de pequeños mamíferos como roedores, rabopelados y cachicamos, que están siendo sustituidos por gallinas, y nuestras mascotas, perros, gatos, así como por las ratas que pululan en los basurales (Noya et al, 2009; Reyes, 2011).

Ello plantea un escenario socio-natural complejo, ya que la expansión de los desarrollos urbanos informales o formales, a expensas de las áreas naturales peri-urbanas remanentes, implica un riesgo creciente de transmisión de la Enfermedad del Chagas, que debe ser controlado y minimizado a través de programas de educación sanitaria, modificación y mejoramiento de la viviendas (frisado de paredes, tela mosquitero), manejo y procesamiento de alimentos, así como de programas de

rociamiento intra- domiciliarios que controlen los vectores domiciliados (Noya et al, 2009).

Las olas de calor, la sequía y el fuego incrementan también, la ocurrencia de problemas ambientales y las enfermedades; ya que se intensifica la contaminación del aire por el aumento del material particulado en suspensión, así como por emisiones de CO₂, dioxinas y otros contaminantes perjudiciales para la salud. Todo ello repercute en la incidencia de enfermedades respiratorias, como alergias, asma y otras afecciones bronquiales, como reporta Perdomo, (2009) en su estudio sobre los contaminantes atmosféricos en el valle de Caracas (Perdomo, 2009).

Durante el evento de calor de marzo del 2010, casi la totalidad de la ciudad muestra anomalías térmicas importantes (Anexo 5: Mapa imagen LST N° 25), los sectores del oeste y sur-oeste de la ciudad en el municipio Libertador fueron las zonas más afectadas por las altas temperaturas y la ocurrencia de incendios en las zonas peri-urbana, aunque el incendio de la ladera sureste del Ávila, afectó también sobre todo a las comunidades de la Urbina, California Norte y Terrazas de Ávila. Las densas nubes de humos generados por los incendios forestales provocaron un repunte en las afecciones respiratorias, como reportó el Boletín Epidemiológico del Ministerio del poder popular para la Salud, correspondiente a las semanas epidemiológicas N° 10 y 11, que abarca las incidencias de casos desde el 7 al 20 de Marzo, coincidiendo con los días en que se presentó la mayor intensidad del evento (Córdova, 2011b, Min.p.p Salud, 2010).

Capítulo IV.-Estrategias de prevención, adaptación y mitigación de los efectos de la isla de calor urbana.

A partir de los análisis térmicos, de índice de vegetación y usos del suelo desarrollados e integrados en un *SIG*, fue posible caracterizar la dinámica de la isla térmica superficial en la ciudad de Caracas, identificando los sectores más críticos en términos de las altas temperaturas superficiales observadas, y asociando estas respuestas térmicas a la densidad del espacio construido y a la presencia de vegetación intra y peri-urbana. De acuerdo a los resultados obtenidos, las áreas más críticas en términos de las respuestas térmicas observadas, se localizan en los valles transversales de los ríos Valle y Guaire-Macarao, correspondientes a los sectores del suroeste de la ciudad, en tanto que las menos críticas se corresponden con los sectores de noreste y sureste de la ciudad.

En ambos casos se hace necesario el desarrollo de estrategias, que pueden ser de carácter preventivo, como el mantenimiento de corredores vegetales y las áreas verdes existentes en aquellos sectores menos críticos, o combinadas con estrategias de mitigación en los sectores más críticos de la ciudad. Estos aspectos serán materia de análisis en este capítulo IV.

De manera general se analizan las estrategias que a nivel regional y global, se proponen para tratar el problema de la isla térmica urbana, mediante estrategias preventivas de recuperación y conservación vegetal, como los corredores verdes,

combinadas con estrategias de mitigación verdes, como los techos verdes intensivos y extensivos, o estrategias reflectivas. Serán analizadas también las ventajas, desventajas y barreras de implantación de estas estrategias de mitigación, así como la revisión de otros mecanismos comunitarios para la defensa y conservación de las áreas verdes remanentes.

En todo caso es imprescindible reconocer que las islas térmicas urbanas constituyen un factor de riesgo que aumenta la vulnerabilidad de las poblaciones urbanas, debido al aumento en la frecuencia e intensidad de las amenazas o eventos hidrolimáticos extremos asociados al cambio climático, como las olas de calor y severas sequías, cuyos impactos se intensifican en las ciudades, por la formación de la isla de calor urbano (UN-Habitat, 2011). Reconocer esta realidad, es el punto de partida necesario para el desarrollo articulado de medidas de mitigación y acciones preventivas, que permitan disminuir el potencial de formación de la isla de calor urbano.

4.1.-Estrategias de prevención para disminuir el potencial de formación de islas de calor urbano.

Desde el punto de vista de la ecología urbana, las islas de calor pueden constituir el termómetro del metabolismo urbano, una medida del nivel de compromiso orgánico, un alerta de la mala funcionalidad orgánica que compromete la salud de la ciudad como entidad viva (Terradas, 2001). Bajo el enfoque ecológico, las ciudades pueden entenderse como sistemas complejos, abiertos y heterotróficos, que dependen de

suministros constantes de recursos, materia y energía provenientes de otros lugares para mantener su organicidad y funcionalidad (Terradas, 2001; Collins *et al.*, 2000).

Sin embargo, el reconocimiento de las ciudades como estructuras disipativas, que absorben continuamente energía del medio y la dispersan en forma no aprovechable (sistema disipativo), ha inducido reflexiones y planteamientos que colocan el debate *sobre la forma y tendencias del crecimiento urbano*, en el centro de las discusiones sobre la sostenibilidad de los sistemas urbanos³⁷ (Rueda, 1995, Terradas, 2001).

En este contexto, los estudios sobre la isla térmica urbana, pueden entenderse como una forma de cuantificar la intensidad del impacto ambiental y climático ocasionado por las estructuras disipativas urbanas, pero que al mismo tiempo pueden aportar información importante, para maximizar la recuperación de la entropía en términos de información (Prigogine, 1977).

Las estrategias de mitigación y prevención, podrían conceptualizarse entonces, como mecanismos de retroacción, de retroalimentación de los sistemas, y estos dependen básicamente del flujo de información, por lo tanto, su efectividad será mayor cuanto más información podamos obtener de los procesos entrópicas que se generan en el sistema urbano.

Al analizar casi una década (2001-2011) de variación anual estacional y multitemporal del fenómeno de la isla térmica urbana en Caracas, estamos

³⁷ Según Naredo y Rueda (1996), las ciudades sostenibles son aquellas que utilizan eficientemente la energía, el espacio y los recursos naturales minimizando la entropía ambiental y generando bienestar social. Es una ciudad que se construye a si misma de un modo participativo, y de acuerdo a unos principios ecológicos, de igualdad y educadores.

precisamente, maximizando la recuperación de información de los procesos entrópicos que generan este fenómeno, lo cual nos ayuda a orientar, de manera más efectiva, las estrategias preventivas o de mitigación en la ciudad.

4.1.1.-Conservación de espacios naturales, reforestación taludes, rescate y arborización espacios remanentes vialidad.

El primer nivel en el desarrollo de las estrategias es de carácter preventivo, y está relacionado con el rol de la vegetación en la mitigación del fenómeno de isla térmica superficial, que ha sido ampliamente reconocido en los trabajos e investigaciones sobre este fenómeno (Akbari, 1992; Kurn *et al.*, 1994; Taha, 1997; McPherson, 1994; EPA 2003; EPA, 2008), además de ser una de las estrategias más sencillas de implementar y que contribuyen a incentivar el compromiso de los ciudadanos como individuos y como colectivo, en la recuperación de la vegetación de los espacios públicos y corredores viales.

Los beneficios de la arborización en el espacio urbano, de acuerdo al manual de estrategias de mitigación de la EPA son múltiples (EPA, 2008; Cap.2 y 6):

- Los arboles disminuyen la demanda de climatización artificial, al proveer sombra a las edificaciones, refrescando las fachadas y mitigando la carga térmica.
- Mejoran la calidad del aire y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, de manera directa por captura de CO₂, y de forma

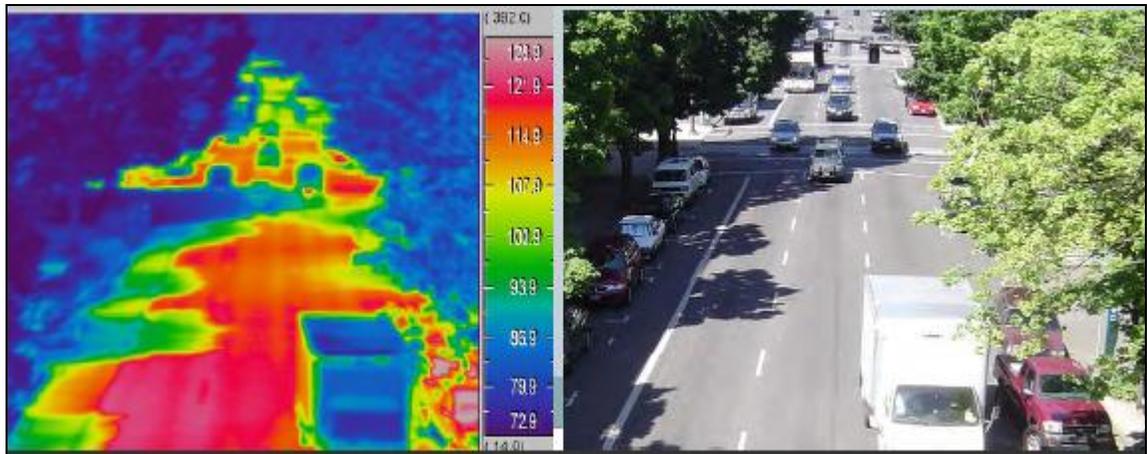
indirecta al reducir la demanda energética por climatización, lo que disminuye la demanda a nivel de generación y en consecuencia, la producción de gases de efecto invernadero asociada.

- La sombra de los arboles disminuye la necesidad de mantenimiento de la carpeta asfáltica. Al disminuir los efectos de expansión y contracción del material en respuesta al calor, se reducen las grietas en la cobertura asfáltica, disminuyendo en consecuencia la cantidad de mantenimiento necesaria (Figura 48).
- Disminuyen la velocidad de escorrentía de las aguas pluviales y permiten un mejor manejo de las aguas de tormentas, así mismo mejoran la calidad de las aguas absorbiendo y filtrando las aguas de lluvia.
- Mejoran la habitabilidad y la calidad de vida en los espacios urbanos, los arboles reducen el ruido, mejoran la calidad del aire, proveen refugios a diversas especies en el medio urbano y aportan un importante valor paisajístico y estético.

Un ejemplo de ello puede observarse en la imagen infrarroja (Figura 50), que muestra las diferencias en la temperatura sobre las superficies asfaltadas, entre aquellas expuestas directamente a la radiación solar y las sombreadas por la vegetación. Las

diferencias son obvias, mostrando los beneficios de arborizar los corredores viales en la ciudad.

Figura 50. Imagen infrarroja de temperaturas superficiales urbanas.



Fuente: http://files.harc.edu/Projects/DallasUHI/UHI_Basics.pdf

A medida que la ciudad se expande y se incorporan nuevos sectores al desarrollo urbano, van quedando espacios remanentes (taludes), que por razones de pendiente (Ley Forestal de Suelos y Aguas, 1996; Ley del Orgánica del Ambiente, 2006), o por estar en medio ó a las márgenes de vías expresas de rápida circulación, no son urbanizables. Estos espacios son ideales para el desarrollo islas de vegetación o corredores viales de vegetación. Sin embargo, la selección de las especies a plantar es de suma importancia dependiendo de la disponibilidad de espacios y de la proximidad a la infraestructura vial.

En los casos de las islas de vegetación o corredores viales, se recomiendan arboles de tamaño mediano, no deben tener copa extendida y de la misma especie, de preferencia especies autóctonas como el Apamate, Araguaney, Urape, Atapaima o

Amapola, Totumo-Taparo, Araguan, Tampaco, Almendrón, Chaparro, Vera, Aguacate, etc., (Hoyos, 1990).

Uno de los corredores verdes más importantes, a lo largo de vías expresas en la ciudad, es el canal de embaulamiento del río Guaire. A pesar de ser una estructura artificial de contención y regulación del caudal del río, se dejaron en algunos tramos márgenes más amplios que permitieron arborizar ambos lados del canal, constituyendo hoy en día un corredor verde, que podría ser quizás más dinámico y representativo de las especies de flora locales (Figura 51).

Figura 51. Caracas. Corredor verde del Guaire. Tramo San Agustín.



Fuente: Digital Globe, Google Earth, 2012.

Los corredores viales intra-urbanos son también importantes elementos de la vegetación intra-urbana, junto con las plazas, parques, huertos y jardines públicos o privados (Fotografía N° 6, 7).

Foto 6. Caracas. Corredor verde intra-urbano. Sector Montalbán II.



Fuente: Colección personal imágenes valle de Caracas.

Foto 7. Caracas. Sector Montalbán I y II. Parques residenciales integrados a corredores verdes intra-urbanos.



Fuente: Colección personal imágenes valle de Caracas.

Con frecuencia, estos se ven afectados por los cambios de uso, rezonificaciones, usos comerciales, medico-asistenciales y recreacionales, que talan arboles para habilitar espacios de estacionamiento y circulación. En muchos casos, luego de construida la nueva infraestructura, no se recupera la vegetación por lo que las pérdidas de vegetación intra-urbana tienden a aumentar sin reposición.

Los taludes remanentes (áreas verdes con pendientes superiores a 40%) son también abundantes en las urbanizaciones del sureste caraqueño, como Santa Mónica, Bello Monte, Santa Inés, San Román, Santa. Fe, entre otras y en los sectores de Montalbán, Caricuao al suroeste así como en las vías peri-urbanas hacia los sectores del Junquito, los Teques, La Mariposa, Hoyo de la Puerta, El Hatillo, Mariches, etc. Estos taludes están por lo general recubiertos de vegetación natural, sucesiones secundarias de bosques semidecíduos y gramíneas (Fotografías N° 8, 9).

En la mayoría de los casos estas áreas no tienen desarrollo de infraestructura recreacional, aunque si son aprovechados por las comunidades para hacer senderismo, caminatas y otras actividades deportivas, además de servir de refugio a múltiples especies de fauna y flora (Fotografías N° 8 y 9).

Estos espacios también, cumplen una importante función ambiental pues contribuyen con la renovación y refrescamiento del aire, aportando humedad y capturando CO₂ y material particulado, además de tener un rol en la recreación pasiva o contemplativa, por su valor paisajístico (Fotografías N° 8 y 9).

Foto 8. Caracas. Taludes remanentes, Urb. Colinas Bello Monte



Fuente: Colección personal imágenes valle de Caracas.

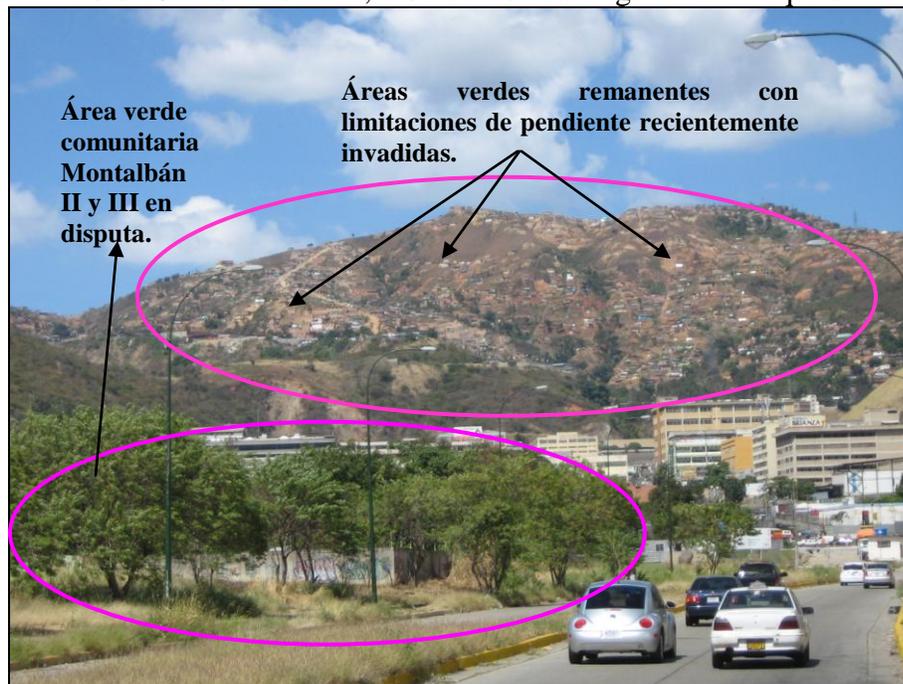
Foto 9. Caracas. Taludes remanentes, Urb. Bello Monte



Fuente: Colección personal imágenes valle de Caracas.

En la última década, las presiones urbanas sobre las áreas verdes y espacios recreacionales públicos en la ciudad de Caracas se han incrementado por la demanda de tierras urbanas para desarrollos multi-familiares de viviendas, dentro del Plan Gran Misión Vivienda Venezuela³⁸ que promueve el estado, sobre todo en los sectores del suroeste y sureste de la ciudad. En muchos casos, estas áreas servían como espacios deportivos y de recreación para las comunidades, como los sectores afectados por el decreto de emergencia para viviendas, en el parque Vargas próximos a Parque Central, El Paraíso y en Montalbán I, II y III (Fotografía N° 10).

Foto 10. Montalbán III, distribuidor La Yaguara-El Junquito.



Fuente: Colección personal imágenes valle de Caracas.

³⁸ <http://www.misionvivienda.gob.ve/>

Ello ha desatado numerosas controversias entre las autoridades municipales y los consejos comunales y asociaciones de vecinos en los sectores afectados, fundamentalmente por la falta de la obligatoria consulta a estas instancias (Ley de Consejos Comunales, Artículos 4 y 6), previa a la afectación de los terrenos considerados como baldíos urbanos (Ley de Tierras Urbanas, Artículos 5 y 6, Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.933, 2009).

Sin embargo, La ley de emergencia para terrenos urbanos y vivienda, sancionada en enero del 2011 (Gaceta Extraordinaria 6018), en su Artículo N° 9, avala la posibilidad de ocupación previa de los terrenos cuando se califique la emergencia, como consecuencia de calamidades o catástrofes. Dentro de este ámbito de actuación, y amparados por la Ley de Emergencia, los decretos de afectación por parte de autoridades municipales se han multiplicado, así como las ocupaciones e invasiones de tierras urbanas³⁹. Ello configura un escenario de conflictividad social creciente, quedando en medio de las disputas, los espacios peri-urbanos de vegetación natural y las áreas verdes intra-urbanas afectadas y/o potencialmente susceptibles de ser afectadas.

Existe sin embargo en el capítulo III, de la Ley de Tierras Urbanas, la posibilidad de reclamos y reconsideraciones de estos decretos de ordenanza de zonificación. Ya que en la mayoría de los casos no se cumple con el requisito previo del estudio de suelo,

³⁹ En la página de la Alcaldía de Libertador, sección documentos, se pueden descargar las ordenanzas de zonificación que afectan algunos de estos sectores. www.caracas.gob.ve/

que determina la condición de suelo urbanizable o no, caso contrario el artículo N° 11 prevé textualmente que:

En todo caso, si del estudio del suelo resultare que el mismo no soporta ningún tipo de construcción, se destinará para la ejecución de proyectos ornamentales o arbóreos que permitan recrear las áreas urbanas y contribuyan a mejorar el medio ambiente.

Asimismo en el artículo 12 de la Ley, se definen las zonas de riesgo, como:

..los terrenos que por las características del suelo que lo componen sean potencialmente inundables, inestables, los que tengan pendientes muy pronunciadas, propensos a derrumbes y aquellos declarados por las autoridades con competencia en materia de protección civil y administración de desastres.

y en el Artículo 13 de la Ley se especifica, que...*En las tierras urbanas calificadas de alto riesgo, por las autoridades competentes, no se podrá construir edificación alguna.*

De acuerdo a lo anterior, existe un marco legal vigente que de alguna manera ofrece protección a las áreas verdes en zonas peri-urbanas, dado que en su mayoría, por las características de la pendiente y el sustrato geológico, constituyen zonas de riesgo no aptas para desarrollos urbanos.

El problema está precisamente en la falta de cumplimiento de la norma, con el agravante de que muchas veces las propias alcaldías facilitan las tomas de estos terrenos, ofreciendo protección, créditos y ayudas que hacen más expedita la consolidación de la ocupación, como ocurrió en el Parque Vicente Emilio Sojo en la cota 905⁴⁰.

Las áreas verdes intra-urbanas en cambio, caen en la categoría de terrenos baldíos según la ley, y son altamente susceptibles a presiones y cambios de uso, como ocurrió con amplios sectores arborizados del Parque Vargas (tanto al norte como al sur) en la Av. Bolívar, desforestados y cercados y actualmente en desarrollo para 776 viviendas multifamiliares⁴¹.

En términos de gestión, la gerencia ambiental de la ciudad de acuerdo a la Ley Especial del Régimen Municipal del Área Metropolitana de Caracas, de fecha 30 de septiembre de 2009, está bajo la responsabilidad de la Alcaldía Metropolitana. Uno de sus programas la Eco-ruta, desarrolla en coordinación con las organizaciones vecinales, programas de recuperación y ornato de áreas públicas⁴². No se pudo identificar sin embargo, algún programa específico (fitosanitario) para la recuperación y/o arborización urbana, aunque desde el Instituto Metropolitano de Urbanismo-IMUTC, se apoya la iniciativa de rescate de la Carlota como parque

⁴⁰ <http://www.apiur.org/inmuebles/hemeroteca/invasiones/invasores-de-la-cota-905-dicen-que-el-fides-les-dio-creditos.html>

⁴¹ <http://www.eluniversal.com/caracas/111113/con-esos-edificios-terminaran-de-sepultar-a-parque-vargas> , <http://www.eluniversal.com/2011/04/30/reiteran-rechazo-a-torres-en-parque-vargas.shtml>

⁴² <http://www.ecocaracas.com/homepage/>

Verde, integrando el Parque del Este con el Parque La Carlota propuesto. La apertura de concurso público sobre el tema, ha abonado el debate con variadas e interesantes propuestas⁴³.

Las alcaldía de Baruta y Sucre a su vez, ofrecen un servicios desmalezamiento, tala, poda y trasplante de arboles, tampoco se identifico un programa fitosanitario específico, ni de arborización. En todo caso, existen las instancias para la gestión ambiental urbana en las que podría desarrollarse, de forma coordinada con otras instancias de gobierno, programas de arborización, sobre todo en aquellos sectores identificados como críticos, en términos de la formación de la isla térmica superficial en la ciudad. Campañas informativas sobre la importancia y cuidado de los corredores arbóreos, herramientas interactivas de información con participación de las comunidades, donde sean ellos mismos los encargados de la elaboración del censo arbóreo, con asistencia de instancias académicas y de gestión, pueden ser herramientas valiosas en el desarrollo de estos programas de mitigación.

4.2.-Estrategias de adaptación y mitigación de la isla térmica urbana en Caracas, de acuerdo a la caracterización espacio-temporal, térmica y urbano-ambiental.

A nivel de la unidad residencial, pueden desarrollarse también estrategias para contribuir con la mitigación de la isla térmica superficial en los sectores del oeste y

⁴³ <http://www.concursolacarlot.com/>

suroeste, identificados como los más críticos en la ciudad. Creemos sin embargo, que sería necesario, comenzar primero por el ambiente externo a la vivienda como se señaló en el acápite anterior, repoblando las calles y avenidas de arboles para consolidar los corredores verdes, rescatando parques, islas viales, y todo terreno o área marginal a la vialidad donde sea posible arborizar.

Las mejoras ambientales externas, incentivan e identifican a la comunidad a través de los valores ambientales, la experiencia de la comunidad ecológica de Caricuao es un ejemplo de este tipo de identificación, que debería servir de modelo para ser replicada en otros sectores⁴⁴. En otras zonas de la ciudad no obstante, es necesario crear ese sentimiento de reconocimiento e identificación de la comunidad con su entorno ambiental, como punto de partida para lograr internalizar en las comunidades, mayores responsabilidades individuales y colectivas con su entorno ambiental. A partir de allí, debería ser posible lograr un mayor nivel de compromiso que permita ir involucrando a las propias comunidades, a través de sus juntas de condominio y consejos comunales, en el mantenimiento, cuidado y mejora, de sus propias edificaciones, áreas verdes y espacios recreacionales (Entrevistas realizadas a vecinos de la comunidad de Montalbán II y miembros del Consejo Comunal Juan Cardón Montalbán I, Caracas, Diciembre, 2011).

⁴⁴ <http://caricuaofotohistoria.blogspot.com/2007/11/caricuaoparroquiaecologica.html>

Los talleres comunitarios implementados a través de las alcaldías, universidades y consejos comunales, son importantes herramientas de trabajo, tanto en las fases iniciales, como en el tiempo para seguimiento y control. El trabajo debe hacerse también a diferentes niveles, aprovechando las ventajas de los recursos informáticos (blogs, portales web, pin, twitter, etc.) que facilitan la fluidez de la información.

4.2.1.-Techos verdes (green roof), corredores verdes, fachadas verdes.

Una de las soluciones propuestas para la mitigación de la isla térmica superficial son los techos verdes o techos vivos. Los beneficios ambientales y económicos de los techos verdes pueden ser múltiples y se resumen en la tabla a continuación (Figura 52; Tabla N° 8).

Estas estrategias han sido empleadas, sobre todo, en ciudades de latitudes subtropicales, en Canadá, Estados Unidos, países europeos y Japón, aunque existen también ejemplos de implantación en India, México, Colombia, Brasil, Uruguay y Chile (Minke, 2004).

De acuerdo a sus características los techos verdes pueden ser de dos tipos:

- Intensivos e extensivos (Tabla N° 8).

Figura 52. Chicago. Diferencias de temperatura superficial entre techo Verde semi-intensivo y techo convencional sobre edificio del ayuntamiento



Fuente: EPA (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Green Roofs.

4.2.1.1-Techos verdes extensivos.

Son los más utilizados por sus costos más bajos de implementación y mantenimiento. Implica el desarrollo de sistemas modulares o sabanas pre-cultivadas, sobrepuestas al techo convencional o azotea (Minke, 2004; Oberndorfer *et al.*, 2007).

Requiere un trabajo previo de impermeabilización y sellado del techo de larga duración, sobre el que se coloca el sistema modular de bandejas o la sabana de vegetación (Oberndorfer *et al.*, 2007; EPA, 2008) que contendrá el agregado de suelo y las plantas, generalmente gramíneas, vegetación arbustivas de mediano a bajo desarrollo radicular, plantas suculentas o semi-xerófilas, un ejemplo de este tipo de sistemas se observa en la Figura 53.

Tabla 8. Beneficios Techos Verdes Extensivos e Intensivos.

Tipo Techo Verde	Beneficios Ambientales	Beneficios Económicos	Beneficios psicológicos.	Beneficios Estéticos
Extensivo	<ul style="list-style-type: none"> -Mitigación del efecto de isla de calor. -Control del agua de lluvia y precipitaciones. -Reducción de la contaminación del agua de lluvia. -Reconstitución del paisaje natural. -Mejoramiento calidad del aire. Reducción del ruido. -Mejoran la eficiencia energética. -Embellecen el ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Conservación de la energía. -Aumento de la durabilidad de los recubrimientos en techos. -Estímulos al desarrollo bajo la forma de créditos, subsidios o reducciones de tarifas. -Incremento del valor comercial de la edificación. -Productividad y generación de empleos e ingresos. -Innovación desarrollo de líneas de investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento de la sensación de bienestar. -Construcción de un sentido de identificación comunitario. -Influyen en la salud física y mental. 	<ul style="list-style-type: none"> -Posibilidad de Desarrollo de elementos paisajísticos que mejoran la visual. -Integración visual y paisajística. -Transformación techos convencionales en espacios placenteros para el relajamiento y el disfrute.
Intensivo	Todas las anteriores + Aumento de la biodiversidad.	Todas las anteriores	Todas las anteriores	Todas las anteriores

Fuente: Gernot Minke, Techos Verdes, 2004 / EPA, 2008.

A pesar de que los sistemas de bandejas son desarrollados con materiales ligeros, la implementación del techo verde o vivo, supone una carga adicional sobre la edificación que debe calcularse. En las dos últimas décadas, la oferta de servicios de instalación de estos techos vivos (que incluyen todos estos aspectos) se ha ampliado considerablemente, facilitando la difusión de esta modalidad de mitigación de la isla térmica superficial (Minke, 2004; Oberndorfer *et al.*, 2007).

Figura 53. Sistema Modular de Bandejas, para el desarrollo del techo verde extensivo.



Fuente: <http://www.greentechtm.com/systems/>

Las innovaciones tecnológicas registradas también son importantes, sobre todo en el diseño de bandejas y técnicas de ensamblado, en sustitución de los sistemas más rígidos, no modulares o tipo sabana, combinando además, tecnología y elementos paisajísticos como dibujos, formas y materiales (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Entre las ventajas más importantes de los techos extensivos estarían:

-Ligeros, fáciles de adaptar a grandes superficies y a techos con pendientes de 0 a 30°, bajo mantenimiento, baja frecuencia o ninguna necesidad de irrigación y de infraestructura de riego, no requiere gran experticia técnica para instalarse, puede dejarse a la vegetación crecer de manera natural, bajos costos de mantenimiento, integración con el paisaje, aspecto natural (Sutic, 2003; EPA, 2008).

Las desventajas con relación a esta opción serían:

-Baja diversidad en la escogencia de plantas, no acepta usos recreativos, poca oportunidad para aprovechamiento como huerta, poco atractivo durante invierno (Sutic, 2003; EPA, 2008; Figura 54).

En Venezuela no existen experiencias documentadas de techos verdes, intensivos o extensivos desarrollados sobre edificios públicos, comerciales o residenciales, aunque si es posible encontrar algunos estudios con propuestas para la incorporación de estas soluciones verdes, sobre edificaciones de planta extensa en el área urbana de

Maracaibo⁴⁵. Otras iniciativas interesantes involucran el reciclado de botellas plásticas de refrescos, para utilizarlas como pequeños materos con plantas suculentas, sobre los canales de los techados con tejas de ladrillo rojo, que tienen una respuesta térmica desfavorable (Sosa *et al.*, 2004), es una adaptación sencilla, aunque todavía en fase experimental⁴⁶.

Figura 54. Techos verdes extensivos (izq) con suculentas y (der) con gramíneas



Fuente: Minke, 2004; EPA, 2008.

En contraposición, los techos verdes *intensivos* incluyen mayores elementos paisajísticos, las principales características de esta opción serían:

⁴⁵ Techo verde en edificaciones de planta extensa, para climas Caliente a cálido húmedo.

http://red.fau.ucv.ve:8080/static/seminario/files/seminario%20i%20articulo_villalobos.pdf

⁴⁶ <http://tejasecologicas.blogspot.com/>

4.2.1.2-Techos verdes intensivos.

Son desarrollados fundamentalmente en edificaciones comerciales y edificios públicos y son multipropósito, es decir, cumplen funciones ambientales, económicas, recreacionales y estéticas, pero requieren mayor cuidado y mantenimiento permanente. Combinan elementos paisajísticos como caminerías, fuentes, estanques, con senderos, bancos, pérgolas y canteros con diversos tipos de vegetación (Figura 55).

Las principales ventajas para el desarrollo de techos verdes *intensivos* serían:

-Se pueden incorporar gran diversidad de plantas y tipos de suelos, buenas propiedades aislantes, se pueden simular paisajes naturales, resultan atractivos y accesibles para actividades recreativas de tipo pasivo, puede diversificarse el tipo de usos del espacio, por ejemplo: agricultura o huertas urbanas, paisajismo, recreación, etc., (Figura 55).

Figura 55.Techos Verdes intensivos.



Fuente: EPA 2008, Minke, 2004.

Las principales desventajas están relacionadas con una mayor carga o peso sobre el techo, necesidad de irrigación y sistemas de drenaje, necesidad de cercado, mayor demanda de energía para irrigación, mayor costo en materiales y mantenimiento (Sutic, 2003; EPA, 2008).

Otras estrategias *verdes* de mitigación, son las fachadas y las cortinas de vegetación natural. Estos sistemas mitigan la carga térmica de las fachadas expuestas a la luz solar, y resultan altamente beneficiosas para aliviar el calor durante las horas diurnas, y mejorar el rendimiento de los sistemas de climatización (Sosa *et al.*, 2004; Figura N° 56).

Figura 56. Ejemplos de fachadas verdes tradicionales y modernas.



Fuente: <http://www.aracilarquitectura.com/blog/>

4.2.1.3-Barreras a la implementación de techos verdes.

Las principales dificultades o barreras que impedirían la incorporación de estas estrategias de techos vivos o techos verdes como medidas de mitigación en el caso de la ciudad de Caracas, radican en:

- Bajos costos de la energía, lo que incentiva el uso de soluciones individuales de climatización.
- Escaso nivel de conciencia colectiva sobre los problemas ambientales urbanos, apatía, falta de colaboración.
- Legislación ambiental coercitiva que no incentiva, ni recompensa las soluciones alternas, las iniciativas individuales o comunitarias, más allá de las exigencias de la legislación vigente.
- Falta de información y promoción de estas técnicas, la percepción es que estas técnicas no aplican a edificaciones residenciales porque no generarían beneficios sino costos adicionales.
- Los costos iniciales de implantación y mantenimiento se perciben como una carga adicional en la factura del condominio

(Entrevista a los miembros de la junta de Condominio de los edificios del Conjunto Residencial La Villa en Montalbán II, Caracas, realizada en Agosto, 2011).

4.2.1.4--Techos reflectivos (cool roof), otras alternativas de mitigación.

Los Techos frescos como estrategia de mitigación se refieren a la utilización de materiales altamente reflectantes y emisivos. Los materiales tradicionales de techado (cubiertas asfálticas, tejas), tienen una baja reflectancia solar de 5 a 15 %, lo que significa que absorben 85 a 95% por ciento de la energía que llega hasta estas superficies, en lugar de reflejar la energía de vuelta a la atmósfera (EPA, 2008; Sosa *et al*, 2004; Amigo-Vásquez, 2006). Muchos de los productos para refrescamiento de techos son de color blanco brillante, ya que de esta forma se alcanza el máximo de reflectancia solar, en el espectro visible (EPA 2008).

Las estrategias para el tratamiento de superficies varían según la extensión e inclinación. En azoteas planas convencionales, se sugiere el uso de productos tipo revestimiento o manto reflectivo, complementando la impermeabilización convencional en techos. En grandes superficies como galpones industriales, donde la mayor ganancia térmica, está precisamente en el área del techo, se recomienda el uso de materiales mixtos con propiedades térmicas y aislantes (EPA, 2008).

Uno de los hallazgos en los análisis de temperatura superficial realizados en la ciudad de Caracas, y que se relacionan con este tema de los techos fríos o *cool roof*, fue la identificación de anomalías en la temperatura superficial (temperaturas más bajas que el entorno) en superficies asociadas a galpones industriales, probablemente debido al

uso de material laminado con propiedades térmicas aislantes, como los paneles termo-acústicos desarrollados por la empresa CINDU de Venezuela ⁴⁷(Anexo 6).

Estos materiales pueden ser utilizados también, para complementar las estrategias de enfriamiento en superficies techadas de azoteas en casas y edificios (Anexo 6).

Además de las estrategias verdes de mitigación anteriormente descritas, también se utilizan técnicas pasivas de mitigación de la carga térmica, que mejoran el confort y el desempeño energético de las edificaciones (Sosa *et al.*, 2004). Cuando estas técnicas bioclimáticas están incluidas en el diseño, el resultado es una buena integración de la edificación con las variables ambientales de su entorno, entendidas estas como el clima, la insolación-radiación solar, la circulación aire, y el paisaje (Sosa *et al.*, 2004; Higuera, 2006; Figura 57).

El problema se presenta cuando estos criterios básicos de la arquitectura y el urbanismo bioclimático, no son incorporados en el diseño, lo que es frecuente en algunas viviendas masificadas de clase media, en el suroeste de la ciudad y en las viviendas autoconstruidas en las zonas de barrios (Rocco, 2005).

El resultado es una edificación, un urbanismo que no interactúa con su entorno, lo que origina problemas de desconfort térmico, e incrementa las necesidades de climatización artificial (Higuera, 2006; Sosa *et al.*, 2004). Esta tendencia acentúa las soluciones individuales de climatización, que tienden a agravar el problema de la isla

⁴⁷ <http://www.cindu.com.ve/laminascomparativo.htm>

de calor urbano, al incrementarse el calor antropogénico emitido en la ciudad (EPA, 2008; Higuera, 2006).

Algunas, medidas de mitigación (remediación) sencillas implementar y que ayudan a reducir la carga térmica en las edificaciones y en las viviendas (Figura 58) son:

- Uso de vegetación arbórea para sombreado de fachadas, que no interfieran con la ventilación.
- Uso de colores claros en las fachadas que reciben mayor cantidad de horas de luz diarias para aumentar la reflectividad.
- Uso de cortinas vegetales (enredaderas, plantas colgantes, jardineras con palmas y/o otras plantas que proveen sombra y no obstruyen la ventilación) en las ventanas más expuestas a la luz solar, para refrescar la vivienda y mitigar el calor interno.
- En las edificaciones que no tienen aleros (laterales o superiores) de protección solar, el uso de toldos (ambiente externo), y persianas (ambiente interno) fijos o retractiles, que disminuyan la insolación de las fachadas en las horas de mayor intensidad de la radiación solar, puede ser de gran alivio en las horas del día y meses del año, de mayor calor en la ciudad.

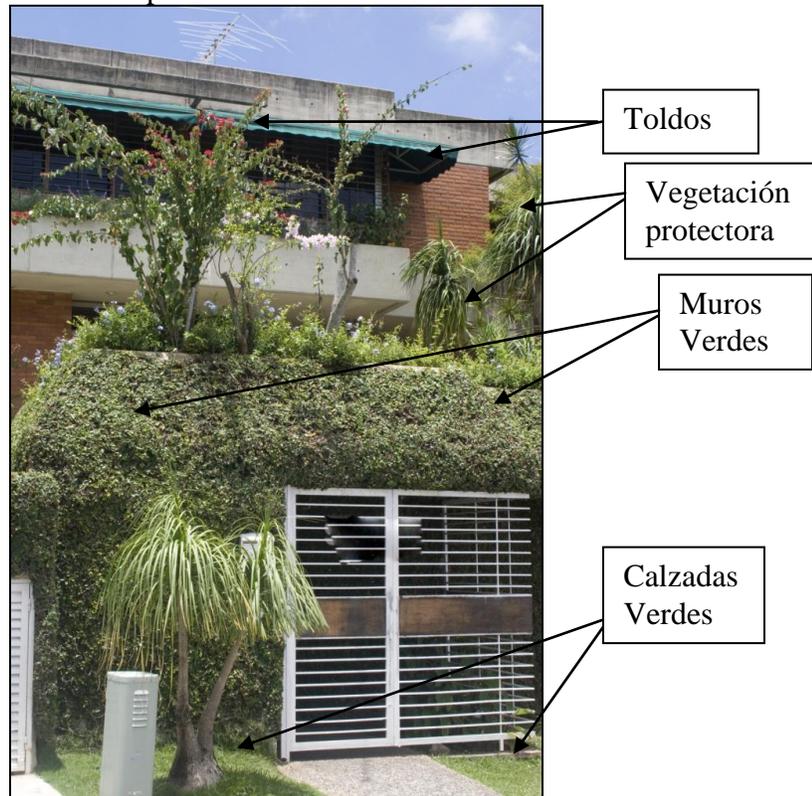
- En espacios abiertos, como azoteas privadas en casas y edificios (PH), el uso de pérgolas y otros elementos constructivos, como trojas, gazebos cubiertos de parras o enredaderas, son una excelente opción de refrescamiento de la vivienda (1 a 4: Sosa et al., 2004).

Figura 57. Caracas. Residencias. Alto-lar. Técnicas de mitigación pasiva incorporadas al diseño de la edificación.



Fuente. <http://cav.org.ve/>

Figura 58. Caracas. Sector Lomas de la Trinidad. Técnicas de mitigación, verdes y pasivas combinadas.



Fuente: <http://www.tuinmueble.com.ve/>

4.2.2.-Estrategias de mitigación, frente a los eventos de variabilidad climática y cambio climático global.

En la primera década del nuevo milenio, hemos sido testigos de la creciente intensidad de los eventos climáticos extremos. Los contrastes son abrumadores, lluvias extremas, inundaciones, deslaves, acompañados de sequías intensas e incendios voraces y abrasadores, en otras regiones del globo (OMM, 2010; 2011).

En 2003 y 2010, intensas olas de calor y sequías afectaron diversas regiones del planeta, impactando ciudades y sus habitantes y dejando una grave secuela en términos de pérdidas de vidas humanas (OMM, 2004; 2011; Dhainaut *et al.*, 2004). En Suramérica, sequías importantes y mermas en las precipitaciones, fueron también registradas durante el primer trimestre del 2010. En Venezuela, se reportó el periodo enero-marzo más seco en más de cien años (OMM, 2011).

Caracas fue una de las ciudades donde este fenómeno tuvo particular intensidad. La sequedad del aire combinado con abundante material particulado en suspensión y los humos de incendios forestales en las zonas peri-urbanas, resultaron en una densa bruma o calima, que aumento la incidencia de cuadros alérgicos y respiratorios en la ciudad (Córdova, 2011b).

Científicos del Panel inter-gubernamental para el cambio climático-IPCC, en su último reporte (*AR4*), han alertado sobre los crecientes impactos en las áreas urbanas del cambio climático (IPCC, 2007). Según este documento los principales impactos en las áreas urbanas serán (Tabla N° 9):

Tabla 9. Proyecciones de los principales efectos esperados relacionados con el cambio climático y eventos extremos en las áreas urbanas.

<i>Fenómenos climáticos</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Principales efectos pronosticados.</i>
Días y noches menos fríos	Casi seguro	Disminución de la demanda de energía para calefacción.
Días y noches calurosos. Más frecuentes en la mayor parte de la superficie terrestre	Casi seguro	Aumento de la demanda de refrigeración
Temperaturas más cálidas	Casi seguro	Cambios en el permafrost, nevadas más intensas, bloqueos de vialidad y daños a las construcciones e infraestructuras.
Periodos cálidos/olas de calor. Más frecuentes en la mayor parte de la superficie terrestre	Muy probable	Reducción de la calidad de vida de la gente en áreas cálidas sin aire acondicionado. Impacto en la gente de avanzada edad, jóvenes y pobres. Pérdida de vidas humanas. Aumento del consumo de energía para el aire acondicionado.
Fuertes precipitaciones. Más frecuentes en la mayor parte de la superficie terrestre	Muy probable	Problemas de asentamientos, comercio, transporte, y sociedades por inundación. Importante pérdida de vidas humanas, daños y pérdidas a la propiedad y a las Infraestructuras. Aumento del uso del agua de lluvia en producción de energía hidroeléctrica.
Aumento de las zonas afectadas por la sequía	Probable	Escasez de agua para viviendas, industrias y servicios. Disminución de los potenciales para la producción de energía hidroeléctrica.
Aumento de la actividad de ciclones tropicales intensos	Probable	Problemas de asentamiento por inundaciones y fuertes vientos. Problemas con el suministro del agua. Retirada de las coberturas de riesgos en áreas vulnerables por las aseguradoras privadas (al menos en países desarrollados). Importantes pérdidas humanas, daños y pérdidas a la propiedad. Migración de la población.
Aumento de la incidencia del crecimiento extremo del nivel del mar	Probable	Aumento de los costes de la protección costera y de los costes de la reubicación del aprovechamiento del suelo. Menor disponibilidad de agua dulce por intrusión salina. Importantes pérdidas humanas, daños y pérdidas a la propiedad. Movimientos de población (Éxodo).

Fuente: IPCC-AR 4, Informe de síntesis2007, ONU-Hábitat, Informe Mundial sobre asentamientos Humanos, 2011.

Como se puede apreciar en los eventos e impactos relacionados en la Tabla N° 9, la mayor parte de los escenarios se refieren a situaciones esperadas y esperables en un mundo más cálido, con fuertes impactos sobre las áreas urbanas y sus pobladores. Dado que las tendencias de localización de la población tanto a nivel mundial como para América Latina, apuntan hacia una creciente concentración en las áreas urbanas⁴⁸, es de esperar entonces, que los niveles de riesgos derivados de los impactos del cambio climático sobre las ciudades, se incrementen también (UN-Hábitat, 2011; United Nations, 2009) .

Lo preocupante de los impactos sobre la salud y ambiente, descritos en el reporte síntesis del IPCC y en el reporte de asentamientos humanos de la ONU-Hábitat, es que no difieren mucho de los hallazgos de esta investigación, lo que enfatiza la urgencia de desarrollar medidas de adaptación (para reducir la vulnerabilidad) y de mitigación (para reducir emisiones-GEI).

El énfasis en el documento del IPCC se coloca también sobre la necesidad de gestionar de forma conjunta, la adaptación y el desarrollo de las estrategias de mitigación. La gestión de la adaptación enfatiza la importancia de la educación, la información y la prevención de forma integral, priorizando los aspectos relacionados con la ciencia, la tecnología, la educación y la divulgación relacionada con el cambio

⁴⁸ Los mayores niveles actuales de urbanización se están alcanzando en los países menos desarrollados, seguidos por el resto de países en desarrollo, lo que representa tres cuartas partes de la población urbana mundial. UN-Hábitat, 2011.

climático, donde las escuelas y universidades, juegan un rol fundamental (IPCC, 2007).

La gestión de la mitigación en las ciudades, enfatiza la planificación ambiental y urbana dentro de un marco de sostenibilidad (ciudades sostenibles, urbanismo bioclimático), priorizando las estrategias que incentiven el uso eficiente de la energía, del transporte, del espacio y los recursos naturales en las ciudades y sus áreas de influencia, así como, de las organizaciones sociales comunitarias (Higueras, 2006; Sosa *et al.*, 2004; UN-Hábitat, 2011).

Otras estrategias proponen, desde el ámbito urbano, un tipo de desarrollo urbano concentrado en oposición a la ciudad difusa y dispersa, consumidora de espacio y energía (Rueda, 2002). Estas discusiones recientemente saltaron al centro de la polémica nacional, cuando el jefe de estado venezolano declaró que dentro de la ciudad de Caracas, era posible edificar otra ciudad, y se basan en la densificación urbana como respuesta del estado y sus órganos de ejecución, a las crecientes necesidades de vivienda en la ciudad, inspirada en los modelos de la ciudad concentrada de Naredo y Rueda y Rueda (1996; 2002).

Sin embargo, hacia el final de su disertación cuando discute sobre la calidad urbana y la calidad de vida Rueda señala (Rueda, 2002):

...La ciudad compacta...ha de permitir que su interior cumpla con los requisitos adecuados para su habitabilidad y la mejora de la calidad de vida urbana. Los espacios verdes, los equipamientos, los servicios y los transportes públicos han de

ser accesibles, han de estar a una distancia tiempo mínima para vencer la distancia psicológica que todos tenemos y que, de lo contrario, no facilita su uso”...

Ello implica urbanizar, re-zonificar, pero respetando las áreas de esparcimiento y de encuentro de la población, los espacios verdes que mejoran la habitabilidad y la calidad de vida, y que contribuyen además, a mitigar los efectos de la isla térmica superficial (Rueda, 2002; EPA 2008).

Las estrategias de prevención y mitigación de la isla de calor urbano o isla térmica urbana, entran también dentro del marco de las estrategias de reducción de la huella de carbono de las ciudades y dentro de las estrategias de reducción del riesgo a desastres en las ciudades. Ya que al mejorar el desempeño térmico de las edificaciones, se reduce la demanda energética por climatización, disminuyendo en consecuencia, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causantes del cambio climático global (IPCC, 2007; EPA, 2008).

A nivel internacional los esfuerzos de ONU-Hábitat y del Banco Mundial-Eco2Cities, ICLEI *-(Local Governements for Sustainability)*, PNUD-GEO cities, priorizan los temas relacionados con las Ciudades y el Cambio climático, así como los esfuerzos regionales, como la Campaña EIRD (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de Naciones) de Ciudades Resilientes, y las Estrategias 2005-2010 definidas en el evento Internacional Hábitat y Riesgos 2005 COMIR-Caracas, COMIR-2011-2012, entre otros; que hacen esfuerzos por generar foros de discusión y de encuentro para administradores urbanos, políticos, investigadores, estudiantes y

ONGs, donde se discutan estos temas e interactúen los diversos actores involucrados, en formulación de política, ejecución, investigación e innovación, además de potenciar las capacidades endógenas locales.

A nivel local, la alcaldía metropolitana, a quien compete la gestión ambiental de la ciudad, está trabajando sobre el plan Caracas 2020, que contempla el rescate del Aeropuerto de la Carlota (una de las áreas con peor comportamiento térmico en la ciudad-Anexo 5: Mapas-imagen LST 2001-2011) como parque verde, integrándolo al Parque del Este para crear un gran espacio recreativo y vegetal para la ciudad, además de la promoción de alternativas sostenibles de transporte como las ciclo-vías y modelos de transporte colectivos que garanticen la movilidad y la seguridad en la ciudad (Alcaldía Metropolitana, 2010).

Otras medidas de adaptación-mitigación suponen el monitoreo permanente de los eventos de variabilidad climática, para prevenir el impacto de climas extremos, como sequías intensas y olas de calor, que se intensifican en las ciudades por el efecto de las isla térmica superficial y atmosférica (Córdova, 2011a; b). El desarrollo de observatorios climáticos y actividades de monitoreo permanentes en instituciones públicas y de investigación, son parte de las medidas necesarias para garantizar, una capacidad de prevención y de respuesta oportuna, para lo cual se requiere priorizar estos temas en los programas de financiamiento y en las agendas de investigación.

En relación al estudio de la isla térmica superficial, la dependencia de la generación de data colectada por sensores con banda térmica, provenientes de agencias

ambientales y espaciales internacionales es una limitación que por ahora no tiene alternativa más viable y económica, que el repositorio global de imágenes de la USGS⁴⁹. Hasta el momento el acceso y la descarga de información satelital para distintos sensores, ha sido gratuita, sin embargo, existe la posibilidad de que se cobre una tarifa por descarga de datos del repositorio en el futuro, lo que dependiendo de los costos, podría impactar severamente el avance y la continuidad de las investigaciones con banda térmica en el país, y en consecuencia, de los estudios de la isla térmica superficial. Por lo pronto la estrategia ha sido crear un pequeño banco local de imágenes seleccionadas, a escala nacional sobre áreas urbanas, y la revisión y descarga y procesamiento constante de la data actualizada.

Conclusiones.

1.-A manera de conclusión podemos afirmar, que las islas térmicas urbanas son un fenómeno climático local, derivado de la interacción entre las capas bajas de la atmósfera con la superficie construida de la ciudad.

2.-Este espacio construido, altera el balance radiativo superficial, al aumentar las superficies secas e impermeables a medida que se desarrolla y se densifica el espacio urbano, propiciando un aumento en las temperaturas superficiales y ambientales en la ciudad, que es precisamente lo que se estudia, al analizar la formación del componente superficial de las islas térmicas o islas de calor urbano.

⁴⁹ <http://glovis.usgs.gov/>

3.-En el caso de la isla térmica superficial urbana en la ciudad de Caracas se pudo constatar que ésta se desarrolla con mayor intensidad durante los meses de sequía en el trópico, debido a la mayor incidencia de la radiación solar que aumenta el calentamiento superficial. También fue posible constatar su formación en los días de cielos despejados del periodo lluvioso, aunque esta se presenta espacialmente menos extendida y restringida al área urbana más densamente construida.

4.-La formación y dinámica (intensidad y extensión) de la isla térmica superficial depende, no solo de las condiciones estacionales (sequía-lluvia), sino también de los fenómenos de circulación local que modifican las temperaturas superficiales y el clima urbano en la ciudad. La distribución espacial de estos patrones térmicos superficiales confirma además, la relación entre los patrones históricos de ocupación urbana y las áreas más críticas, identificadas en los sectores del oeste y suroeste de la ciudad.

5.- Otra conclusión importante se refiere a la utilidad de las técnicas combinadas de sensores remotos integrados en un sistema de información geográfica-SIG y datos analógicos de estaciones climáticas, para analizar y caracterizar fenómenos como las islas térmicas urbanas. Ello permite la visualización de la totalidad del mosaico urbano con sus diversos elementos (características y sectores urbanos), interactuando para determinar la dinámica de la isla térmica superficial en la ciudad.

6.-La mayoría de los estudios publicados sobre islas térmicas superficiales urbanas, se preocupan más por identificar el gradiente térmico entre las zonas urbanas y las áreas

peri-urbanas, pero no por aumentar el nivel de detalle y de información recuperable derivada de la información satelital procesada; para observar, por ejemplo, el comportamiento de estructuras y superficies urbanas. En este caso, el desarrollo del *SIG* del proyecto, permitió trabajar con ventanas de aproximación con un mayor nivel de detalle, posibilitando recuperar y analizar mayor cantidad de información a escala urbana, lo que constituye uno de los aportes fundamentales de este trabajo.

7.-Es significativo además destacar, la utilidad del método de estimación *monocanal* para derivar las temperaturas superficiales, desde que se cumplan los requisitos previos de calibración radiométrica, atmosférica y geométrica, para garantizar la calidad de los datos, lo cual aporta un volumen importante de información, en ausencia de otros datos y técnicas para caracterizar el fenómeno.

8.-La estrecha asociación entre la intensidad de la isla térmica urbana en la ciudad de Caracas y la densidad del espacio construido, así como con la mayor o menor presencia de vegetación, es otra conclusión importante.

9.-Los sectores o cuadrantes urbanos que presentan una mejor condición ambiental y en consecuencia, una mejor respuesta térmica, son aquellos localizados al noreste y sureste de la ciudad (cuadrantes II y III), menos densamente construidos y con una importante presencia de vegetación intra y peri-urbana. Sin embargo, los efectos de la circulación local *valle-montaña* favorecen a los sectores noreste y noroeste (cuadrantes I y II) de la ciudad, observándose temperaturas más frescas en estas localidades de la zona norte, con excepción de algunos corredores viales con carpeta

asfáltica de doble ancho, como las grandes avenidas y distribuidores viales de las autopistas.

10.-Los sectores localizados hacia suroeste de la ciudad (cuadrante IV), más densamente habitados y construidos y con menor cantidad de vegetación intra-urbana, presentaron las mayores temperaturas superficiales en la ciudad (28-34°C). Adicionalmente en estos sectores habita alrededor del 60% de la población residente en la ciudad, lo que enfatiza la importancia de monitorear de manera permanente las condiciones socio-ambientales y desarrollar programas para mejorar la calidad ambiental de estas zonas.

11.-También se confirma la presencia de un gradiente térmico, que caracteriza la formación de la isla térmica superficial, entre las áreas peri-urbanas de baja densidad constructiva y con abundantes espacios naturales que mostraron temperaturas más frescas (24-27°C) y los espacios más densamente construidos localizados en el valle (28-31 °C). En algunos sectores localizados en las áreas montañosas que circundan la ciudad, con abundante cobertura natural, se observaron también temperaturas más bajas (21-23°C).

12.-Otra conclusión importante se refiere a la baja capacidad de mitigación de las temperaturas superficiales que tienen algunas formaciones vegetales como las gramíneas (naturales o plantadas sin riego), ya que durante la sequía este tipo de vegetación se deshidrata, dejando expuesta mayor superficie de suelo, lo que aumenta la temperatura superficial resultante (24-31°C). Estas formaciones presentaron

también, la mayor incidencia de incendios de vegetación, no solo por su proximidad a las áreas urbanas y bordes peri-urbanos, sino por el alto nivel de deshidratación que presentan durante la sequía, tanto en las zonas peri-urbanas del sureste y suroeste de la ciudad, como en la ladera sur del parque nacional El Ávila -Güaraira Repano.

13.-El bosque semidecíduo en cambio, presente en las filas y colinas peri-urbanas del sureste, suroeste y algunas áreas intra-urbanas del sureste (a pesar de perder follaje durante la estación seca), cumple un importante rol de mitigación de las temperaturas superficiales. El intrincado ramaje de estas formaciones vegetales, protege al suelo de la radiación solar incidente y en consecuencia, las temperaturas observadas en estas formaciones vegetales son inferiores (24-27°C), a las temperaturas en las superficies recubiertas de gramíneas o en los suelos desforestados o expuestos por el desarrollo urbano (28-31°C). Adicionalmente estas temperaturas superficiales mejoran rápidamente (21-23°C), al reverdecer el bosque en la estación lluviosa.

Estos bosques también se ven afectados por los incendios de vegetación durante la estación seca, por causa de las desforestaciones y quemas propiciadas para extender la ocupación informal en las zonas peri-urbanas.

14.-Los bosques húmedos presentes en las partes más altas de la ladera sur del parque nacional El Ávila y en los sectores más altos de las filas que rodean la ciudad, y que mantienen la humedad debido a la interferencia orográfica de las masas de aire, juegan un rol fundamental en el refrescamiento del aire y en la mitigación de las temperaturas superficiales por los efectos de circulación local durante los meses de

sequía. Aunque durante la estación seca los rangos de temperatura superficial en estas comunidades vegetales aumentan entre 17-20 °C, disminuyen entre 12-16°C, en la época de lluvias.

15.-La variabilidad y el cambio climático resultaron también ser determinantes en algunos de los cambios observados en los patrones térmicos de la ciudad. En general, al observar la secuencia de mapas térmicos que cubren una década de análisis de la temperatura superficial de la ciudad, podemos afirmar, que se presenta un aumento progresivo sobre todo en los valores de la temperatura superficial observados específicamente para el mes de marzo durante la época de sequía.

16.-En algunos casos, estos cambios pudieron efectivamente relacionarse con las fases de la variabilidad climática ENSO (Eventos Niño-Niña). Sin embargo, la intensidad del evento de Marzo del 2010 podría más bien vincularse, tal como lo afirma la Organización Mundial de Meteorología-OMM, al cambio climático global que intensifica los periodos de estiaje y aumenta la frecuencia de eventos extremos como las olas de calor.

No obstante, los dos años últimos 2011 y 2012 en curso, han estado marcados por intensas fases frías (Niña) de los eventos ENSO, que debilitan la temporada de sequía y producen abundantes precipitaciones, disminuyendo en consecuencia, las probabilidades de formación del fenómeno de isla térmica superficial en la ciudad, debido al aumento de la nubosidad que interfiere la radiación solar incidente y de las precipitaciones que refrescan las superficies urbanas.

17.-Otra conclusión importante a destacar, se refiere a la mayor posibilidad de recuperación de información a escala urbana gracias al desarrollo del *SIG*, que permite analizar el comportamiento térmico de edificaciones y estructuras del espacio urbano en las ventanas de análisis por sectores, posibilitando también la observación de algunas anomalías térmicas interesantes.

18.-En general, los resultados obtenidos confirman que los techos con tejas rojas, mostraron una respuesta térmica poco favorable. En los sectores de sureste de la ciudad en zonas de baja densidad y a pesar de la abundante presencia de vegetación intra y peri-urbana, los patrones térmicos observados sobre los ejes viales y urbanos de estas urbanizaciones, son similares a algunos sectores del suroeste de la ciudad, lo que sugiere la necesidad de estudiar el comportamiento térmico de estas unidades, para observar el impacto de la carga térmica del techo sobre la vivienda.

19.-El comportamiento térmico poco favorable de las grandes estructuras asociadas a complejos industriales y centros comerciales en la ciudad, es también otra conclusión importante a destacar. En estos casos, la mayor extensión de las superficies recubiertas de concreto y carpetas asfálticas de estacionamientos, es la combinación responsable de estas respuestas. En las zonas de barrios, también se observó una respuesta térmica desfavorable, debido al uso de materiales metálicos en los techos de las viviendas.

20.-En los sectores industriales de la ciudad tanto en el este como en el oeste, fue posible también observar anomalías térmicas (temperaturas superficiales

significativamente más bajas que el entorno, 16 -20°C) asociadas a galpones industriales, hipermercados y/o almacenadoras. Estas posiblemente se deban al uso de láminas con propiedades térmicas aislantes en techos, aunque no fue posible verificar individualmente estas respuestas.

21.-Es necesario destacar la importancia de la progresividad de las acciones desde lo preventivo, con estrategias menos complejas y costosas, como la conservación y reforestación vegetal a través de programas fitosanitarios, censos de arboles y de repoblación vegetal, que involucren necesariamente a las comunidades en este esfuerzo, para avanzar luego hacia las acciones de remediación o mitigación, como los techos verdes intensivos o extensivos, que suponen más costos, mayor esfuerzo técnico y un marco legal que le de soporte estas acciones.

22.-En este sentido, en el análisis del marco legal vigente que protege las áreas verdes intra y peri-urbanas se detectaron además, fuertes debilidades frente a las crecientes presiones por la demanda de tierras para desarrollos urbanos, que deberían ser objeto de análisis por los consejos comunales de los sectores más afectados, así como por otras organizaciones comunitarias y ambientales no gubernamentales, para presionar su revisión, y modificación, favoreciendo la conservación de las áreas verdes intra y peri-urbanas.

23.-La conservación de estas áreas cumple no solo una importante función social y ambiental en la mitigación de la isla térmica superficial, sino también en la de otros fenómenos socio-naturales asociados, ya que el aumento en la incidencia de

incendios forestales, propicia además de un incremento en las afecciones alérgicas y enfermedades cardio-respiratorias, el desplazamiento de vectores transmisores de enfermedades como los chipos, desde su hábitat natural hacia las zonas peri-urbanas y urbanas, constituyendo un riesgo adicional de salud para la población.

24.-Otra conclusión importante, deriva de la necesidad de impulsar el desarrollo de estas medidas intensivas o extensivas de mitigación, como los techos verdes o techos vivos y los techos reflectivos, a través de ordenanzas municipales, sobre todo para grandes edificaciones industriales, comerciales o de servicios. Los techos verdes intensivos o extensivos deberían constituirse en una norma, en grandes edificaciones comerciales, públicas o privadas, que se beneficiarían además, por la posibilidad de recuperar aguas de lluvias mediante estas técnicas que pueden utilizarse en sistemas de climatización internos, sanitarios y de limpieza.

25.-Los techos frescos (azoteas y techos con coberturas de alta reflectancia) en cambio, son una estrategia efectiva y rápida de implementar, que debería ser una práctica integrada al mantenimiento de la impermeabilización en edificaciones residenciales, sobre todo en los sectores de más alta densidad urbana, combinadas con programas de reforestación y conservación, vegetal urbana.

26.-Otras estrategias de acción preventiva y de mitigación están relacionadas, con la posibilidad que tienen las universidades de ofrecer actividades de asesoría, bien sea como parte del servicio comunitario o como oferta de servicio más económica, para

remodelar y adecuar bioclimáticamente las viviendas en los sectores populares y de clase media, trabajando a través de consejos comunales, condominios o particulares.

27.-Finalmente, en términos de la herramienta metodológica desarrollada para analizar el fenómeno de las islas térmicas podemos afirmar, que la detección y monitoreo de estos patrones y anomalías térmicas con sensores remotos, es una herramienta valiosa que le da al planificador urbano, al urbanista, una perspectiva integral para observar como interactúa el espacio construido, con su entorno ambiental y físico. Los patrones térmicos obtenidos son la expresión de esta interacción.

Recomendaciones.

Aunque el análisis térmico integrado en un sistema de información geográfico, permite identificar los sectores críticos de la ciudad, sería recomendable complementar estos estudios con modelos de circulación tridimensionales 3D (anisotropía urbana, efecto cañones urbanos, etc.), o mediante el levantamiento de transectas urbanas.

De la misma manera sería necesaria la verificación de las anomalías encontradas, sobre todo en edificaciones tipo galpones industriales y depósitos comerciales, para determinar las relaciones entre la respuesta térmica observada (temperaturas

superficiales considerablemente más bajas que el entorno) con los materiales o el diseño de la edificación, que genera estas respuestas térmicas.

Algunas prácticas tradicionales en las casas de familias y apartamentos, como utilizar las azoteas y balcones como huerto familiar y espacio de descanso, mediante el uso de palmas de jardín, trojas para enredaderas o plantas arbustivas como las trinitarias, que ofrecen frescor y relajamiento a cambio de mantenimiento e hidratación, son costumbres que deberían rescatarse, antes que priorizar la política de masificación en el consumo de electrodomésticos y aires acondicionados.

Otra recomendación importante se refiere a la necesidad de analizar el marco legal y regulatorio en materia de urbanismo y construcción para incentivar la implementación de soluciones verdes, así como también, la factibilidad estructural de su implantación, para ello es necesario investigar la capacidad portante de los techos y de las estructuras en edificaciones de planta extensa de vieja data, como algunos de los centros comerciales más tradicionales en la ciudad.

En Venezuela se abre una puerta interesante para las aplicaciones de los sensores remotos con banda térmica, que debe ser explorada y profundizada. El análisis de ciudades con otras características ambientales, como ciudades costeras, ciudades de clima árido, ciudades de alta montaña, pueden ser líneas de investigación que den continuidad a la temática. Las aplicaciones de la banda térmica en los estudios de vegetación, son también una línea de investigación interesante, ya que la temperatura superficial es un importante indicador del nivel de intervención o degradación de la

cobertura vegetal. Gracias a esta aplicación fue posible además determinar, la poca contribución de las gramíneas en la mitigación de las temperaturas superficiales, lo que sugiere la necesidad de considerar estos aspectos, en los diseños paisajísticos que se proyecten sobre espacios verdes abiertos.

Ello requiere sin embargo complementar estos análisis con registros hidroclimáticos para observar las correspondencia entre las tendencias climáticas y los valores de temperaturas superficiales observados, para ello es fundamental el mantenimiento y operatividad de la red hidroclimática nacional, ya que ambos recursos constituyen valiosos insumos para entender los procesos de variabilidad y cambio climático, en el contexto del cambio global.

Otra actividad importante es la divulgación de las aplicaciones y resultados de estas técnicas de investigación, mediante talleres, foros, cursos, que amplíen y diversifiquen el impacto de los esfuerzos de investigación, que se realizan desde las universidades. En este sentido la Comisión para la Mitigación del Riesgo-COMIR de la Universidad Central de Venezuela-UCV, ha resultado un importante foro de divulgación a escala local y nacional, pero también con alcance regional e internacional. Así como también, el trabajo con Alcaldías, Concejos Comunales y observatorios nacionales, sin descartar el alcance de otras herramientas comunicacionales e informativas en portales WEB, blogs, y otras estrategias que ofrecen además posibilidades de intercambio interactivas, con las comunidades.

Referencias Bibliográficas.

1. -Aguilar, E.; Peterson, T. C; Ramírez Obando, P; Frutos, R; Retana, J. A; Solera, M; Soley, .J; González García, I; Araujo, .R. M; Rosa Santos A;. Valle V. E; Brunet M; Aguilar L; Álvarez, L, Bautista M; Castañón, C; Herrera L; Ruano, E; Sinay. J. J; Sánchez, E;. Hernández Oviedo G. I; Obed, F; Salgado, J. E; Vázquez, J. L; Baca, M; Gutiérrez, M; Centella, C; Espinosa, J;. Martínez, D; Olmedo, B; Ojeda Espinoza C. E; Núñez, R; Haylock, M; Benavides, H; and Mayorga, R. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003, *J. Geophys. Res.*, 110, D23107, doi: 10.1029/2005JD006119.
2. -Akbari, Hashem; Menon, Surabi; & Rosenfeld, Arthur. (2008). Global Cooling: Effect of Urban Albedo on Global Temperature. Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL-63490. [Online]. Disponible en: <http://escholarship.org/uc/item/0pz748p6> , [Consultado en: Febrero, 2011]
3. -Akbari, H., S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, S. Winnett, eds. (1992). Cooling Our Communities: A guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing. LBL-31587, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.

4. -Akbari, H. (2005). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation. LBNL-58285. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
5. -Alcaldía Metropolitana (2010) Avance del Plan Estratégico Caracas Metropolitana 2020, Instituto Metropolitano de Urbanismo, Mesa de Análisis, Caracas, Septiembre, 2010. [Online]. Disponible en: <http://imutc.org/portal/> [Consultado en: Febrero, 2011]
6. -Amigo-Vásquez, Jaime R. (2006) Ahorro energético en viviendas de países con climas tropicales. *Universidad, Ciencia y Tecnología- UCT*, sep., vol.10, no.40, p.245-253. ISSN 1316-4821.
7. -Andressen, R (2007). Circulación atmosféricas y tipos de climas en: *GEO-Venezuela*, tomo2, capítulo 13, 238-329 pp, Fundación Empresas Polar, Caracas, Venezuela.
8. -Arndt, D. S., M. O. Baringer, and M. R. Johnson, Eds. (2010): State of the Climate in 2009. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (7), S1–S224.
9. -Ataroff, M. (2001). *Venezuela*. En: Kappelle, M., Brown, A. (Eds). Bosques Nublados del Neotrópico. Editorial IMBIO, Costa Rica, pp. 397-442.
10. - Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D., Helder, D.L., Hook, S.J., Markham, B.L., Chander, G. and O'Donnell, E.M., (2003). Landsat TM and ETM+ thermal band calibration, *Canada. Journal Remote Sensing*, 29 (2), 141–153,

[Online] Disponible en: <http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/rp/rppdf/m02-087.pdf> ,

[Consultado en: Febrero, 2011].

11. -Bell, Michelle L, O'Neill, Marie S, Ranjit, Nalini, Borja-Aburto, Victor H, Cifuentes, Luis A, and Gouveia Nelson C. (2008) Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico *Int. J. Epidemiol.* (2008) 37(4): 796-804 first published online May 29, 2008 doi:10.1093/ije/dyn094.
12. -Caselles, V., Sobrino, J.A., and Coll, C. (1992). A physical model for interpreting the land surface temperature obtained by remote sensors over incomplete canopies. *Remote Sens. Environ.*, 39, 203-211.
13. -Centers for Diseases Control and Prevention-CDC (2010) Calor extremo: guía de prevención para promover su salud y seguridad [Online]: <http://www.bt.cdc.gov/disasters/extremeheat/es/heatguide.asp> [Consultado en: Febrero, 2011]
14. -Chander, G., Markham, B (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (11), 2674–2677.
15. -Chen, X.L., Zhao, M.Z., Li, P.X., Yin, Z.Y., (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*. 104, 133–146.

16. -Chuvieco S, Emilio (2007) Teledetección Ambiental. Editorial Ariel S.A, 3era impresión, Barcelona España, 2007. ISBN978-84-344-8072-8.
17. -Colmenares Timmer, L. C. 2008. La dualización urbana como resultado del proceso globalizador. Caracas 1980-2007. Editorial de la Universidad de Granada. Granada-España. Tesis Doctoral, 400 p.
18. -Collins, J.P., A. Kinzig, N.B. Grimm, W.F. Fagan, D. Hope, J. Wu, and E.T. Borer (2000). A new urban ecology: modeling human communities as integral parts of ecosystems poses special problems for the development and testing of ecological theory. *American Scientist* 88:416-425.
19. -Córdova, Karenia (2011a). Geotecnología espacial aplicada al estudio del clima urbano: Análisis térmico superficial en la ciudad de Caracas-Venezuela *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 52(2) 2011, 31-46, [Online] Disponible en: [//www.saber.ula.ve/dspace/bitstream/123456789/34395/1/articulo2.pdf](http://www.saber.ula.ve/dspace/bitstream/123456789/34395/1/articulo2.pdf) [Consultado en: Diciembre, 2011].
20. -Córdova, Karenia (2011b). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, Octubre- 2009, Marzo- 2010. *Revista Terra*, Vol. XXVII, N° 42, Julio-Diciembre 2011.
21. -Córdova, K (2009). Spatial Geotechnology applied to urban climate studies: Thermal analysis of urban surface and urban land use in Caracas city, *Fifth Urban Research Symposium 2009*, Marseille 28- 30 Junio, 2009. [Online].

Disponible en:

<http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1256566800920/6505269-1268260567624/Cordova.pdf> [Consultado en: Noviembre, 2009].

22. -Correa E.N, Flores Larsen S y Lesino G (2003) Isla De Calor Urbana: Efecto de los Pavimentos. Informe de Avance. ASADES. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 7, N° 2, 2003, ISSN 0329-5184.
23. -Corporación Andina de Fomento-CAF (2000). Las lecciones de El Niño: Memorias del Fenómeno El Niño 1997 - 1998: Retos y propuestas para la Región Andina: Venezuela. Noviembre, Caracas, Venezuela.
24. - Dash, P., Gottsche, F.-M., Olesen, F.-S., Fischer, H., (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice current trends. *International Journal of Remote Sensing* 23 (13), 2563-2594.
25. Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke & J. Wieringa, (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. Proc. 12th Conf. Appl. Climat., *Amer. Meteorol. Soc.*, Boston, pp. 96-99.
26. -De Lisio, A (2001). La evolución urbana de Caracas. Indicadores e interpretaciones sobre el desarrollo de la interrelación ciudad-naturaleza. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 42(2) 2001, 203-226.

27. -De Souza, Edílson, De Mello B, Gustavo M, Lombardo, Magda A. (2003) Análise do Fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas, por Meio da Combinação de Dados Landsat e Ikonos. *Anais XI SBSR, Belo Horizonte*, Brasil INPE, p. 1741 – 1748.
28. -Delgado Linero, Manuel G, (2004) Crecimiento de la población y proceso de urbanización en el Distrito Metropolitano de Caracas: efectos ambientales, II *Encuentro Nacional de Demógrafos y Estudiosos de la Población*, [Online] Disponible en: http://www.somosavepo.org.ve/download/cdt_123.pdf , [Consultado en: Julio, 2011].
29. -Dhainaut, Jean-François, Claessens, Yann-Erick, Ginsburg, Christine and Riou, Bruno (2004) Unprecedented heat-related deaths during the 2003 heat wave in Paris: consequences on emergency departments, *Critical Care*, 8:1-2doi:10.1186/cc2404 [Online] Disponible en: <http://ccforum.com/content/pdf/cc2404.pdf> , [Consultado en: Febrero, 2011].
30. -Dousset, B; Gourmelon, F; Laaidi, K; Zeghnoun, A; Giraudet, E; Bretin; P; Vandentorren, S. (2009). Satellite monitoring of summertime heat waves in the PARIS metropolitan area, *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.

31. -EPA, Environment Protection Agency (2003) Cooling summertime temperatures: Strategies to reduce urban heat islands [On-line], EPA, Available [Online]. Disponible en: <http://www.epa.gov/hiri/resources/pdf/HIRIbrochure.pdf> [Consultado en: Diciembre, 2010].
32. -Environmental Protection Agency -EPA. (2008) Urban Heat Island Basics, Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Environmental Protection Agency, U.S, [Online]. Disponible en: <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm> [Consultado en: Diciembre, 2010]
33. -Fajardo, L., V. González, J. M. Nassar, P. Lacabana, C. A. Portillo, F. Carrasquel,& J. P. Rodriguez (2005). Tropical Dry Forests of Venezuela: Characterization and Current Conservation Status. *Biotropica* 37(4): 531–546.
34. -Fallas, Jorge. (2003) Modelo de elevación digital para las hojas cartográficas Tilarán y Juntas, E 1: 50.000 del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

35. -Federal Emergency Management Agency-FEMA (2010). Riesgo por Calor. Manual de ayuda, [Online] Disponible en: <http://www.fema.gov/esp/riesgo/calor/index.shtm>, [Consultado en: Diciembre, 2010].
36. -Figuerola, P. and Mazzeo, N. (1998). “Urban-rural temperature differences in Buenos Aires”, *Int. J.Climatol.*, 18, pp. 1709-1723.
37. Frohn, R., Hao, Y., 2006, Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil. *Remote Sensing of Environment*. 100, 237–251.
38. -FUNVISIS (2009) Proyecto de Microzonificación Sísmica en las Ciudades Caracas y Barquisimeto 2005-2009”, FUNVISIS. Mpp CyT, Caracas.
39. -Gallo, K.P., McNab, A.L., Karl, T.R., Brown, J.F., Hood, J.J. and Tarpley, J.D. (1993). Use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied Meteorology*, 32(5): 899 - 908.
40. -Gallo, K. P., & Tarpley, J. D. (1996). The comparison of vegetation index and surface temperature composites for urban heat island analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 17/15, 3071– 3076.
41. Gholami, V., Mohseni Saravi, M. and Ahmadi, H. (2010) Effects of impervious surfaces and urban development on runoff generation and flood hazard in the Hajighoshan watershed. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. 2010, Vol. 8 No.1 pp. 1~12.

42. -Gómez- Echeverri, Luis (Edit., 2002). Cambio Climático y Desarrollo. Yale School of Forestry & Environmental Studies, Oficina del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo-PNUD-Cuba, San José, Costa Rica, 465pp.
43. -Higueras, Esther (2006). Urbanismo bioclimático, Editorial Gustavo Gili-GG, ISBN: 978-84-252-2071-5, Barcelona, España, 241 pp.
44. -Hoyos, Jesús F (1990). Los Árboles de Caracas. Sociedad La Salle de Ciencias Naturales, 409 pp. Caracas, Venezuela.
45. -Huber, Otto, (1993) Vegetación: Variedad y exuberancia, en: *Imagen de Venezuela, una visión espacial*. PDVSA, Caracas.
46. -Hsiao, T. C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
47. -Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, 104 pp, 2008, Ginebra, Suiza.
48. -Jáuregui, Ernesto (2005). Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmósfera*, 18(4), 249-252.

49. -Jimenez-Muñoz, J. C., and J. A. Sobrino (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *J. Geophys. Res.*, 108(D22), 4688, doi:10.1029/2003JD003480.
50. -Kurn, Dan M; Bretz, Sarah E; Huang, Benson; and Akbari, Hashem (1994) The Potential for Reducing Urban Air Temperatures and Energy Consumption Through Vegetative Cooling. Energy & Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720.
51. -Landsberg, H.E. (1981). *The Urban Climate*. Academic Press, New York.
52. -Llanos, Douglas y Almandoz Arturo (2008). Aplicación del modelo de cinturón verde en la ciudad de Caracas, Venezuela. *Provincia*, N° 19, enero-junio, Universidad de los Andes, Mérida, pp 143-160.
53. Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, New York.
54. Lillesand, T.M; Kiefer, R.W; Chipman J. W (2008). *Remote sensing and image interpretation*. Wiley & Sons, Inc., Sixth Edition, ISBN 978-0-470-05245-7, USA.
55. Liu, H and Weng, Q (2008). Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144:199–219.

56. - Lo, C.P., Quattrochi, D.A. and Luvall, J.C. (1997). Application of high – resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2): 287 – 304.
57. -Manara, Bruno (1998) El Ávila. Biografía de una Montaña. Monte Ávila Editores- Fundación Cultural Chacao, Caracas, Venezuela.
58. Martelo, María T (2003) Influencia de las variables macro climáticas en el clima de Venezuela. Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología Dirección General de Cuencas Hidrográficas, MARN, Caracas, Venezuela.
59. -McPherson EG (1994) Cooling urban heat islands with sustainable landscapes, In: Platt RH, Rowntree RA and Muick PC (eds.) *The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity*, University of Massachusetts Press, pp. 151-172.
60. -Meehl, Gerald and Tebaldi, Claudia (2004). More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century, *Science*. 2004 Aug 13; 305(5686):994-7.
61. -Ministerio del poder popular para la Salud (2010). Dirección de Vigilancia epidemiológica, Boletín Epidemiológico, Publicación Semanal Epidemiológica N°10 y 11, Caracas, Venezuela. [Online] Disponible en: <http://www.mpps.gob.ve/> , [Consultado en: Julio, 2011].
62. Minke, Gernot (2004). *Techos Verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo, ISBN 9974-49-323-4.

63. Naredo, José Manuel y Rueda, Salvador (1996). Marco general de desarrollo sostenible aplicado a casos de buenas prácticas en medio urbano. Ciudades para un futuro más sostenible. Habitat II. Primer catálogo español de buenas prácticas. vol. I, MOTPMA, Madrid.
64. -National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2010). LANDSAT-7 SCIENCE DATA USER'S HANDBOOK, Chapter 9 - Calibration Parameter File. [Online] Disponible en: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf , [Consultado en: Diciembre, 2010]
65. -National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2010). LANDSAT-7 PROGRAM, [Online] Disponible en: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat7.html> , [Consultado en: Diciembre, 2010].
66. Noya De Alarcón, B.; Díaz Bello, Z.; Colmenares, C.; Zavala Jaspe, R.; Mauriello, L.; Díaz, M. P.; Soto, M.; Aponte, M.; Ruiz Guevara, R.; Losada, S.; Noya Alarcón, O. Y O. Noya González (2009). Transmisión urbana de la enfermedad de Chagas en Caracas, Venezuela: aspectos epidemiológicos, clínicos y de laboratorio, *Revista Biomed*, 20(3):158-164.
67. Oberndorfer, Erica; Lundholm, Jeremy; Bass, Brad; Coffman, Reid R; Doshi, Hitesh; Dunnett, Nigel; Gaffin, Stuart; Köhler, Manfred; Liu, Karen K. Y;

- And Rowe, Bradley (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services/ *BioScience* , Vol. 57, No. 10 November.
68. -Oke, T. R (1973). "City size and the Urban Heat Island". *Atmos. Environ.*, 7, pp.769-779.
69. - Oke, T.R. (1976). The distinction between canopy and urban boundary-layer heat islands. *Atmosphere*, 14: 268 - 277.
70. -Oke, T. R (1987). Boundary layer climates (Second edition). By Methuen. Pp. 435.
71. -Oke, T. R (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24.
72. -Oke, T.R. (1988). "The urban energy balance," *Progress in Physical Geography*, 12, 471-508.
73. -Oke, T.R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. In J. E. Cermak, A. G. Davenport, E. J. Plate, & D. X. Viegas (Eds.), *Wind climate in cities* (pp. 81–107). Dordrecht: Kluwer Academic.
74. -Oke, T.R. (2004). SITING AND EXPOSURE OF METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AT URBAN SITES. 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Banff, 25-29 October. To be published by Kluwer.

75. -Oke, T.R. (2006) Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods, Report N° 81, WMO/TD-N°.1250.
76. -Olave-Solar, Carlos; Santana, Ariel; Butorovic, Nicolás y Acuna, Paola (2008). Variabilidad térmica en la región nororiental de la península de Brunswick, Magallanes, Chile, empleando datos LANDSAT. *Anales Instituto Patagonia* (Chile) [online]. 2008, vol.36, n.2 [citado 2012-03-24], pp. 5-12. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-686X2008000200001&lng=es&nrm=iso, ISSN 0718-686X, doi: 10.4067/S0718-686X200800020000.
77. -OMM (Organización Mundial de Meteorología) (2004). *Statement on the status of the global climate in 2003*. No. 966, 2004, ISBN 92-63-10966-4, World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza.
78. -OMM (Organización Mundial de Meteorología) (2010). *Statement on the status of the global climate in 2009*. N° 1055, 2010, ISBN 978-92-63-11055-8, World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza.
79. -OMM (Organización Mundial de Meteorología) (2011). *Statement on the status of the global climate in 2010*. N° 1074, 2011, ISBN 978-92-63-11074-9, World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza.
80. -Organización Mundial de la Salud-OMS (1999) *Guías de salud para incendios de vegetación*, OMS Ginebra, 1999.

81. -Oliveira de Sousa, Daniela, De Mello Baptista, Gustavo M. (2005) Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, INPE, p. 4525-4530.
82. -Petróleos de Venezuela, S.A -PDVSA (1993). Atlas Imagen de Venezuela. Una Visión Espacial- Clima., pp 38-41.
83. -Perdomo, Doris (2009). Contaminantes aéreos y sus efectos en pacientes alérgicos del Valle de Caracas. *Gaceta Médica de Caracas* 2009; 117(4):274-313. [Online] Disponible en: <http://www.scielo.org.ve/pdf/gmc/v117n4/art03.pdf>, [Consultado en: Julio, 2011].
84. -Prigogine, Ilya; Nicolis, G. (1977). Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. Wiley. ISBN 0-471-02401-5.
85. -Pomerantz. M., Akbari. H., Verdal. P., Konopacki. S. J., and Taha. H (1999). Reflective surfaces for cooler buildings and cities. *Philosophical Magazine*, 79 (9): 1457 –1476.
86. Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P., (2001). A mono-algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel–Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing* 22 (18), 583–594.

87. -Reyes Lugo, Matías (2011). ¿Qué ha pasado en Venezuela cuando el ambiente urbano invade el hábitat natural de los triatominos vectores de la Enfermedad de Chagas? VITAE, Academia Biomédica Digital, Facultad de Medicina, Universidad Central de Venezuela, Julio-Septiembre. [Online] Disponible en:
http://vitae.ucv.ve/index_pdf.php?module=articulo_pdf&n=4385&rv=100,
[Consultado en: Diciembre, 2011].
88. -Ribeiro Sobral, Helena (2005). Heat island in Sao Paulo, Brazil: Effects on health, *Critical Public Health*, June 2005; 15(2): 147–156.
89. Richards, John. A & Jia, Xiuping (2006) *Remote sensing digital image analysis*. 4th Edition, Springer, Berlin Germany, ISBN 10- 3-540-25128-6.
90. -Ritter, Michael E (2009). The Physical Environment: an Introduction to Physical Geography. [Online] Disponible en:
http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/title_page.html,
[Consultado en: Noviembre, 2009].
91. -Rocco, N. 2005. Caracas cenital. Fundación para la Cultura Urbana. Critería Editorial, C.A. Caracas-Venezuela.
92. -Rodríguez, Jon Paul; Rojas-Suarez, Franklin; Hernández, Diego (2010). Libro Rojo de los Ecosistemas Terrestres de Venezuela. 1era Edic., PROVITA, Shell de Venezuela, LeNovo Venezuela.

93. -Romero Dávila, Sonia; Morales Méndez, Carlos Constantino y Némiga, Xanat Antonio (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de climatología*, Vol. 11 (2011): 1-10 ISSN 1578-8768.
94. -Rosales, Luis (2007). Zonas climáticas para el diseño de edificaciones y diagramas bioclimáticos para Venezuela, *Revista Tecnología y Construcción*, v.23 n.1 Caracas 2007.
95. -Roth, M., T. R. Oke and W. J. Emery (1989). "Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utility of such data in urban climatology," *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1699-1720.
96. Rueda, Salvador (1995): *Ecología urbana. Barcelona y su región metropolitana como referentes*. Beta Editorial, Barcelona. 266 pp.
97. Rueda, Salvador (2002). Modelos de ordenación del territorio más sostenibles. [Online] Disponible en: http://arquiciudad.comoj.com/Archivos.Net/Fase%20I/S_Rueda/modelosurbanosSost.pdf, [Consultado en: Diciembre, 2010].
98. -Sant'Anna Neto, João Lima, de Costa Trindade, Margarete Cristiane (2008). Febrile cities: the influence of construction materials in the production of heat islands in low-income districts of urban areas with tropical climate in Brazil, in *Climate change and urban Desing, Third Annual Congress of the council for European Urbanism*, Oslo, Norway, 2008.

99. -Schott, J.R. & Volchok, W.J., (1985). Thematic mapper thermal infrared calibration, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1351-1357.
100. -Smith, C.; Levermore, G (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world. *Energy Policy* (2008), doi:10.1016/j.enpol.2008.09.011.
101. -Sosa, Maria Eugenia, Siem, Geovanni, Hobaica, Maria Elena (2004). *Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico*. Publicación del Instituto de Desarrollo experimental de la Construcción-IDEC, Facultad de Arquitectura y Urbanismo- FAU, Universidad Central de Venezuela-UCV, 160 pp, Caracas Venezuela.
102. -Soux, A., Voogt, J.A. and T.R. Oke, (2004). A model to calculate what a remote sensor 'sees' of an urban surface *Bound. Layer-Meteorol.*, 111, pp. 109-132.
103. -Sutic, Nada (2003). How green roof can improve the urban environment in uptown Waterloo, Integrating Natural and Urban Environments. [Online] Disponible en: <http://www.environment.uwaterloo.ca/ers/research/490s/Sutic-GreenRoofs.pdf>, [Consultado en: Noviembre, 2011].
104. -Taha H (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy and Buildings*, 25, 99–103.

105. -Terradas, Jaume (2001). *Ecología Urbana*, Rubes Editorial S.L, Barcelona. 128 pp, ISBN 9788449700774.
106. -Tran Thi Van, Le Van Trung and Hoang Thai Lan, (2009). *Application of Thermal Remote Sensing in Study on Surface Temperature Distribution of Ho Chi Minh City*”, 7th FIG Regional Conference Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment- Building the Capacity Hanoi, Vietnam, 19-22 October.
107. -Trenberth, K. E. and Fasullo, J. T. (2009) Global warming due to increasing absorbed solar radiation *Geophys. Res. Lett*, 36, L07706, doi:10.1029/2009GL037527, 2009.
108. -United Nations (2009). *World urbanization prospects: The 2009 revision*. [Online] Disponible en: <http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm> [Consultado en: Diciembre, 2010].
109. -United Nations-UN-Habitat (2011). *Global Report on Human Settlements 2011.Cities and Climate Change*, 68 pp, version en español: ISBN Number: 978-92-1-132330-6, Rio de Janeiro, Brasil.
110. -U.S Geological Survey (USGS) (2011) *SLC-off Products: Background* [Online] Disponible en: http://landsat.usgs.gov/products_slcutoffbackground.php, [Consultado en: Junio, 2011].

111. -Valor, E. and Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American Areas. *Remote Sens. Environ.* 57, 167-184.
112. -Valladares, F., L. Balaguer, E. Martinez-Ferri, E. Perez-Corona y E. Manrique (2002). Plasticity, instability and canalization: is the phenotypic variation in seedlings of sclerophyll oaks consistent with the environmental unpredictability of Mediterranean ecosystems? *New Phytologist* 156: 457-467.
113. -Velásquez, Ramón (2008) Algunos mecanismos físicos responsables de la distribución anual de la precipitación en Venezuela. Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, [Online] Disponible en: http://www.meteorologia.mil.ve/index_inv.php , [Consultado en: Junio, 2011].
114. -Voogt, J.A. and T.R. Oke (1997). "Complete urban surface temperatures", *Journal of Applied Meteorology*, 36, No. 9, 1117-1132.
115. -Voogt, J.A. and T.R. Oke (1998 a). "Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature", *International Journal of Remote Sensing*, 19, 895-920.
- 116.-Voogt, J.A. and T.R. Oke (1998 b). "Radiometric temperatures of urban canyon walls obtained from vehicle traverses", *Theoretical and Applied Climatology*, 60, 199-217.
- 117.-Voogt, J.A., Oke. T.R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*. 86, 370-384.

- 118.-Wang, L.T. & De Liberty, T.L (2005). LANDSAT atmospheric correction - The good, the bad, and the ugly. University of Delaware, Department of Geography, USA. (14.05.2008). [Online] Disponible en: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1560.pdf>, [Consultado en: Junio, 2010].
- 119.-Weng, Q., Lu, D., Liang, B. (2006). Urban surface biophysical descriptors and land surface temperature variations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72 (11), 1275-1286.
- 120.-Weng Q, Liu, H (2008). Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, USA. *Environ Monit Assess*, 144:199–219.
- 121.-WMO. STATEMENT ON THE STATUS OF THE GLOBAL CLIMATE IN 2001 (2002) No. 940, 2002, World Meteorological Organization, ISBN 92-63-10940-0.
- 122.WMO. STATEMENT ON THE STATUS OF THE GLOBAL CLIMATE IN 2003 (2004) No. 966, 2004, World Meteorological Organization, ISBN 92-63-30966-3.
- 123.-Xian, G., Crane, M., (2006). An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 104, 147–156.

Índice de Figuras.

Figura 1. Localización Área de Estudio.....	14
Figura 2. Causas de la formación de la isla de calor urbano.....	32
Figura 3. Balance Radiativo Superficial Urbano	34
Figura 4. Albedos Urbanos	35
Figura 5. Perfil Urbano de la Isla de Calor.	37
Figura 6. Estructura vertical del domo de calor urbano o isla térmica urbana.....	39
Figura 7. Representación esquemática de los principales componentes de la atmosfera urbana.....	41
Figura 8. Tipos Climáticos Urbanos.	46
Figura 9. Precipitación y temperatura media en el Valle de Caracas, Estaciones UCV-0539, La Carlota 0544 y Cajigal 0531.	48
Figura 10. Estación Cajigal. Serial 0531 .Registros de Radiación, insolación, humedad, evaporación al sol y nubosidad.....	50
Figura 11. Estación UCV. Registros geotérmicos del suelo a 2cms de profundidad. 52	
Figura 12. Estación UCV. Registros de temperatura media, máxima y mínima absoluta.	53
Figura 13. Estación Cajigal. Serial 0531. Registros de evaporación al sol y sombra, Temperatura media y humedad relativa.....	54
Figura 14. Circulación local Valle-Montaña diurna y nocturna.	57

Figura 15. Dirección de los vientos dominantes en el Valle de Caracas.	58
Figura 16. Cartogramas Históricos de Caracas 1578, 1870,1884, 1897.	61
Figura 17. Cartogramas Históricos de Caracas. 1930-1934.....	63
Figura 18. Caracas, 1951. Plano Regulador de Caracas. Usos propuestos.	64
Figura 19. Caracas. Valores referenciales del suelo Bs/m ² , 2009.	65
Figura 20. Localización de los barrios en Caracas.....	66
Figura 21. Mapa clinométrico de las laderas circundantes del Área Metropolitana de Caracas.	67
Figura 22. Densidad Población Caracas.2010.....	68
Figura 23. Cuadrantes Urbanos- Caracas.....	71
Figura 24. Espectro electromagnético.....	75
Figura 25. Diagrama adaptado de Short.....	79
Figura 26. Pistolas térmicas con o sin cámara infrarroja.	82
Figura 27. Sensores térmicos aerotransportados.....	83
Figura 28. Repositorio Global-Glovis-USGS.	86
Figura 29. Clasificación Semiautomática	92
Figura 30. Modo doble visor.....	93
Figura 31. Análisis firmas espectrales.	94
Figura 32. Leyenda de Clases de Uso de Suelo.	95
Figura 33. Ejemplo de Rangos de NDVI.	98
Figura 34. Rangos de temperaturas superficiales.....	104

Figura 35 a, b. Imagen térmica sin/con capas vectoriales.....	110
Figura 36a LST, b NDVI. Resultados por cuadrantes urbanos 2001.....	119
Figura 37a LST, NDVI b. Resultados por cuadrantes urbanos 2003.....	120
Figura 38 a LST, NDVI b. Resultados por cuadrantes urbanos 2010.....	121
Figura 39. Vistas Aéreas de sectores de bajos ingresos (Barrios) en Caracas.	122
Figura 40. Límites de la Zona Protectora del Área Metropolitana de Caracas-ZPAMC y Zonas Protectoras Internas.	124
Figura 41. Área Seleccionada para la verificación en campo de las unidades de vegetación	126
Figura 42 a. (b, c.) Ejemplo de Ventanas de análisis por sectores.UCV	132
Figura 43. Galpón de la Facultad de Ciencias-UCV.....	135
Figura 44. Estación Cajigal. Variación anual de la temperatura mínima absoluta. ..	137
Figura 45a. (b, c, d) Ventanas de análisis por sectores. La Carlota.	139
Figura 46 a. (b) Ventanas de análisis por sectores. Caracas sureste.	146
Figura 47a, b. Ventanas de análisis por sectores. Caracas suroeste.....	148
Figura 48. Venezuela. Crecimiento de la población rural y urbana.....	155
Figura 49. Caracas. Localidades urbanas donde fueron capturados Chipos, 2010. ..	159
Figura 50. Imagen infrarroja de temperaturas superficiales urbanas.	167
Figura 51. Caracas. Corredor verde del Guaire. Tramo San Agustín.	168
Figura 52. Chicago. Diferencias de temperatura superficial entre techo Verde semi-intensivo y techo convencional sobre edificio del ayuntamiento.....	179

Figura 53. Sistema Modular de Bandejas, para el desarrollo del techo verde extensivo.	181
Figura 54. Techos verdes extensivos (izq) con suculentas y (der) con gramíneas ...	183
Figura 55. Techos Verdes intensivos.	184
Figura 56. Ejemplos de fachadas verdes tradicionales y modernas.	185
Figura 57. Caracas. Residencias. Alto-lar. Técnicas de mitigación pasiva incorporadas al diseño de la edificación.	190
Figura 58. Caracas. Sector Lomas de la Trinidad. Técnicas de mitigación, verdes y pasivas combinadas.	191

Índice de Tablas.

Tabla 1. Características de las Islas Térmicas.	38
Tabla 2. Caracas. Evolución de la superficie construida y la densidad poblacional. ...	62
Tabla 3. Caracas. Areas verdes por habitante en M ²	70
Tabla 4. Resolución espacial de la Serie LANDSAT.	78
Tabla 5. Equivalentes Cartográficos de las resoluciones espaciales LANDSAT ETM+	108
Tabla 6. Valores promedios de temperatura superficial observada para algunas superficies urbanas.	141
Tabla 7. Valores Indicador SOI-ENSO.	152

Tabla 8. Beneficios Techos Verdes Extensivos e Intensivos..... 180

Tabla 9. Proyecciones de los principales efectos esperados relacionados con el cambio climático y eventos extremos en las áreas urbanas. 193

Índice de Fotos.

Foto 1. Estructura de la capa limite Atmosférica sobre el área urbana de Caracas, Noviembre, 2008..... 42

Foto 2. Caracas. Cielos despejados después de la lluvia, Noviembre 2008..... 42

Foto 3. Corredores viales Arbolados. Autopista Fco. Fajardo dirección W-E. 144

Foto 4. Corredores viales arbolados. Vista autopista Fco. Fajardo altura Jardín Botánico de Caracas. Sentido W-E. 144

Foto 5. Corredores viales arbolados. Autopista altura Urbina. Sentido N-S. 145

Foto 6. Caracas. Corredor verde intra-urbano. Sector Montalbán II. 169

Foto 7. Caracas. Sector Montalbán I y II. Parques residenciales integrados a corredores verdes intra-urbanos. 169

Foto 8. Caracas. Taludes remanentes, Urb. Colinas Bello Monte 171

Foto 9. Caracas. Taludes remanentes, Urb. Bello Monte..... 171

Foto 10. Montalbán III, distribuidor La Yaguara-El Junquito..... 172

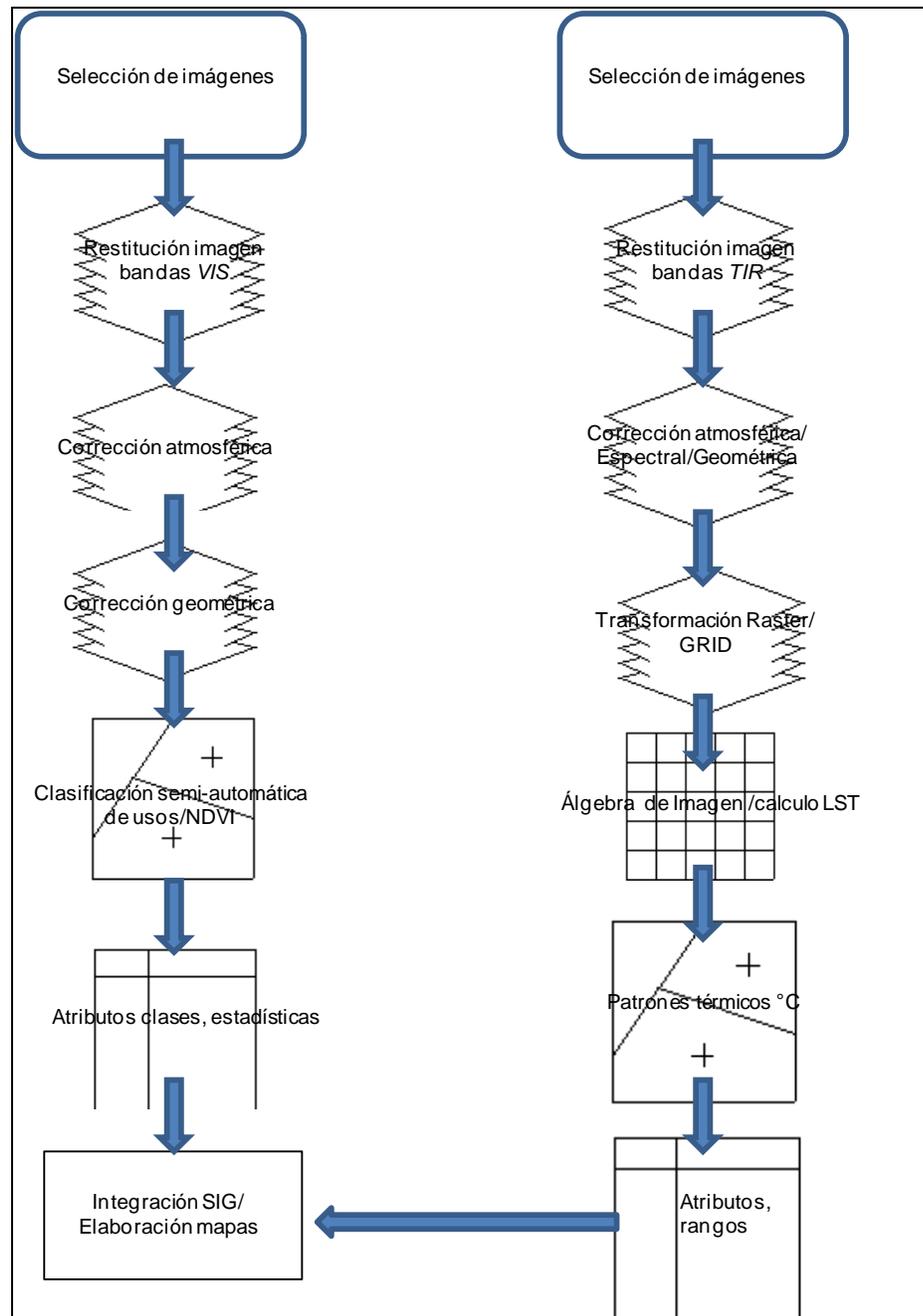
ANEXOS.

Anexo N° 1

Ciudad/Año	Superficie Urbana (Km2)	Habitantes	Densidad (Hab/Km2)
Gran Caracas, 2001	770	3.861.239	5.014,6
Bogotá, 2002	1.440	6.635.000	4.607,6
Gran Buenos Aires, 2000	3.630	8.684.437	2.394,4

Fuente: Caracas Cenital, Fundación para la Cultura Urbana, Critería Editorial C.A, Caracas, 2005.

Anexo N° 2.
Flujograma simplificado de procesos



Fuente: Elaboración propia

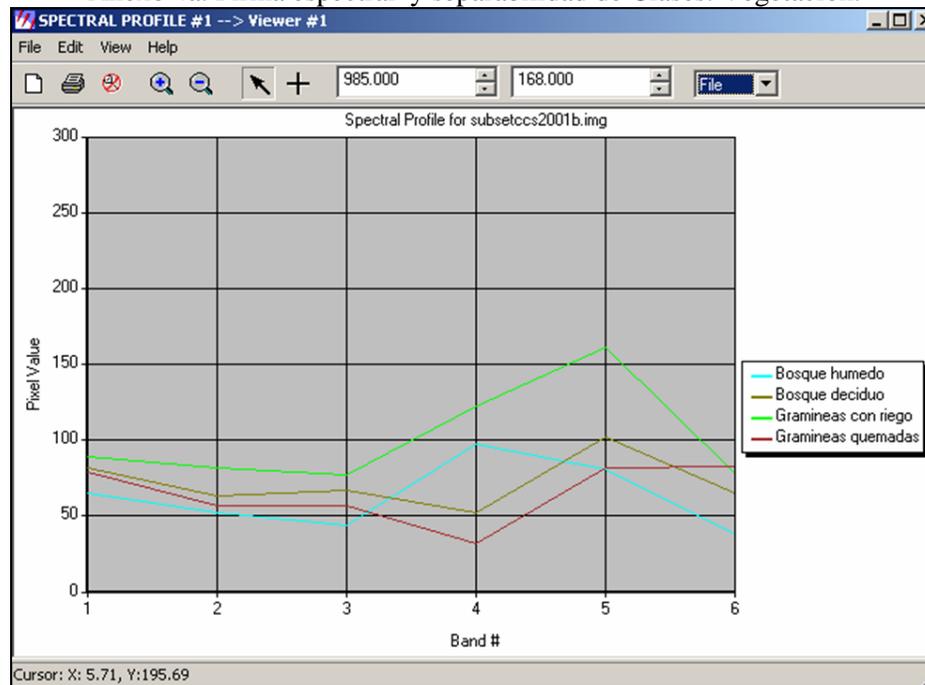
Anexo. 3

Listado de Imágenes LANDSAT del proyecto.

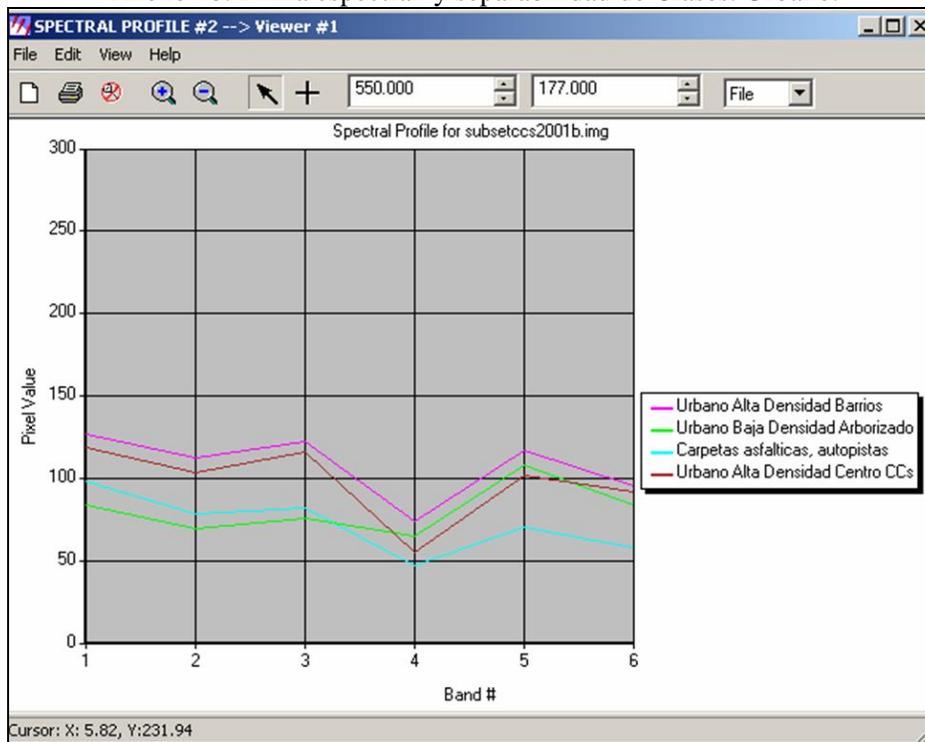
<i>Año</i>	<i>Mes/Día</i>	<i>Path/row</i>
2001	Marzo/14. Mayo/01. Junio/18. Septiembre/06.	p004r053
2002	Julio/07	p004r053
2003	Enero/31. Marzo/20. Octubre/14.	p004r053
2004	Marzo/06.	p004r053
2005	Enero/20. Marzo/09. Octubre/19.	p004r053
2006	Febrero/08. Septiembre/20. Noviembre/07.	p004r053
2007	Enero/26. Febrero/11. Julio/21.	p004r053
2008	Enero/ 29. Marzo/17.	p004r053
2009	Abril/05. Mayo/07. Octubre/14.	p004r053
2010	Enero/02. Marzo/17. Diciembre/20.	p004r053
2011	Enero/21.	p004r053

Fuente: USGS/GLOVIS/LANDSAT collection, elaboración propia.

Anexo 4a. Firma espectral y separabilidad de Clases. Vegetación.



Anexo 4b. Firma espectral y separabilidad de Clases. Urbano.



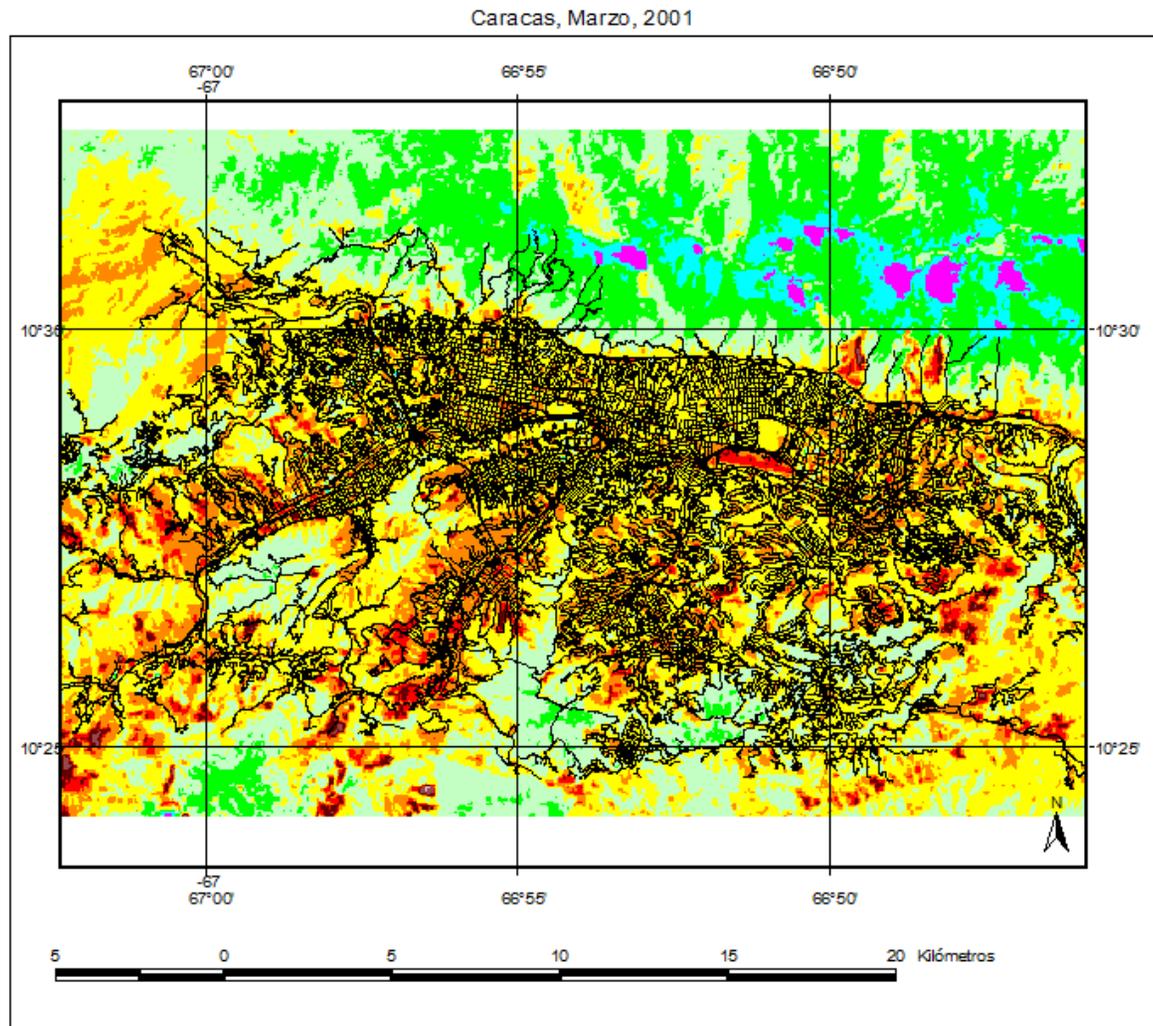
Fuente: Bases de datos del proyecto. Elaboración propia.

Anexo. 6

	ACEROLIT	ACEROTEC	CINDUTEJA	CINDUTOP	CINDURIB	COVERIB	CINDULIT 180
Espesor de la lámina (mm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Largo (mts)	1.5-12	1.5-12	2.3-7.90	1.5-12	1.5-12	1.5-12	1.5-12
Ancho total (cm)	94.0	85.0	94.7	88.0	88.0	88.0	78.0
Ancho útil (cm)	79.0	70.4	70.0	78.0	78.0	78.0	68.0
Número de ondas	10.5	9.5	6.5				
Profundidad de la onda (cm)	1.80	1.80	2.14				
Distancia entre ondas (cm)	8.8	8.8	14.2				
Número de trapecios				5	5	5	5
Profundidad del trapecio (cm)				3.45	3.45	3.45	3.45
Distancia entre trapecios (cm)				19.0	19.0	19.0	17.5
Solape longitudinal (cm)	10-15	10-15	20	10-15	10-15	10-15	10-15
Solape transversal	1.5 ondas	1.5 ondas	1.5 ondas	1 trapecio	1 trapecio	1 trapecio	1 trapecio
Peso por metro lineal (Kg/ml)	4.53	3.47	4.40	5.30	4.39	4.39	3.37
Peso por metro cuadrado (Kg/m2)	5.70	5.00	6.29	6.80	5.62	5.62	4.82
Aislamiento acústico con respecto al zinc (decibeles)	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Espesor del aluminio (mm)						0.04	
Espesor del acero (ASTM 366) (mm)	0.35	0.27	0.35	0.45	0.35	0.35	0.27
Acero galvanizado (ASTM 653) Volado máximo (cm)	30	25	35	45	35	35	25
Conductividad térmica (Kcal/mh °C)						0.631	
Resistencia térmica (m2h °C/Kcal)	0.00370 (a 68.0 °C)	0.00333 (a 73.6 °C)	0.00206 (a 74.0 °C)	0.00247 (a 69.5 °C)	0.00331 (a 72.0 °C)	0.00331 (a 72.0 °C)	0.00254 (a 69.8 °C)
Pendiente mínima	5%	5%	15%	5%	5%	5%	5%
Distancia entre apoyos (mts)	1.75	1.40	1.05	3.20	2.20	2.20	1.80

Fuente: <http://www.cindu.com.ve/laminas.htm>

ANEXO.5 -MAPAS-IMÁGENES DE TEMPERATURA SUPERFICIAL
CARACAS (*LST*), MARZO 2001 – ENERO 2011, INDICE DE VEGETACION-
(*NDVI*) y CLASIFICACION DE USOS 2001, 2003, 2010.

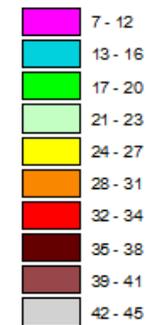


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 1

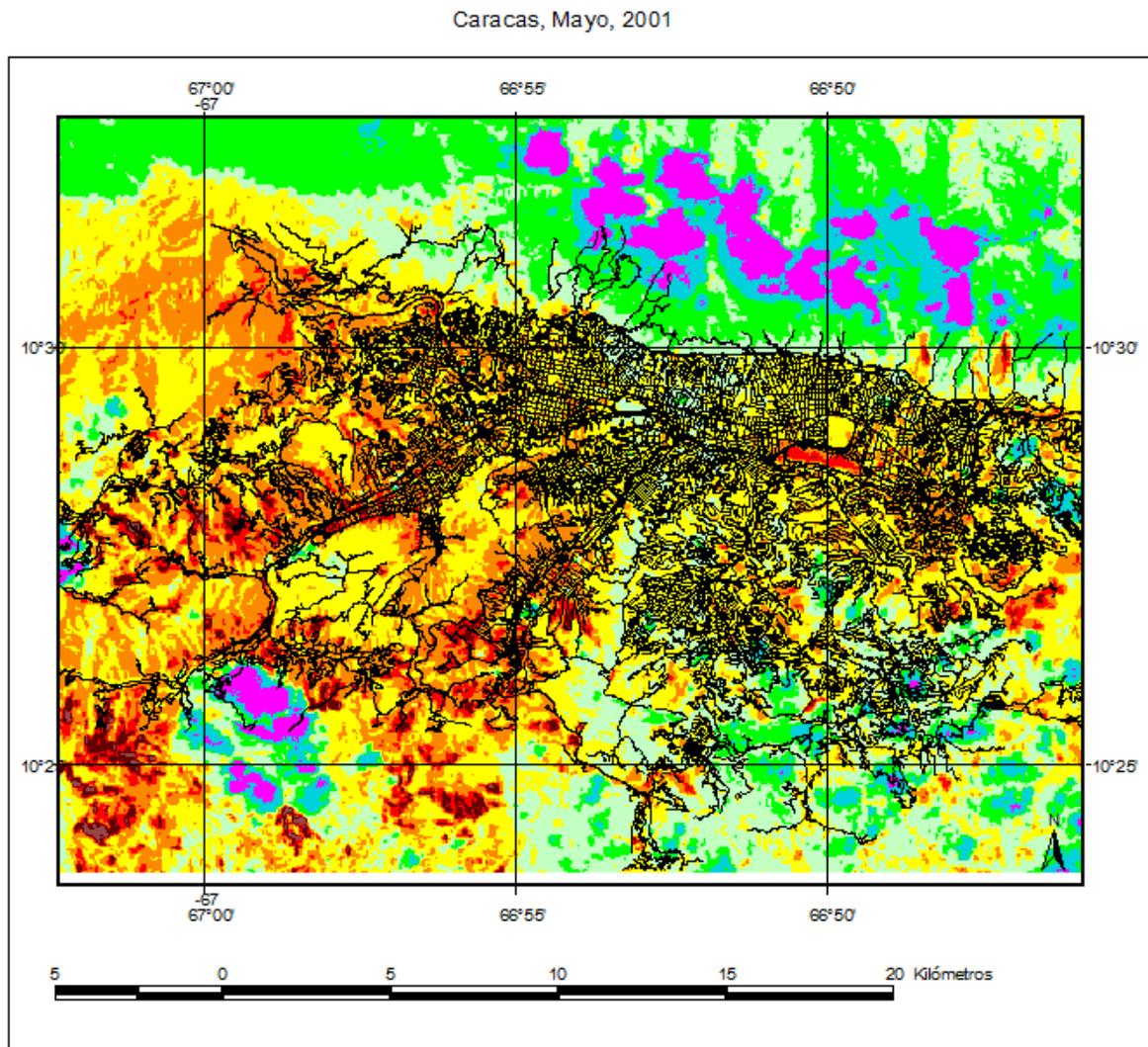
LEYENDA
Temperatura superficial °C



Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA

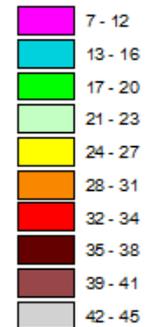


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 2

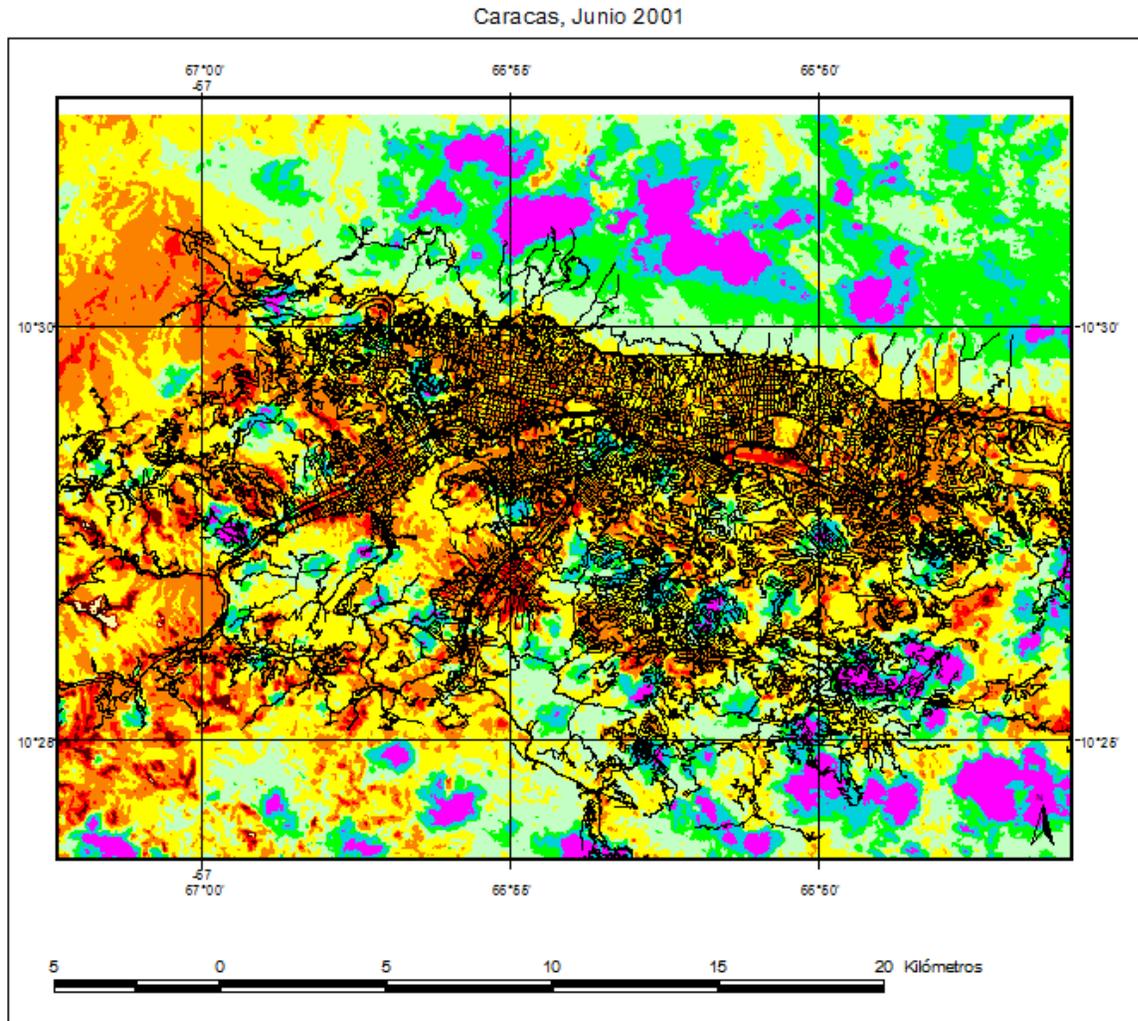
LEYENDA
Temperatura superficial °C



Redes viales

Fuente: USGS Landsat7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVS8,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 3

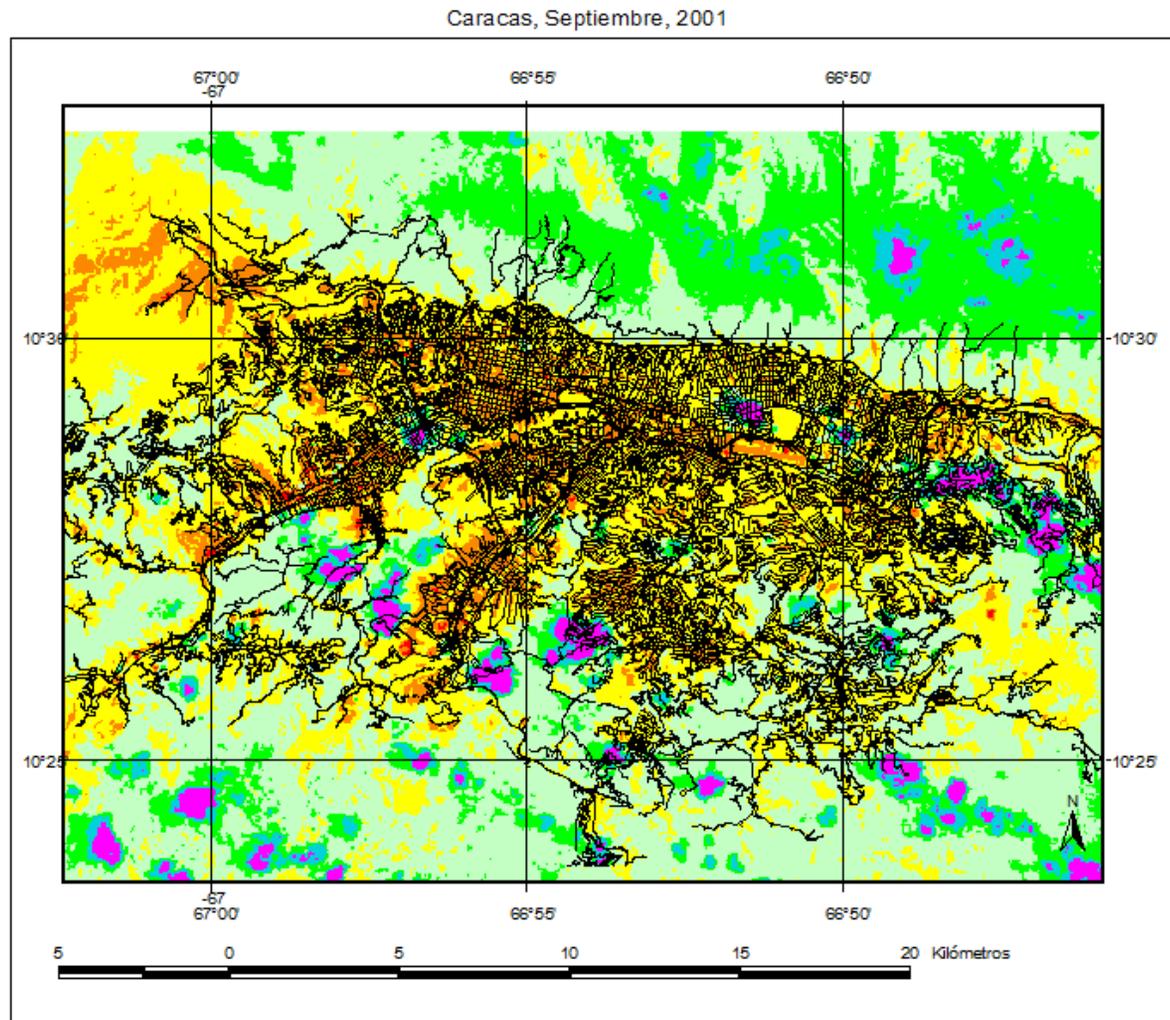
LEYENDA
Temperatura superficial °C

6 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA

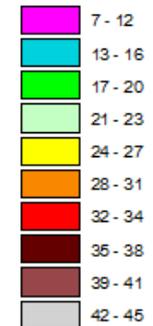


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 4

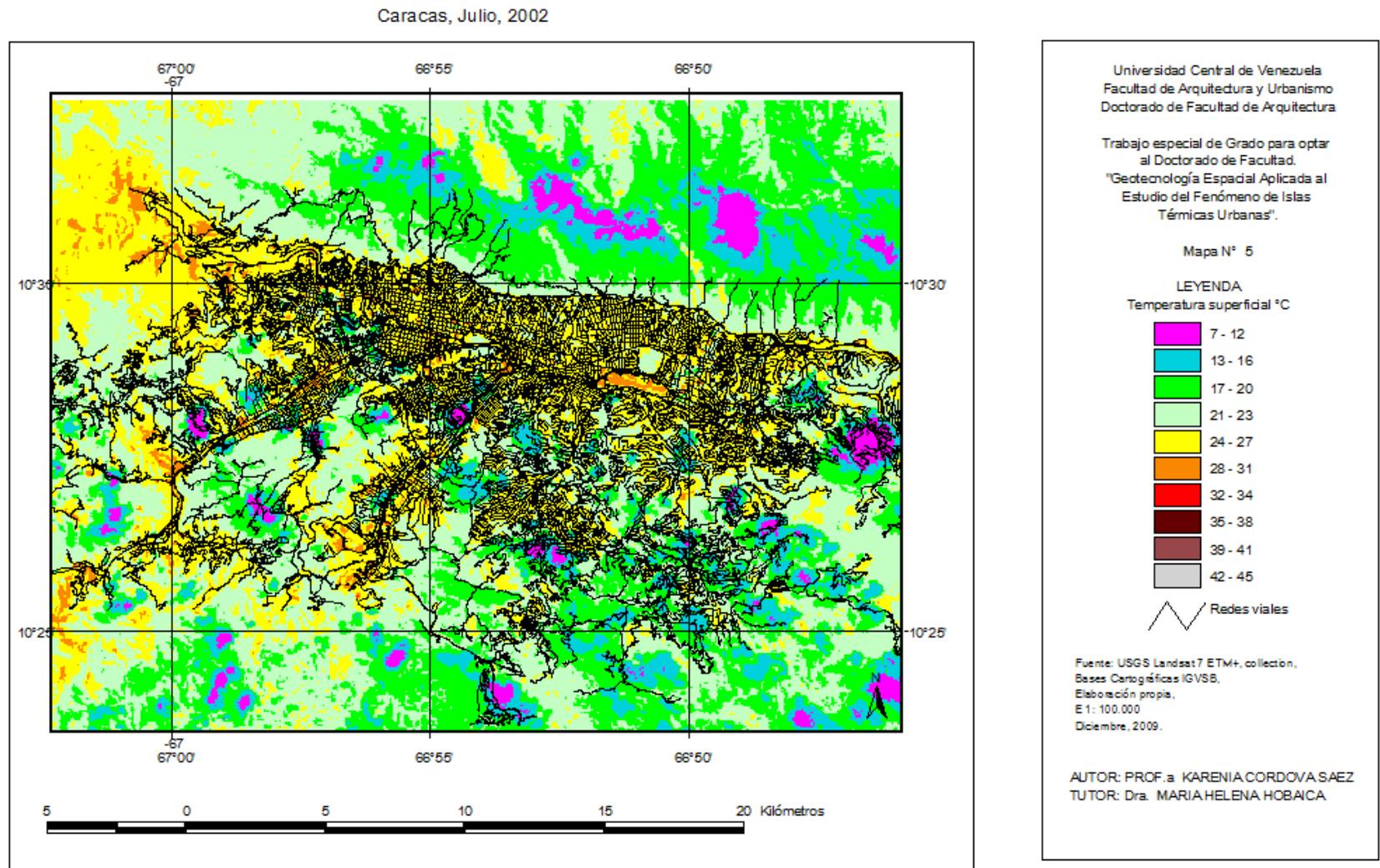
LEYENDA
Temperatura superficial °C

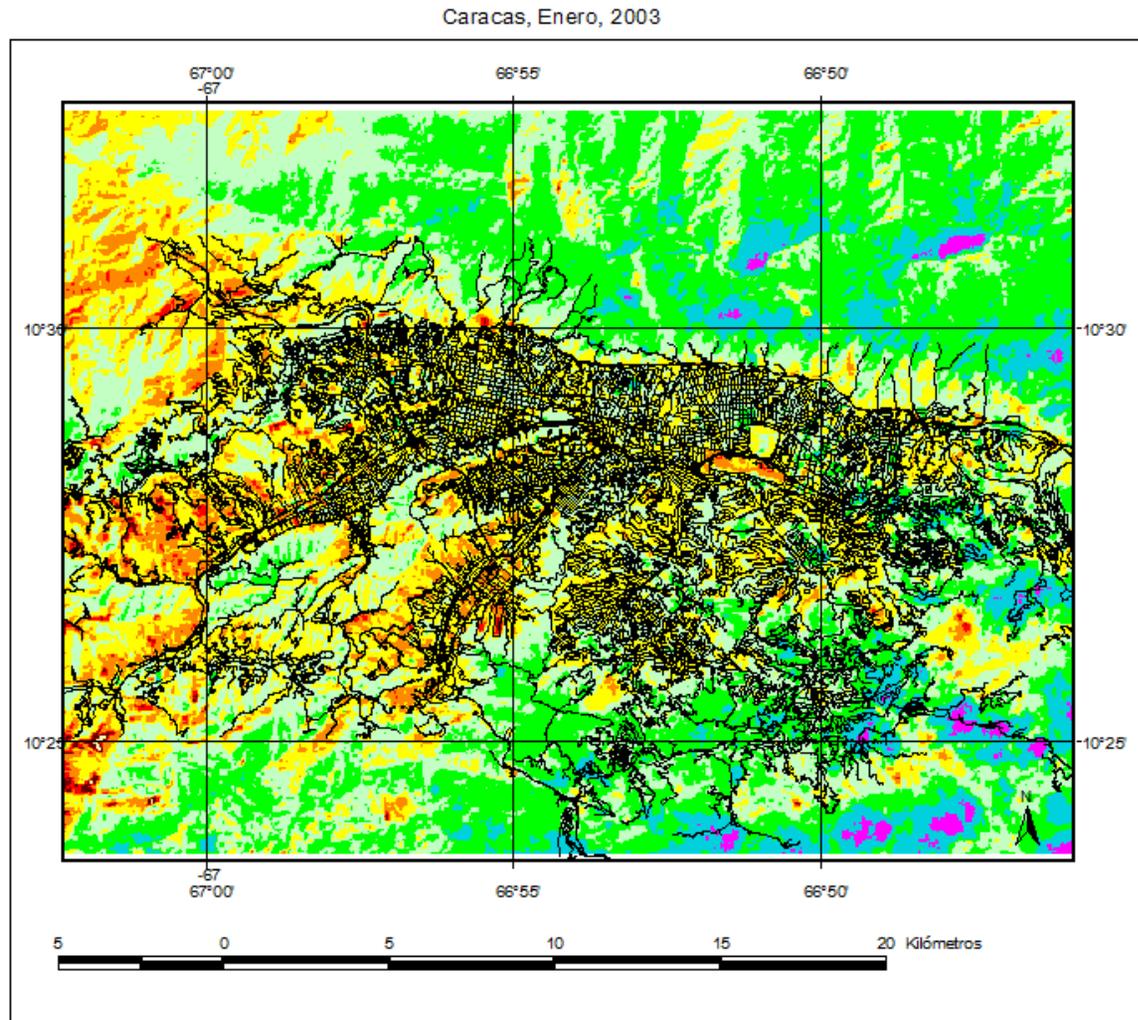


Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVS8,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA





Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 6

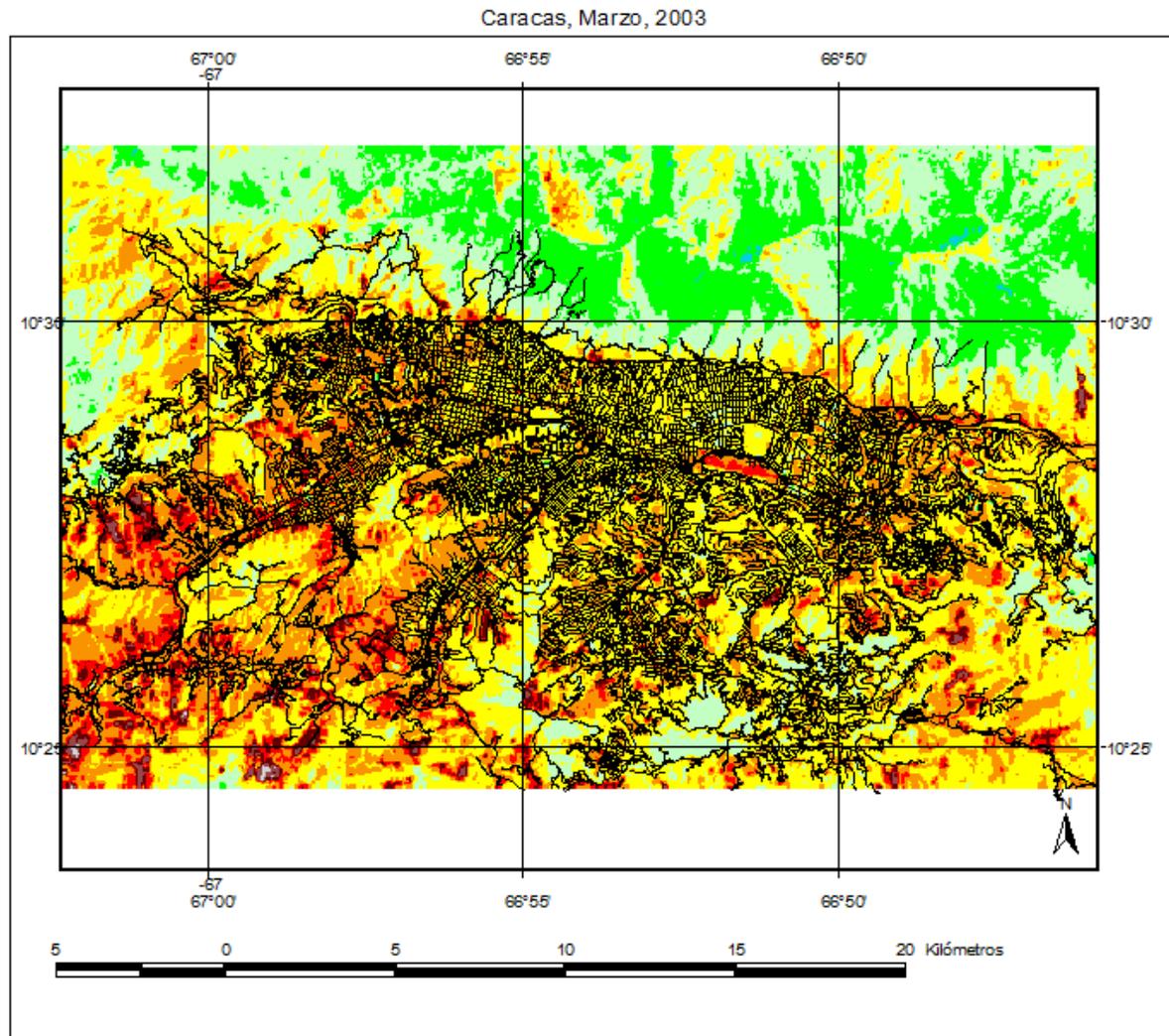
LEYENDA
Temperatura superficial °C

7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA

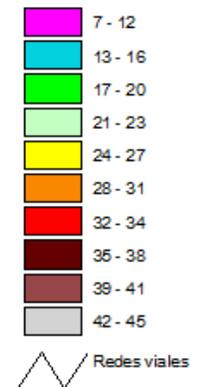


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

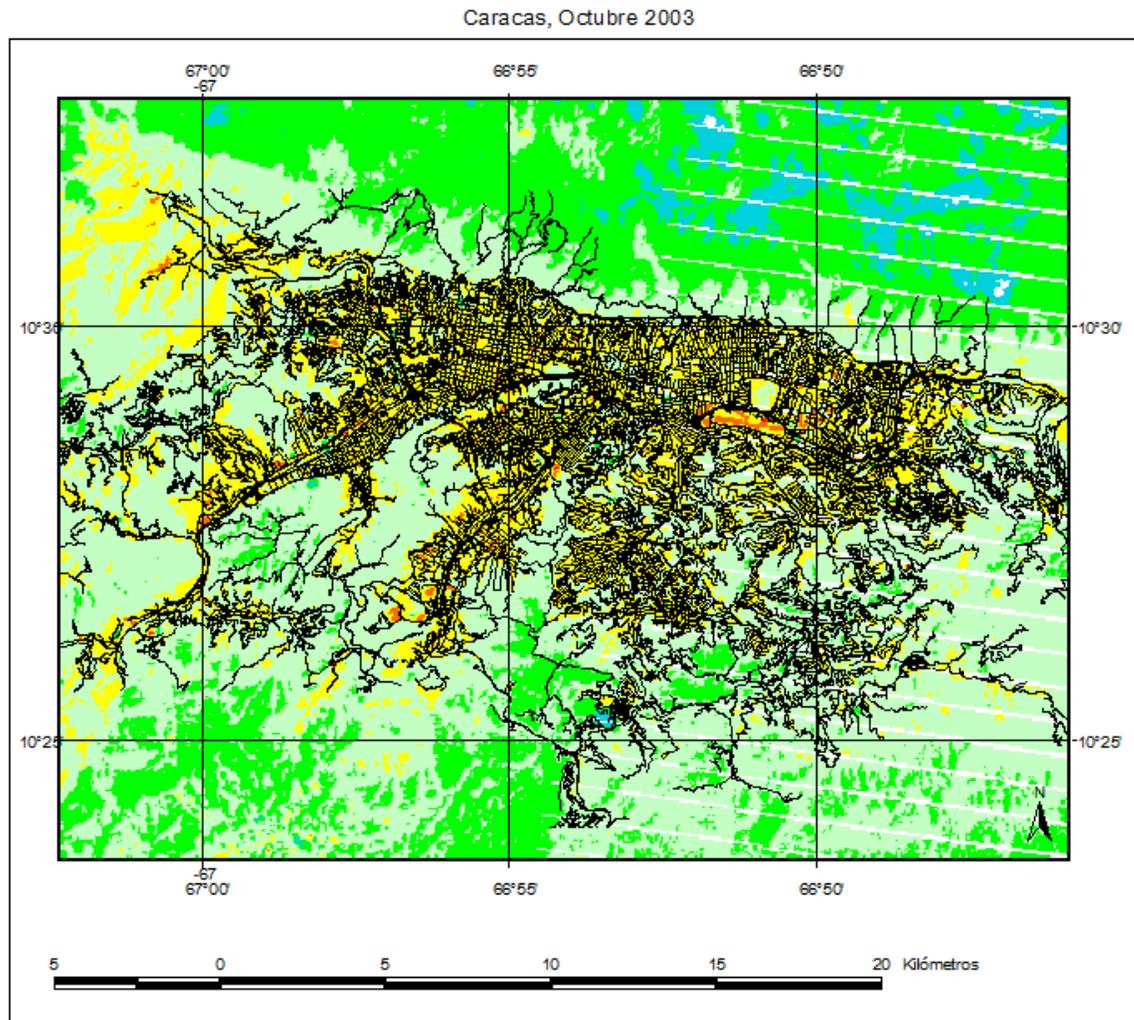
Mapa N° 7

LEYENDA
Temperatura superficial °C



Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia.
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 8

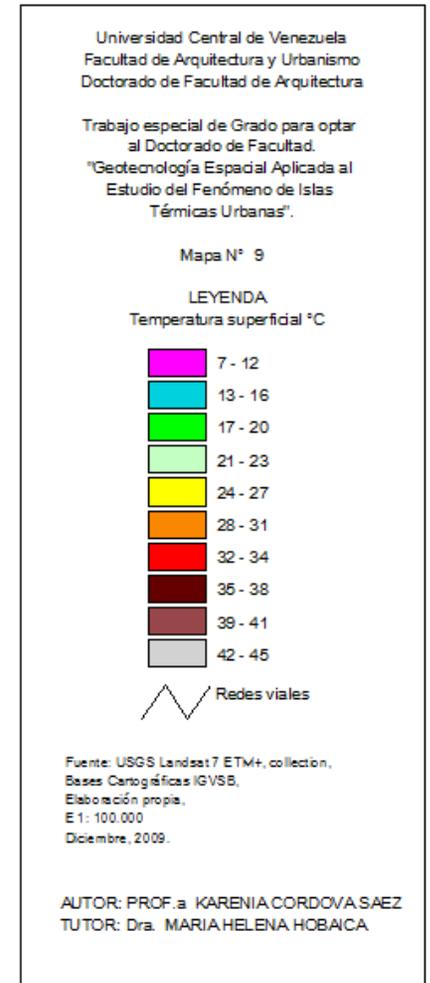
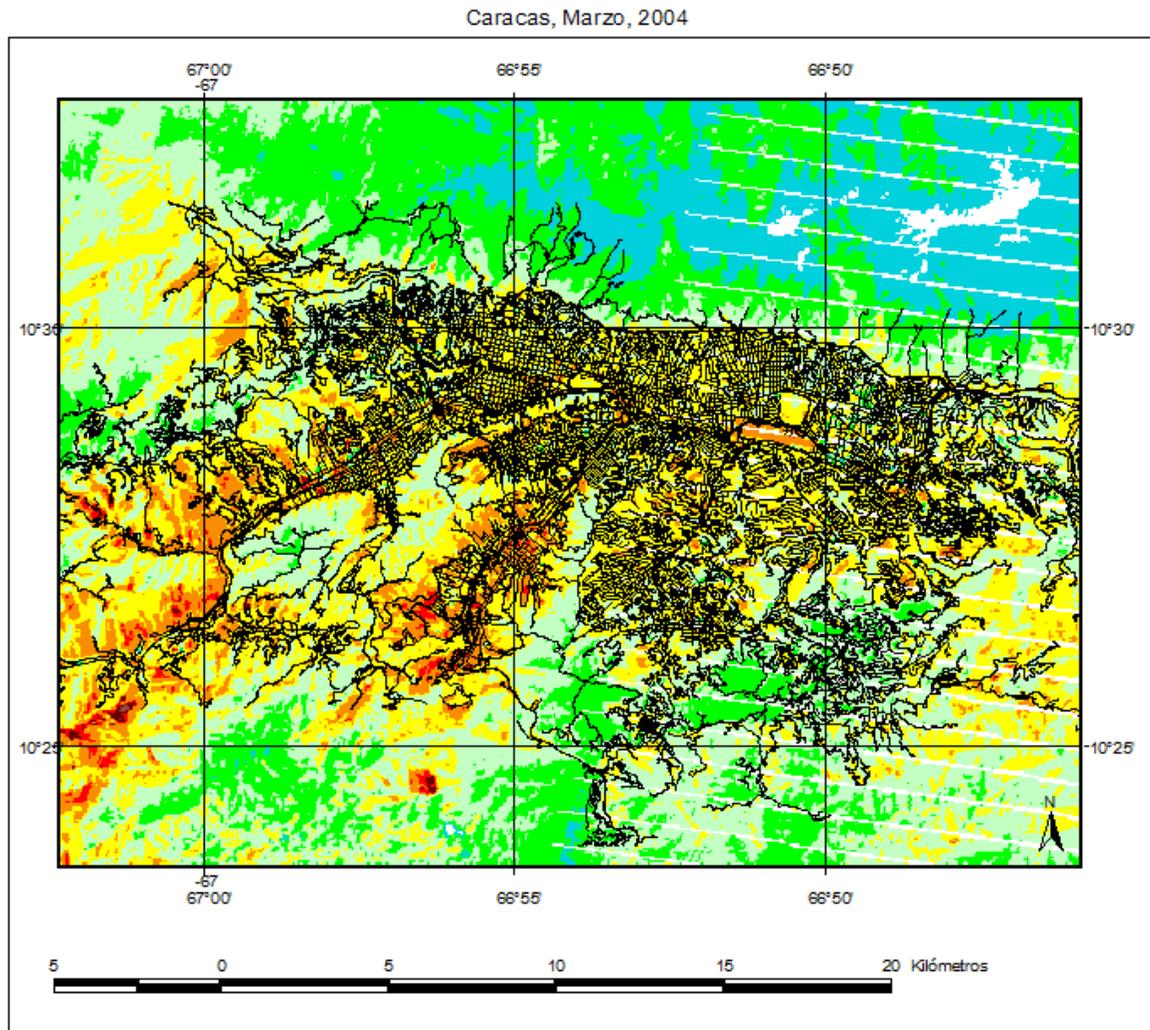
LEYENDA
Temperatura superficial °C

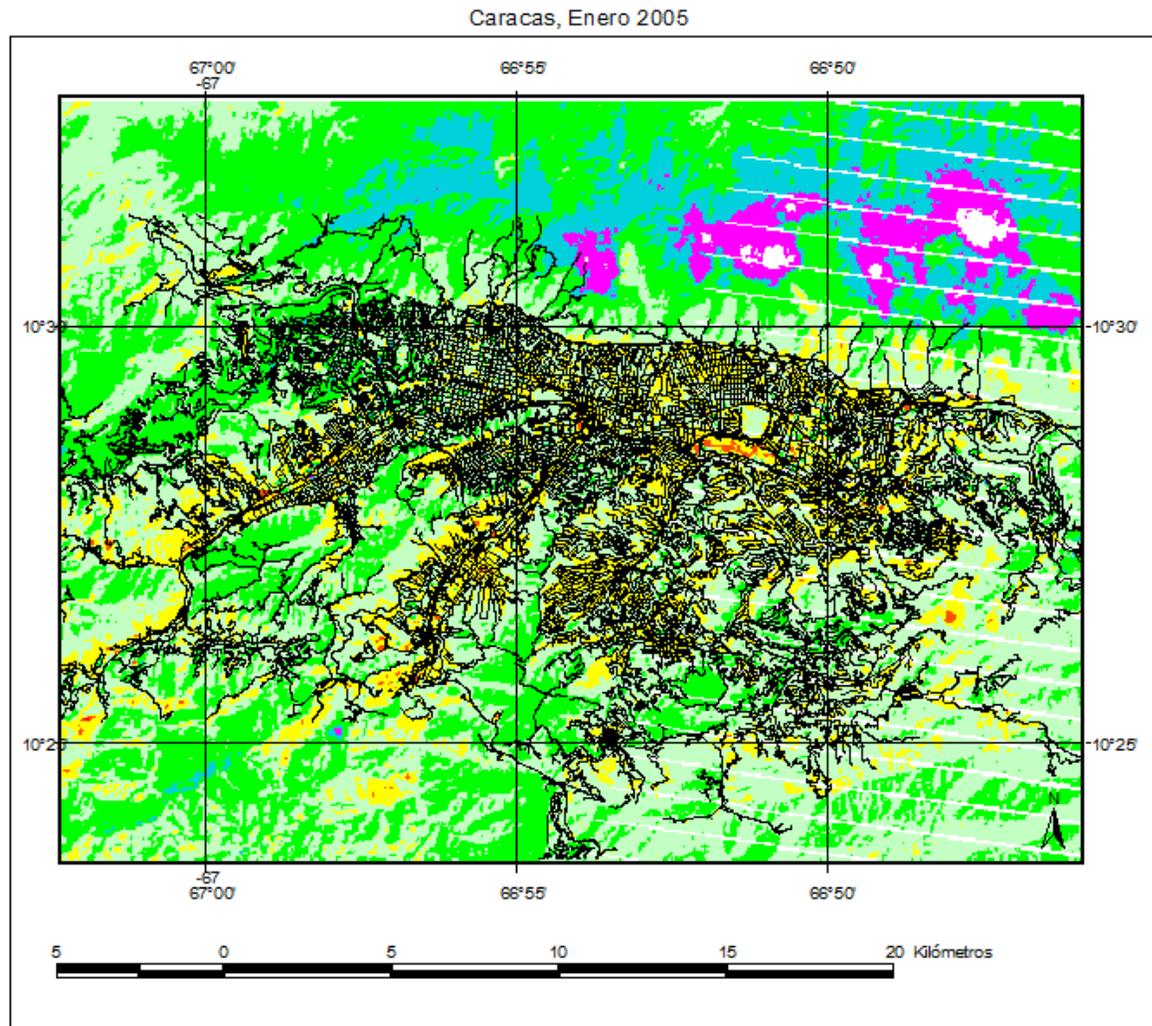
7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF. a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIAHELENA HOBAICA



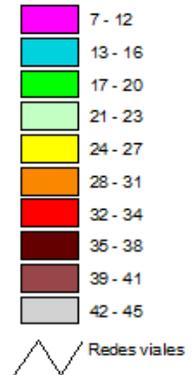


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

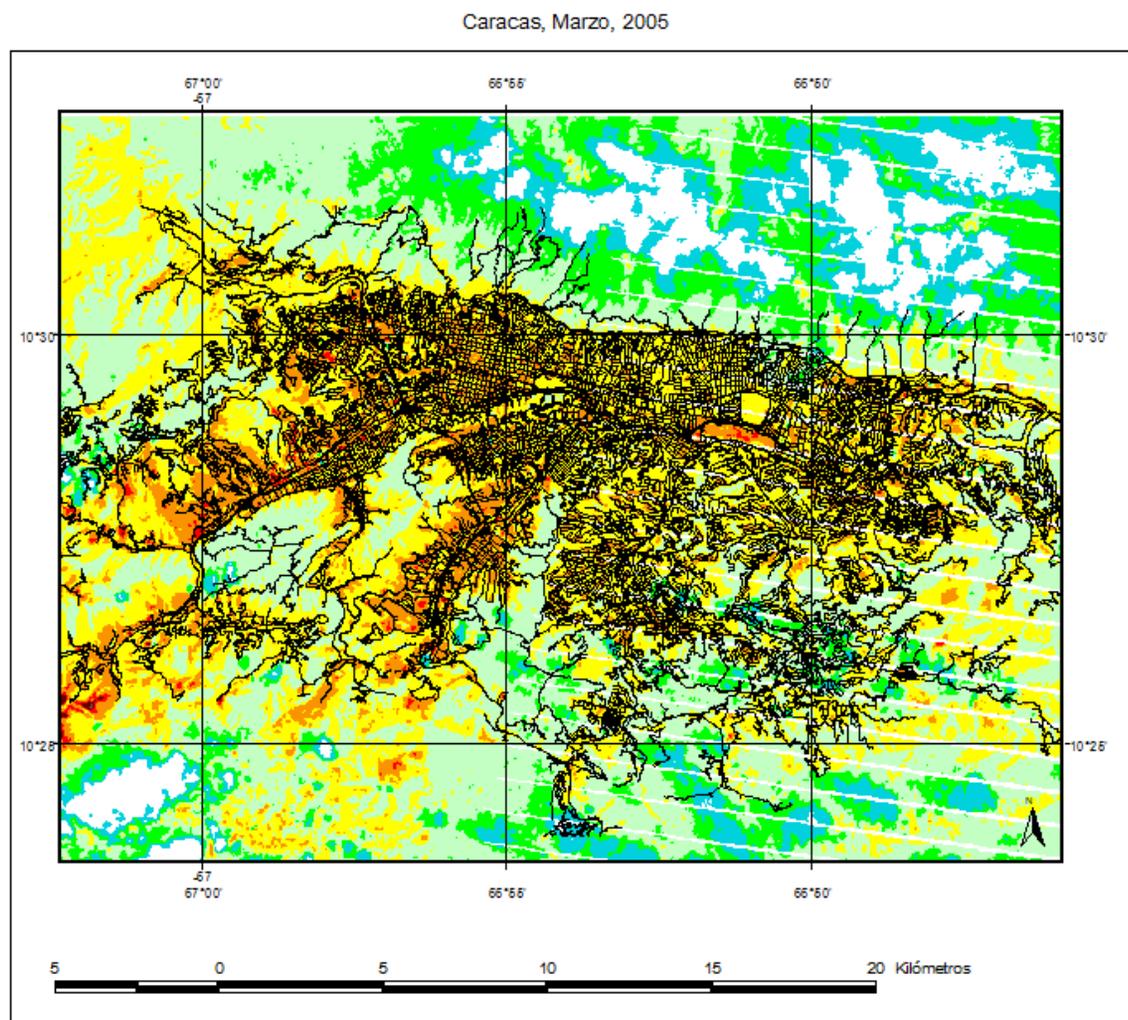
Mapa N° 10

LEYENDA
Temperatura superficial °C



Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 11

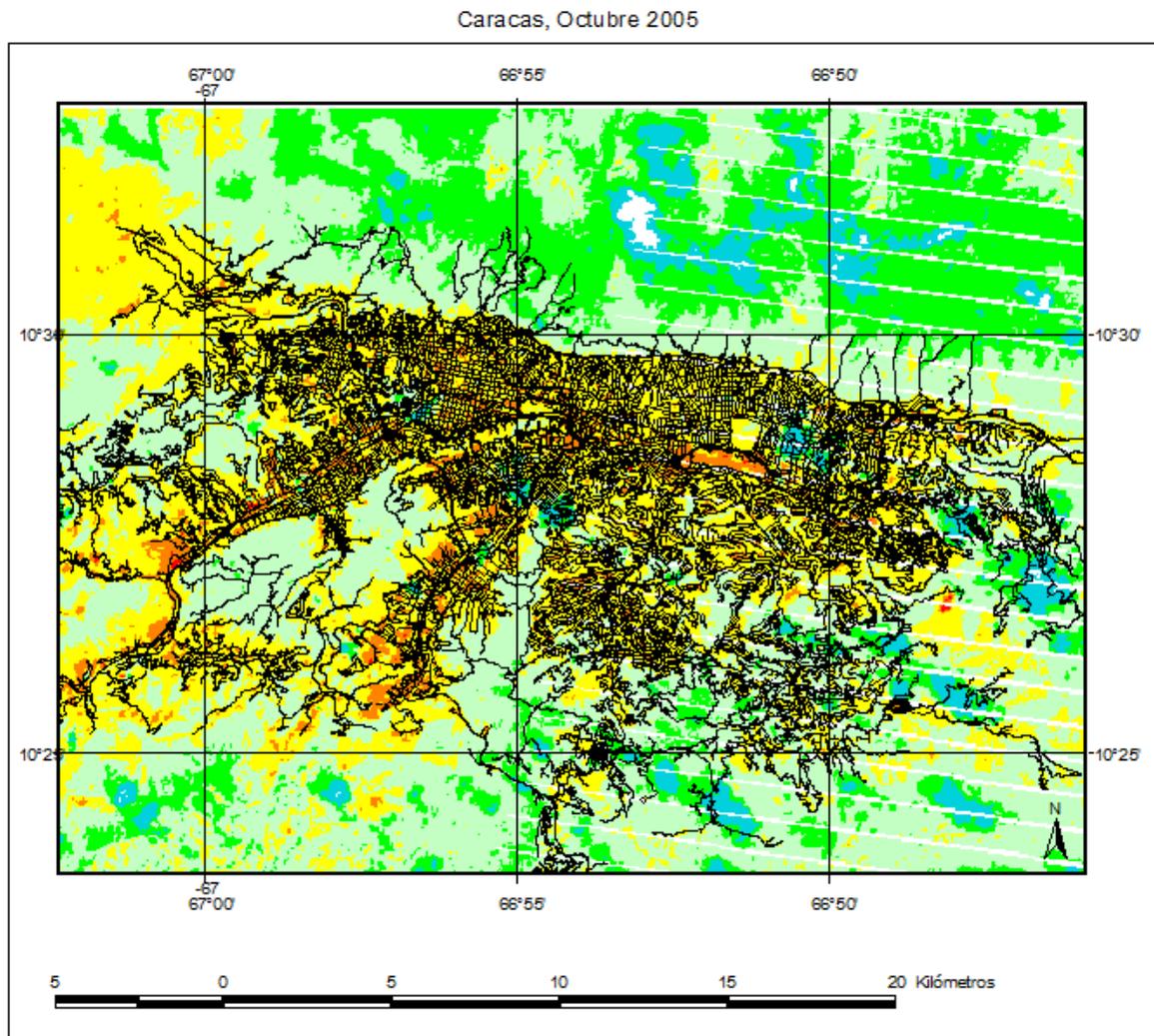
LEYENDA
Temperatura superficial °C

13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 12

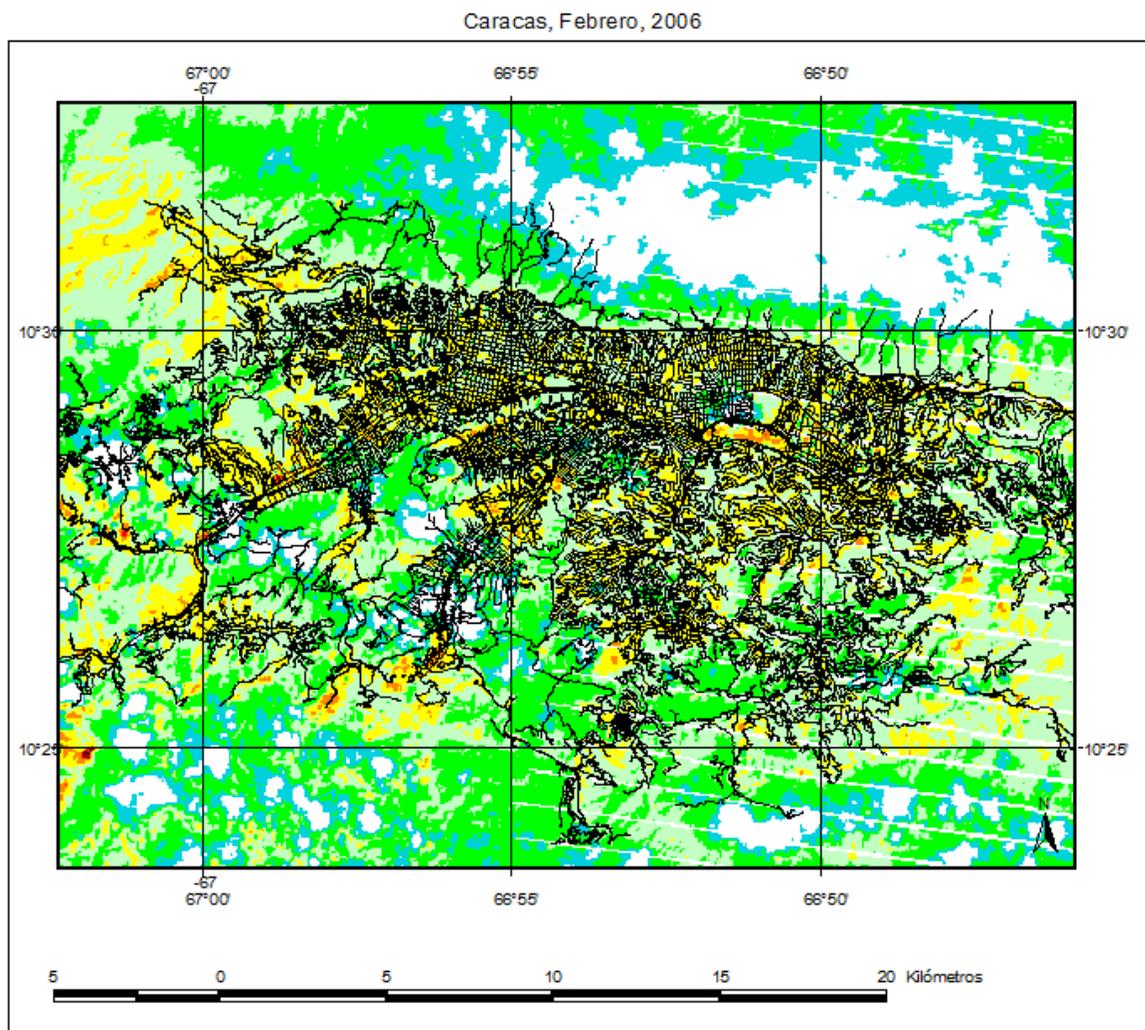
LEYENDA
Temperatura superficial °C

7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVS8,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBACA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 13

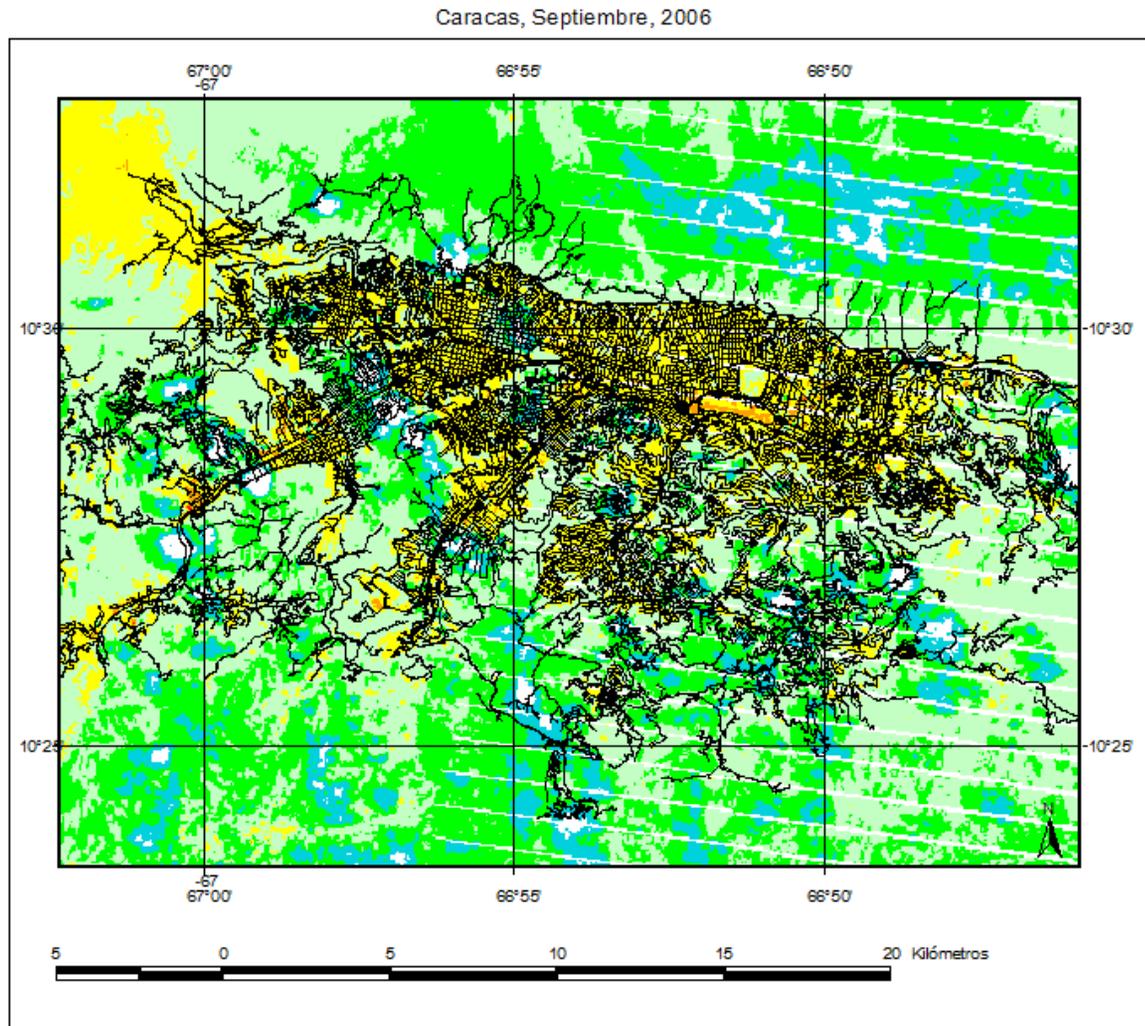
LEYENDA
Temperatura superficial °C

7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF. a KARENIA.CORDOVA.SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA.HELENA.HOBAICA

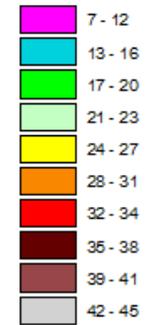


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 14

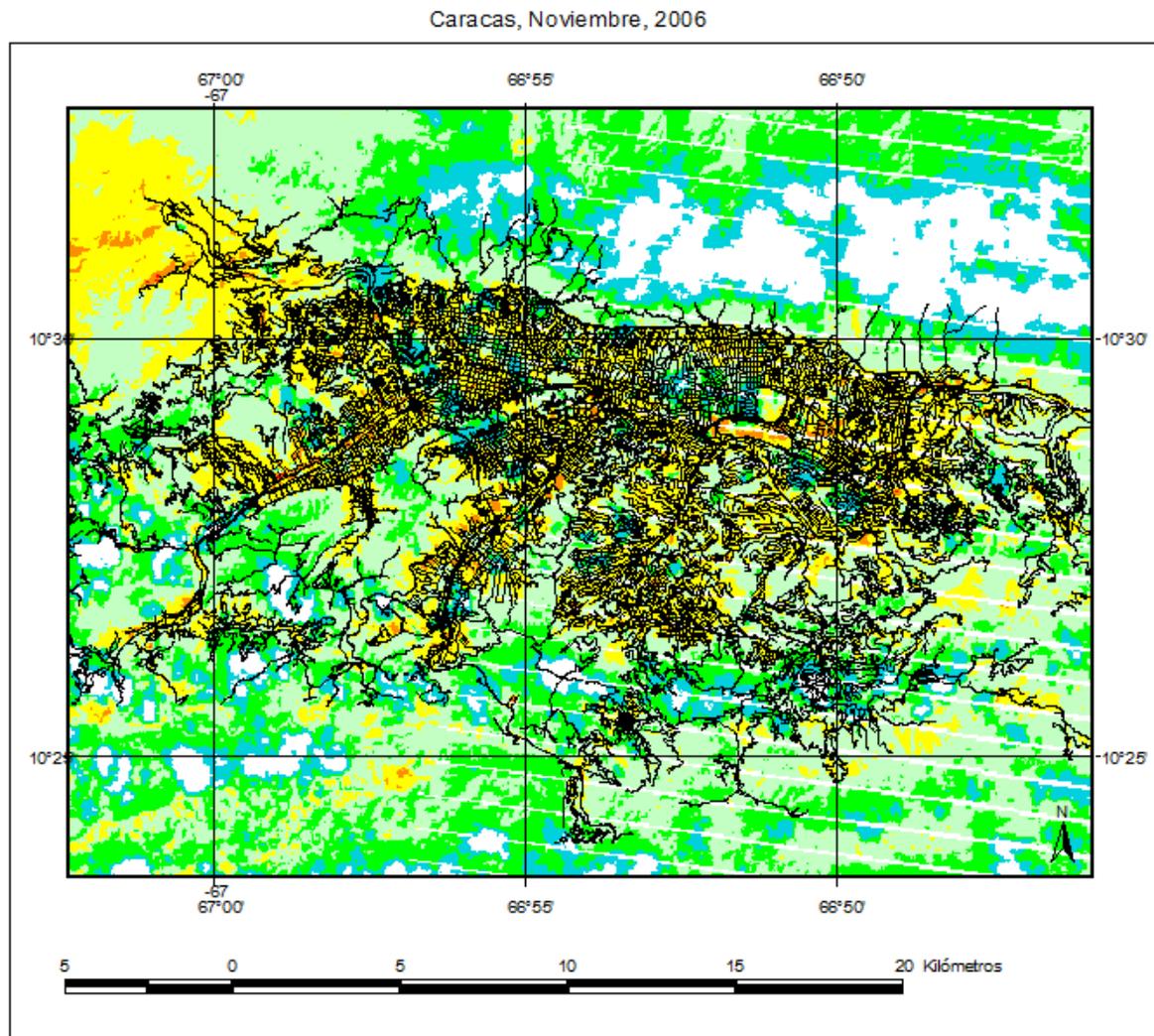
LEYENDA
Temperatura superficial °C



Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 15

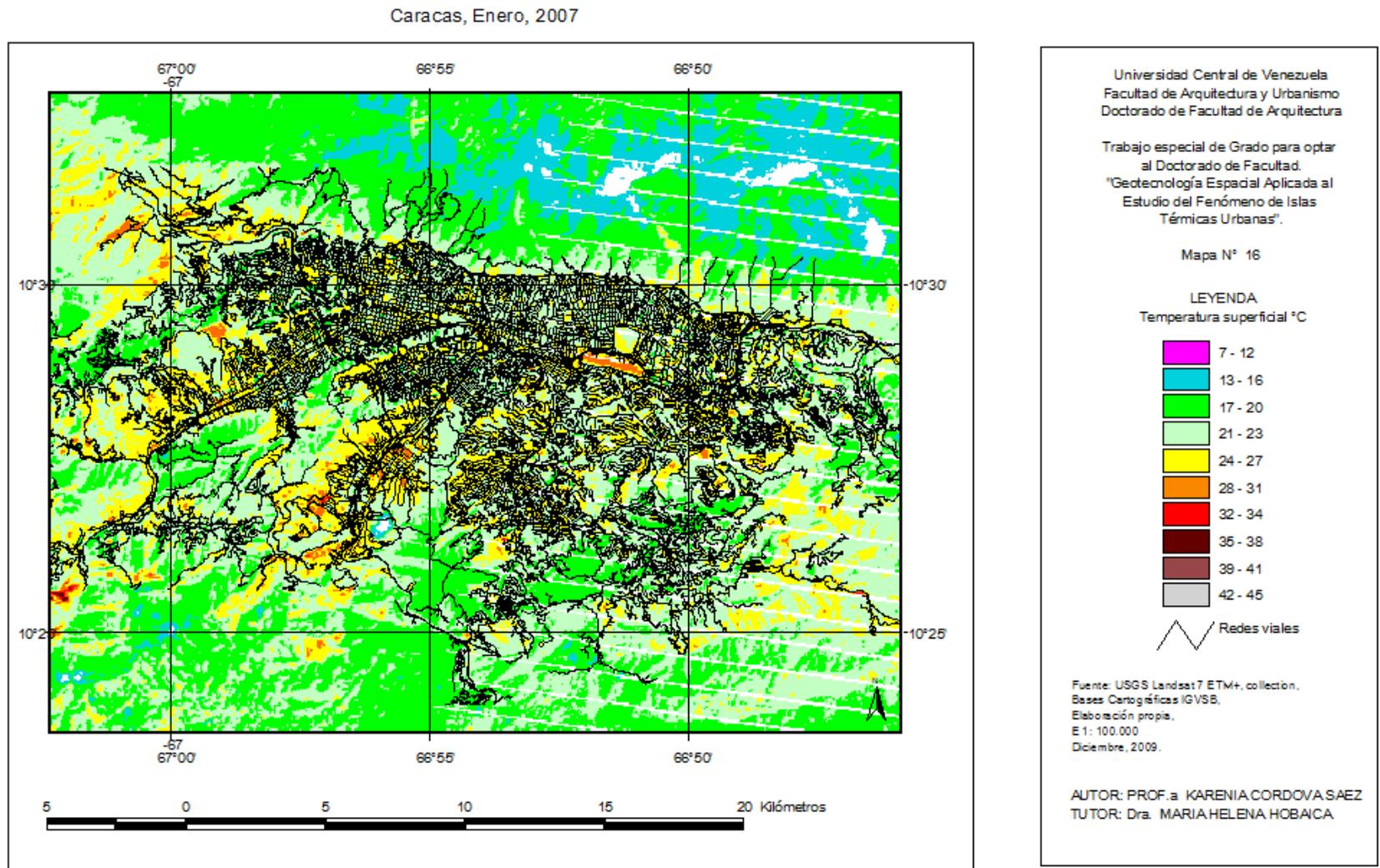
LEYENDA
Temperatura superficial °C

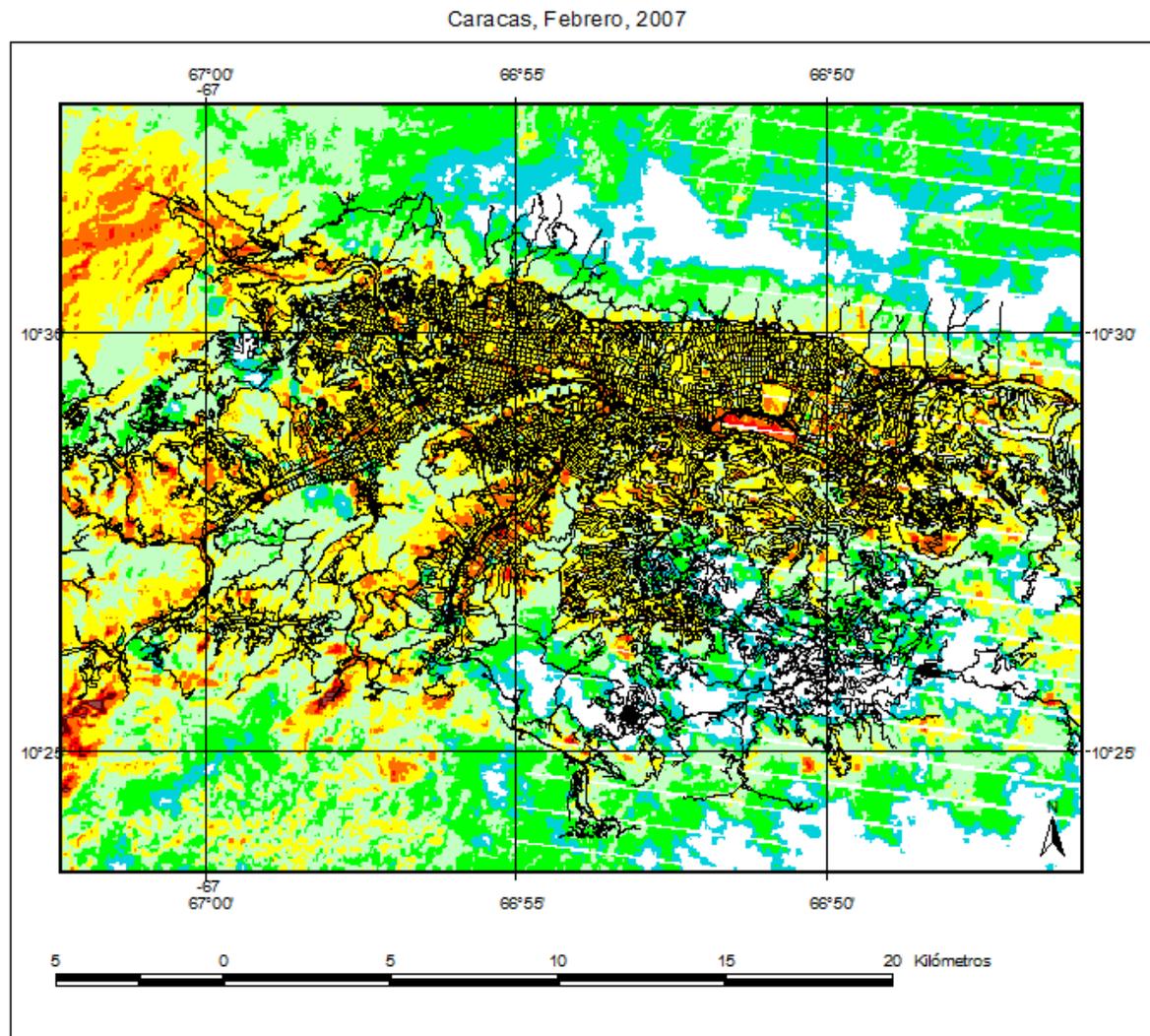
7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVS8,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.a KARENIA.CORDOVA.SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA.HELENA.HOBAICA



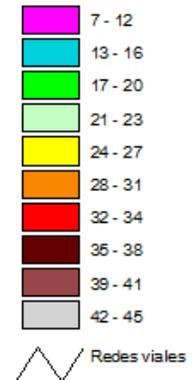


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

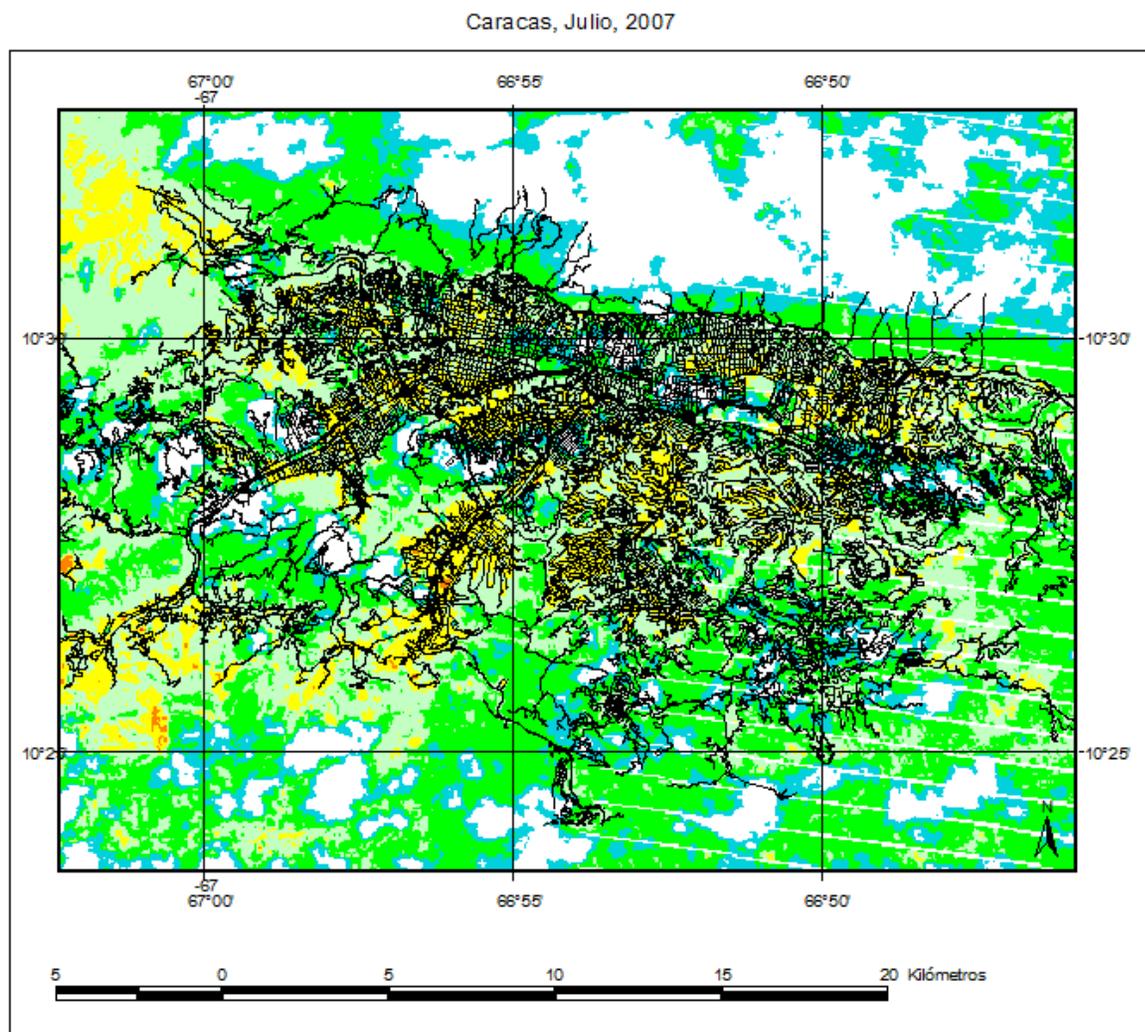
Mapa N° 17

LEYENDA
Temperatura superficial °C



Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 18

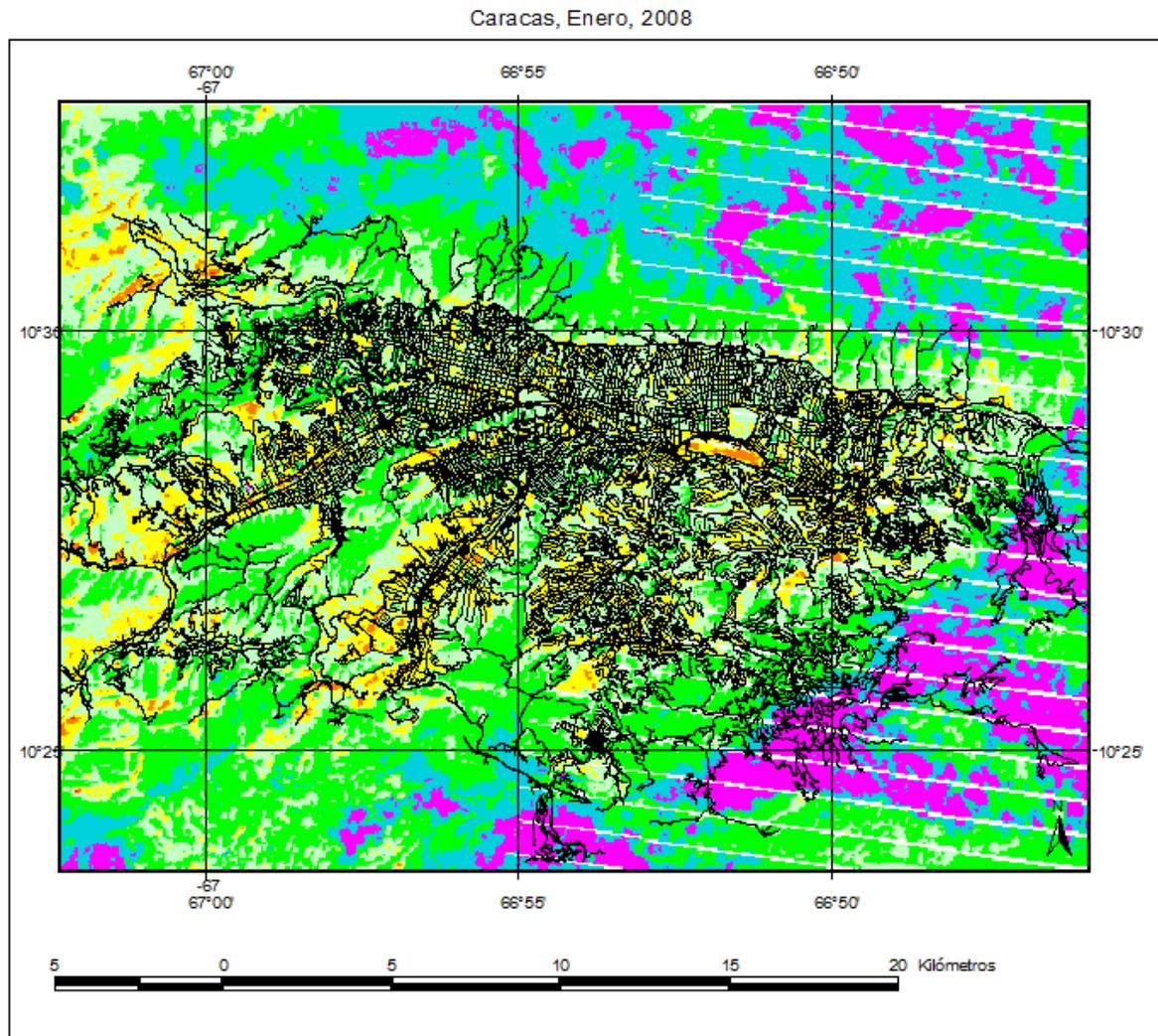
LEYENDA
Temperatura superficial °C

7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 19

LEYENDA
Temperatura superficial °C

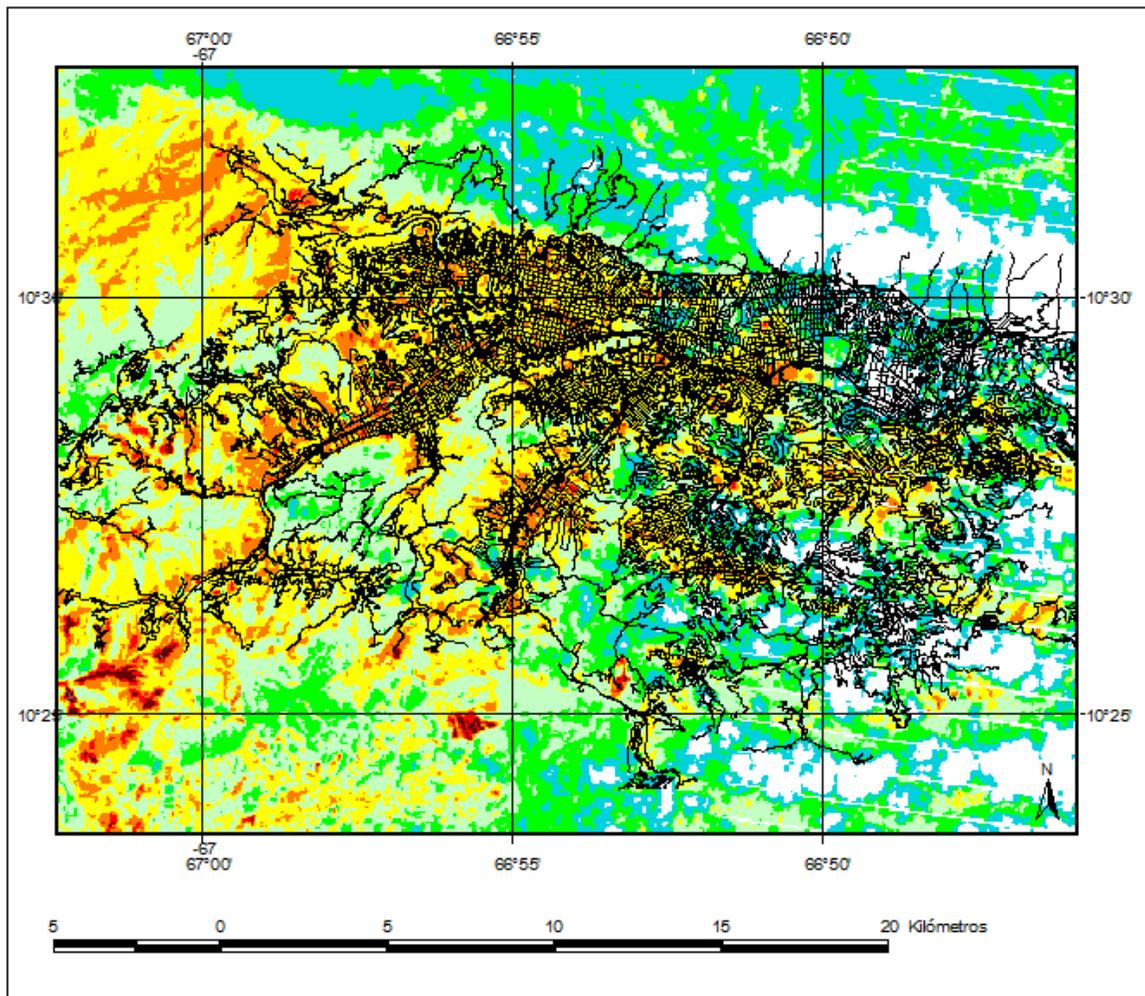
7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia.
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.^a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA

Caracas, Marzo, 2008

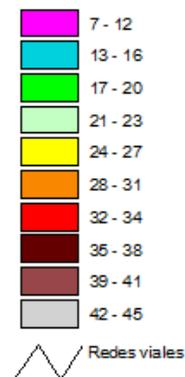


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 20

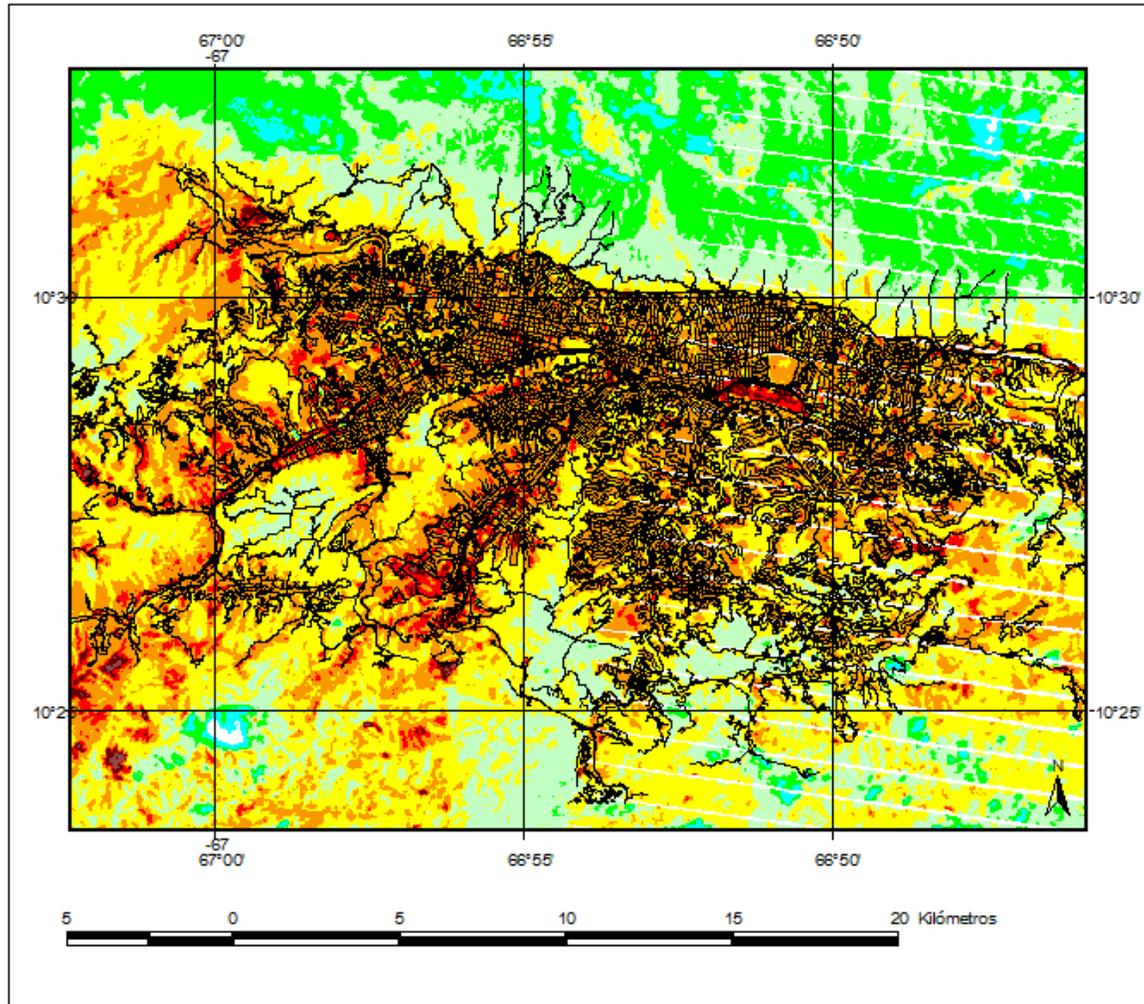
LEYENDA
Temperatura superficial °C



Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia.
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA

Caracas, Abril, 2009

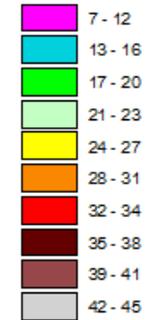


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 21

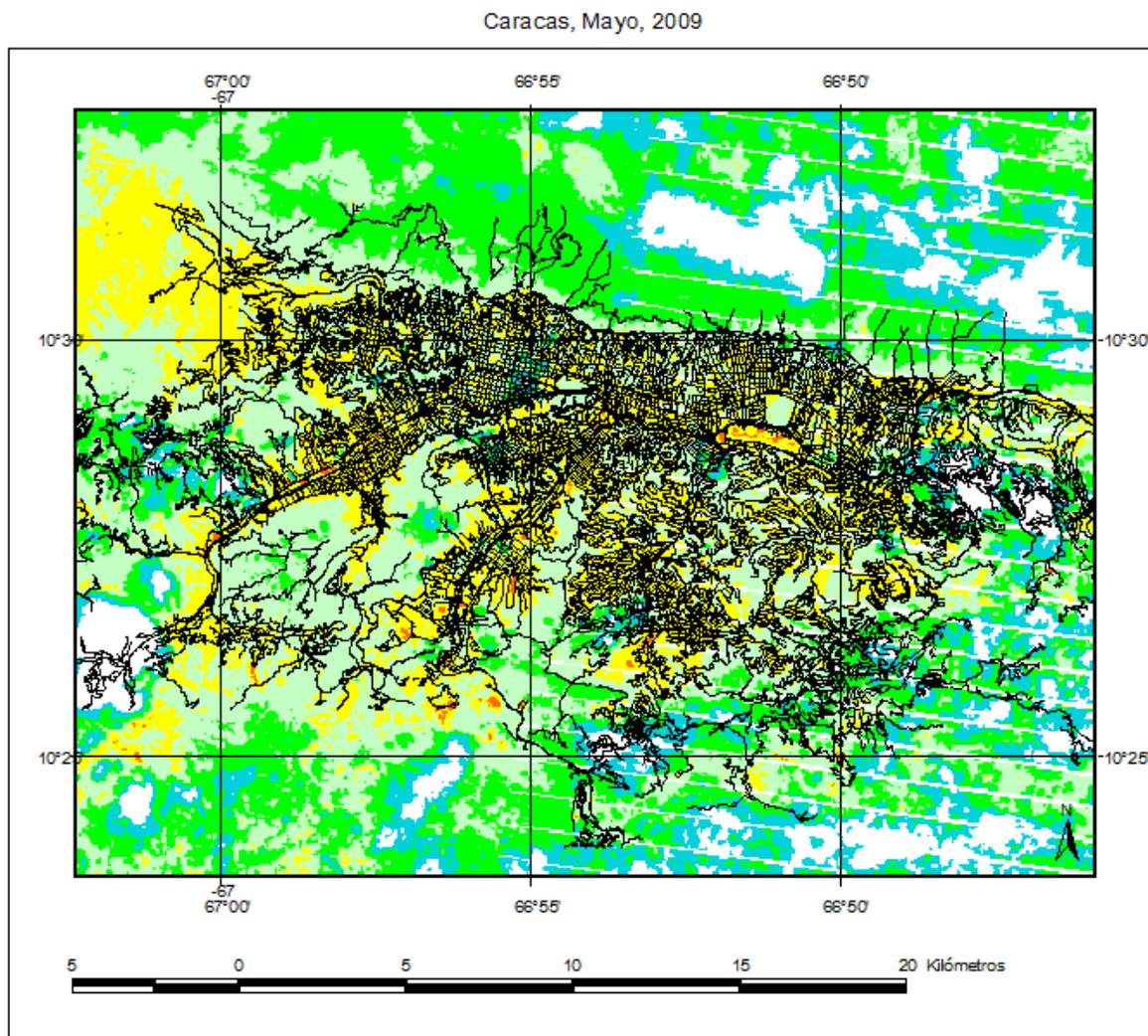
LEYENDA
Temperatura superficial °C



Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVS8,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 22

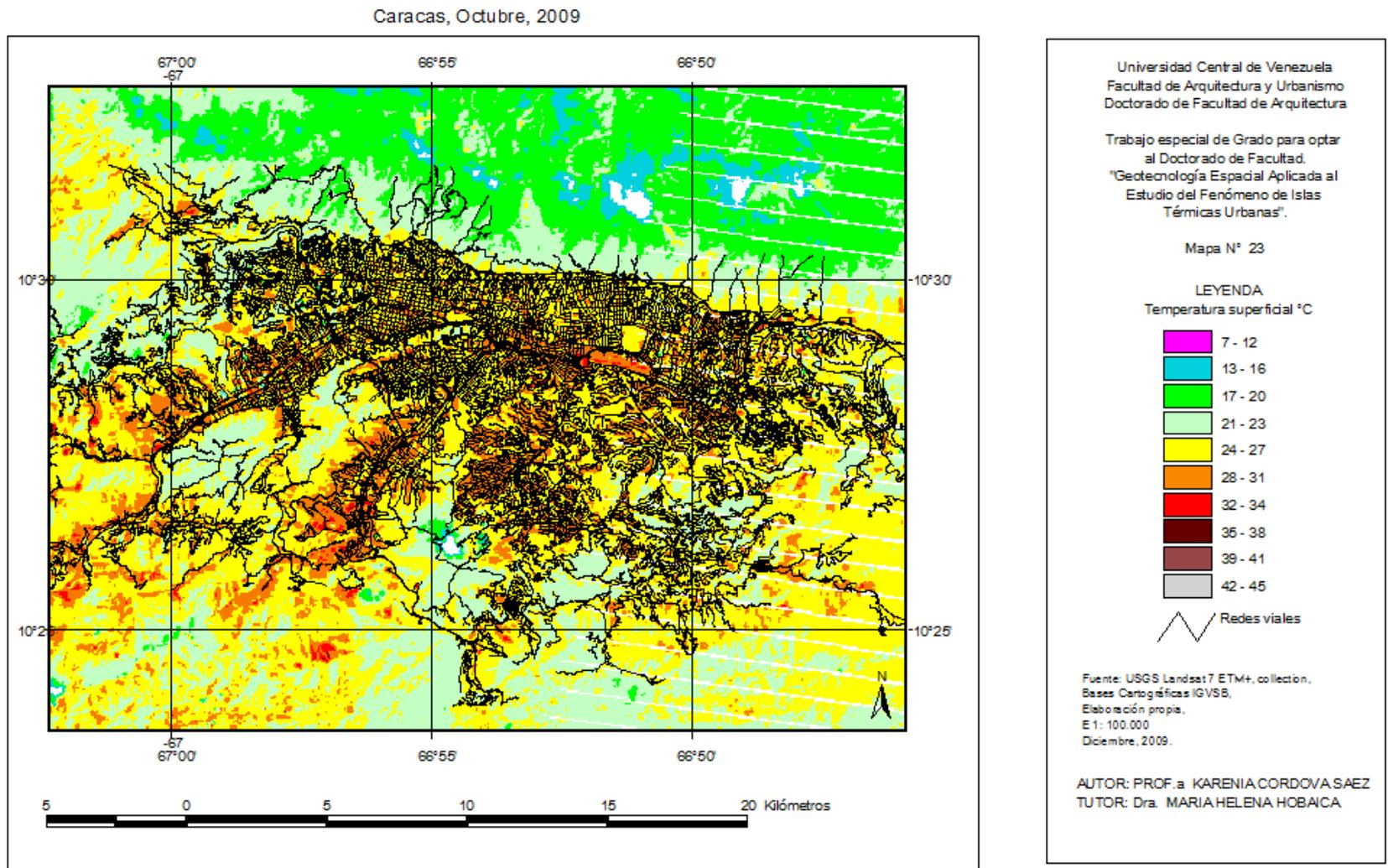
LEYENDA
Temperatura superficial °C

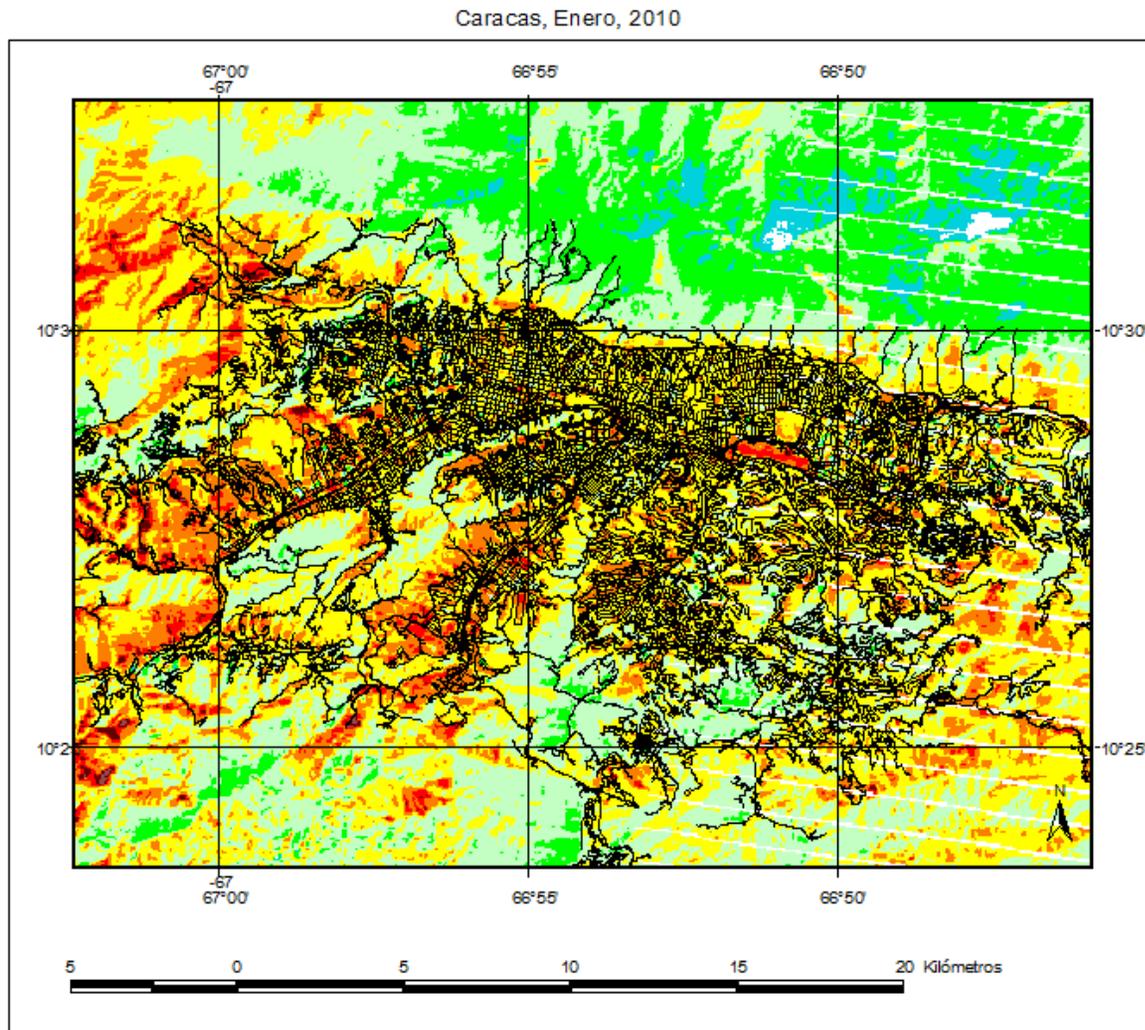
7 - 12
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVS8,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2009.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



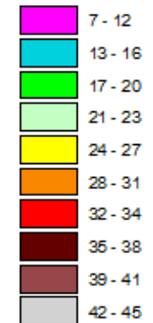


Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 24

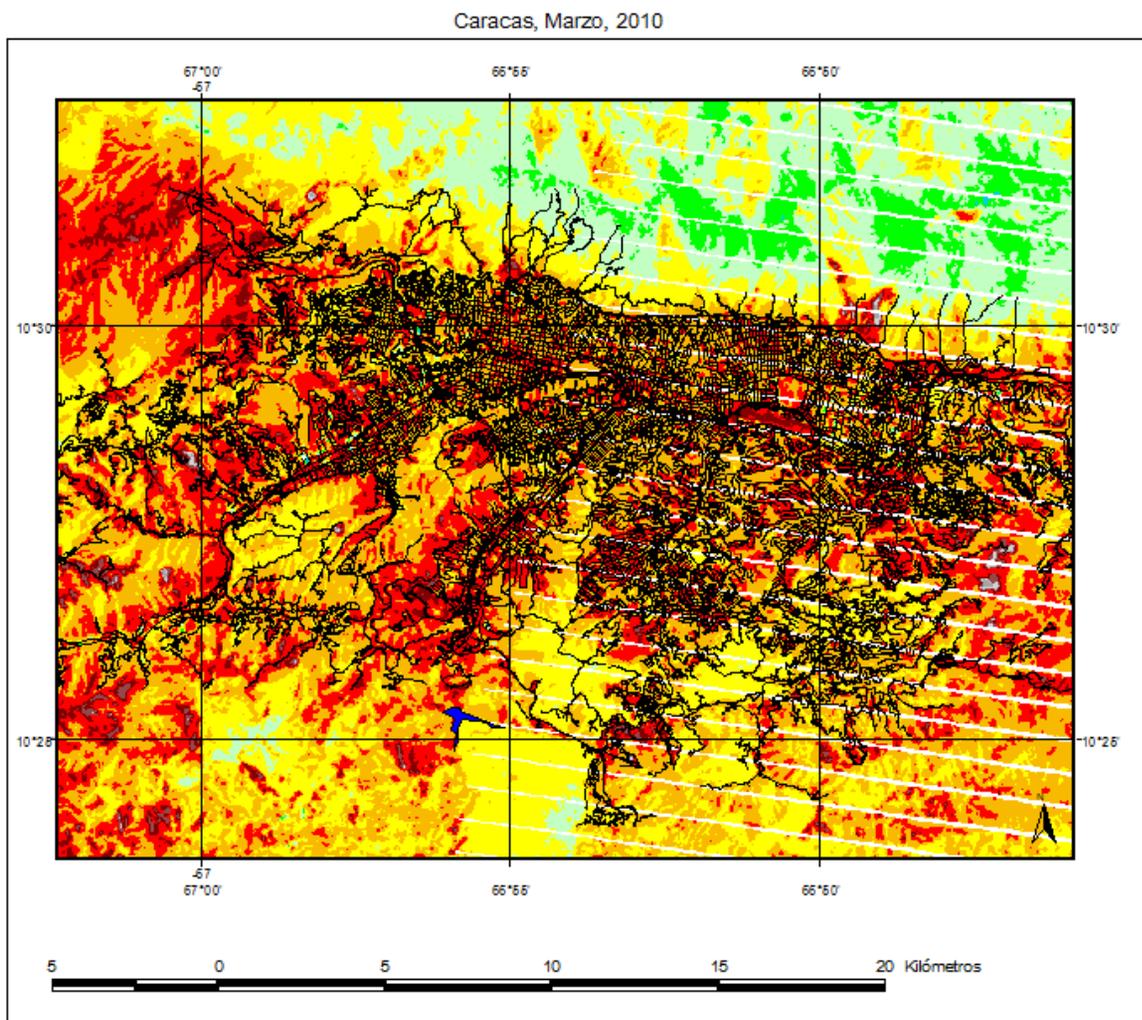
LEYENDA
Temperatura superficial °C



Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Marzo, 2010.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



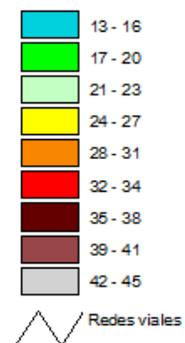
Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.

"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

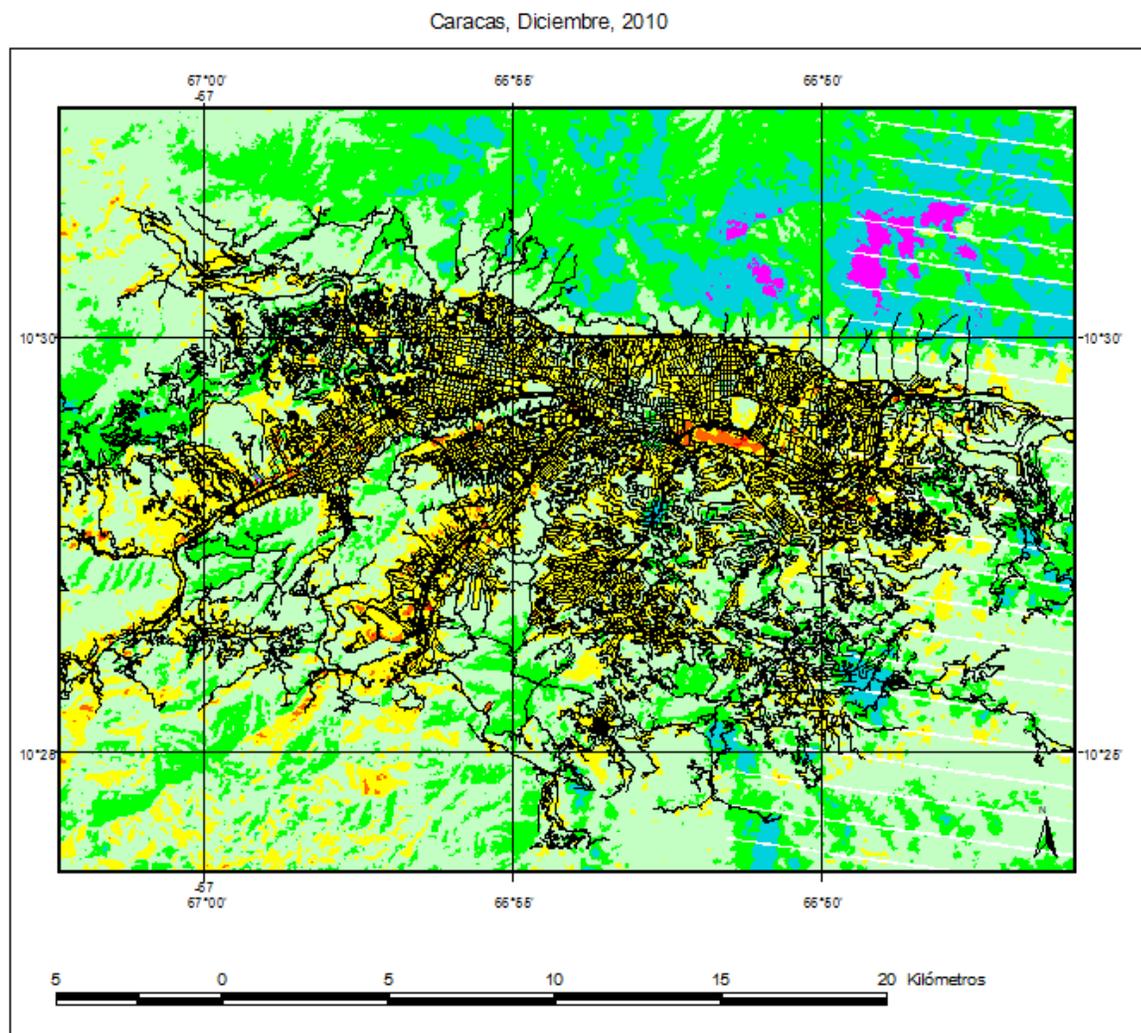
Mapa N° 25

LEYENDA
Temperatura superficial °C



Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, collection,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Marzo, 2010.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 26

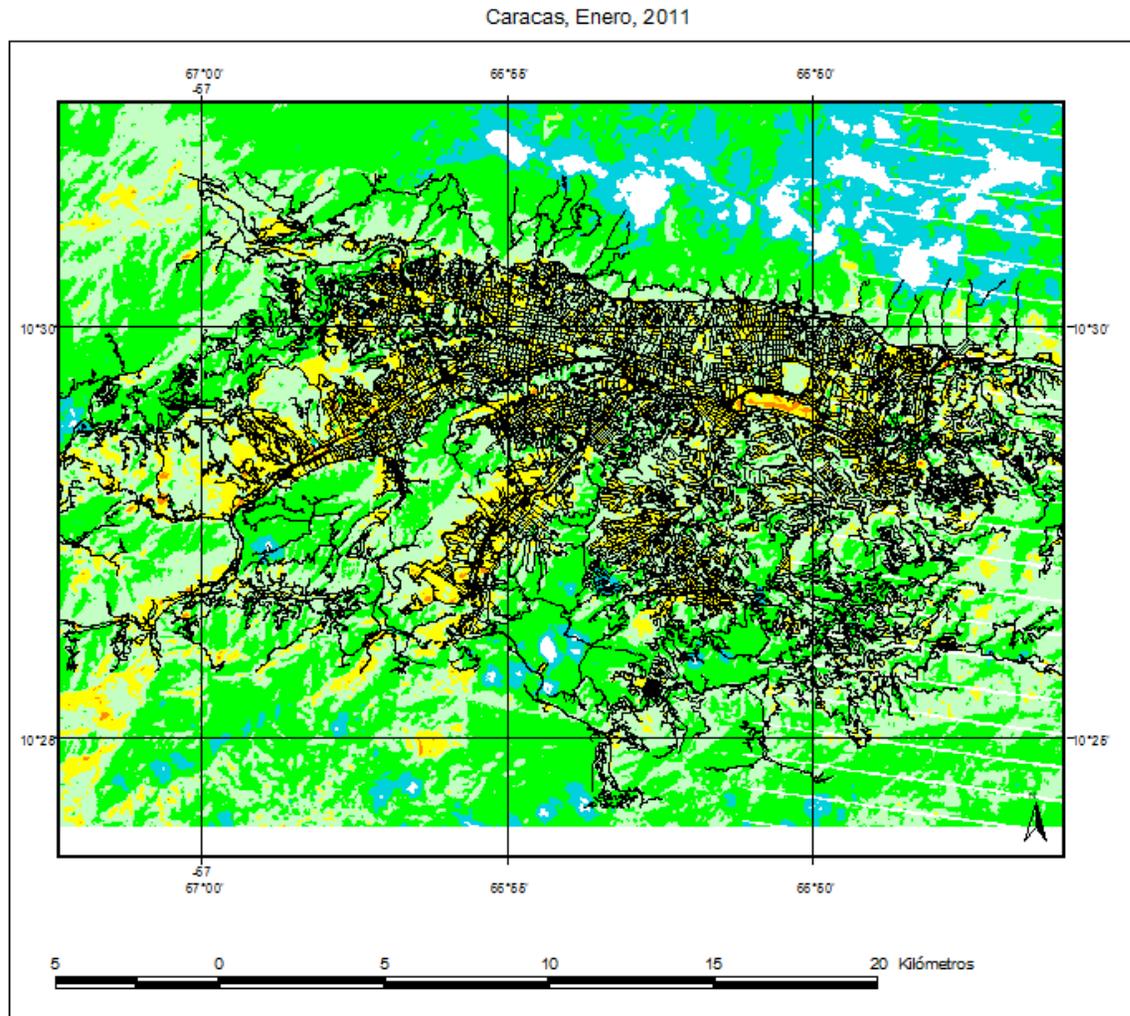
LEYENDA
Temperatura superficial °C

13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Diciembre, 2010.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 27

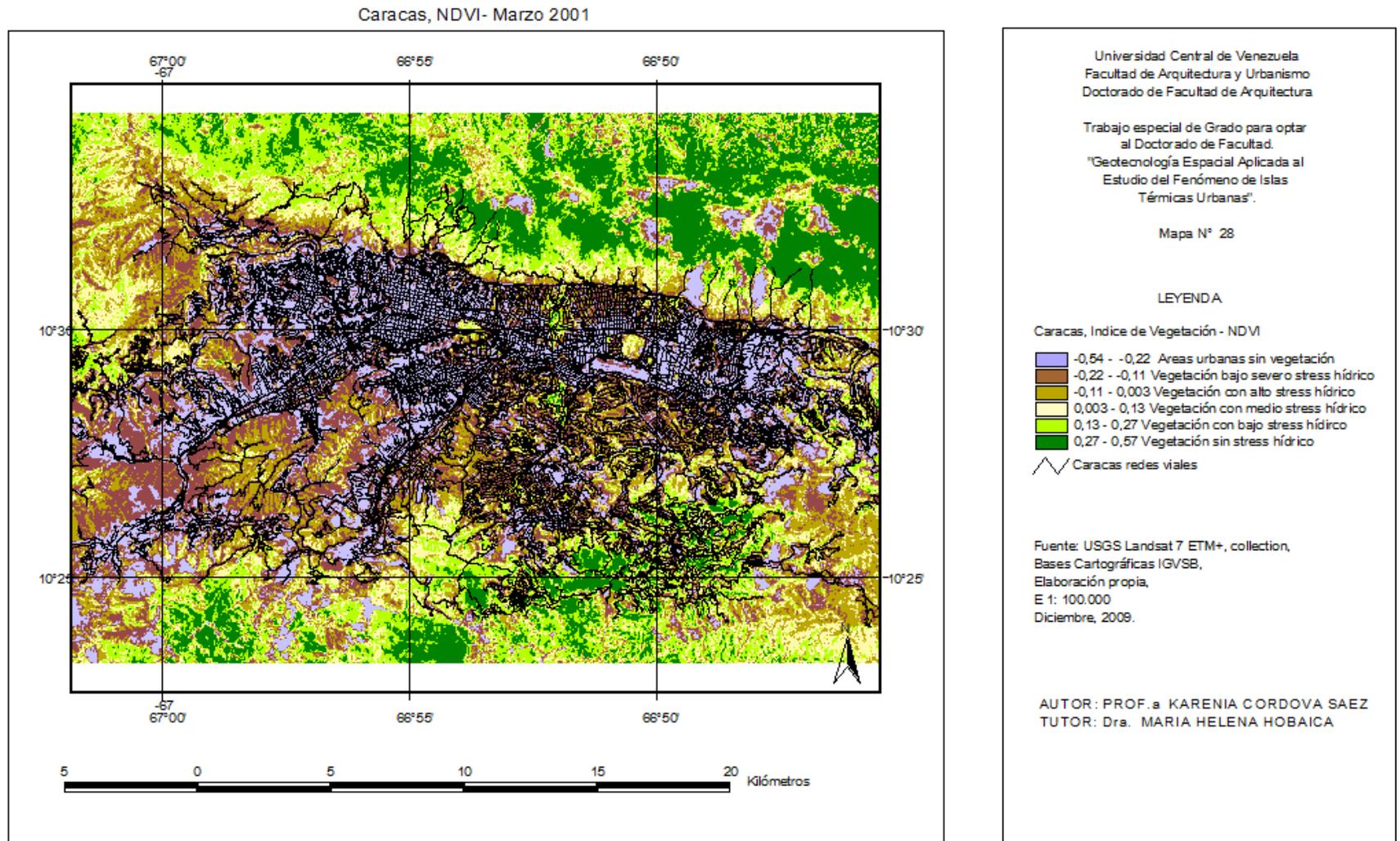
LEYENDA
Temperatura superficial °C

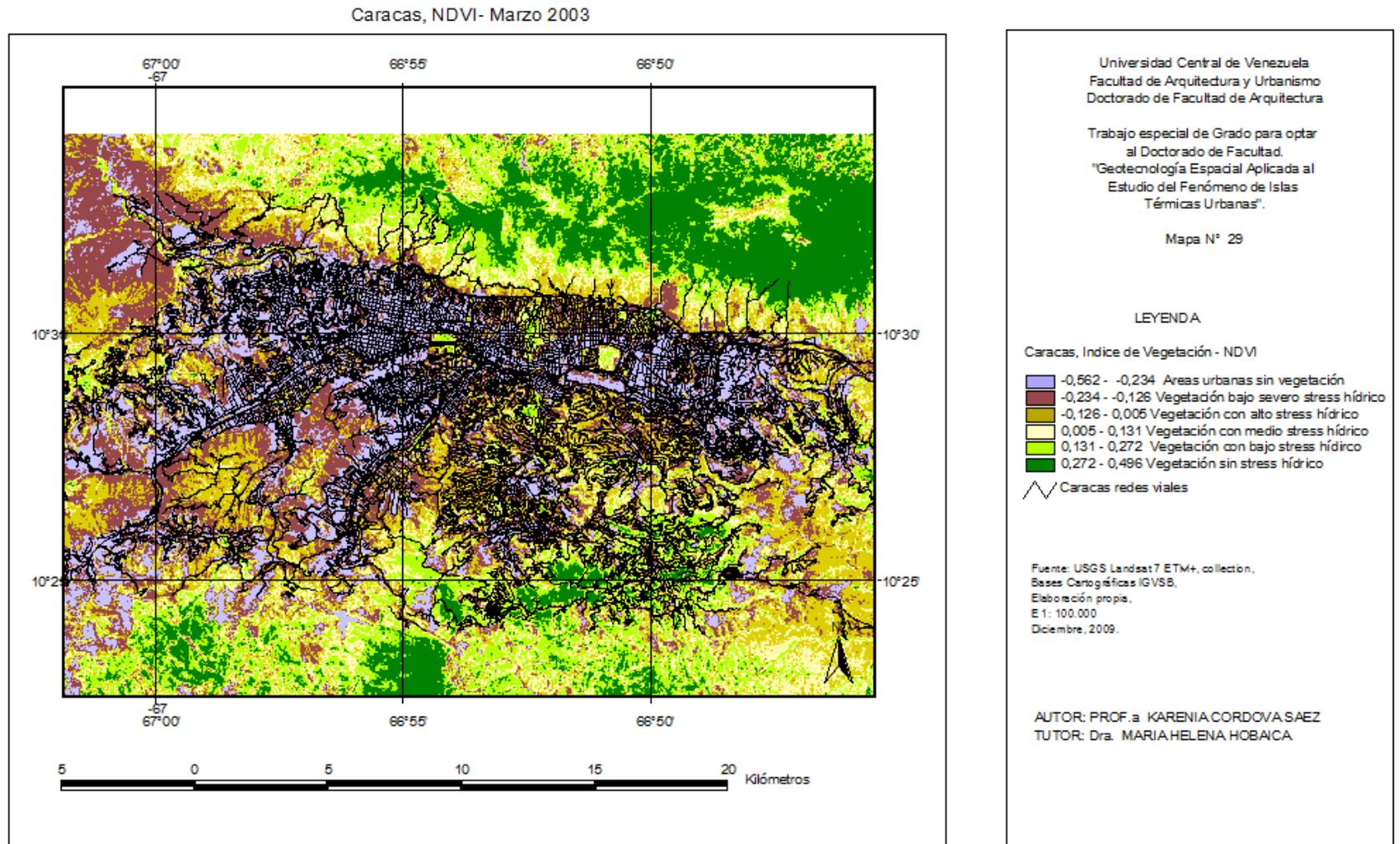
13 - 16
17 - 20
21 - 23
24 - 27
28 - 31
32 - 34
35 - 38
39 - 41
42 - 45

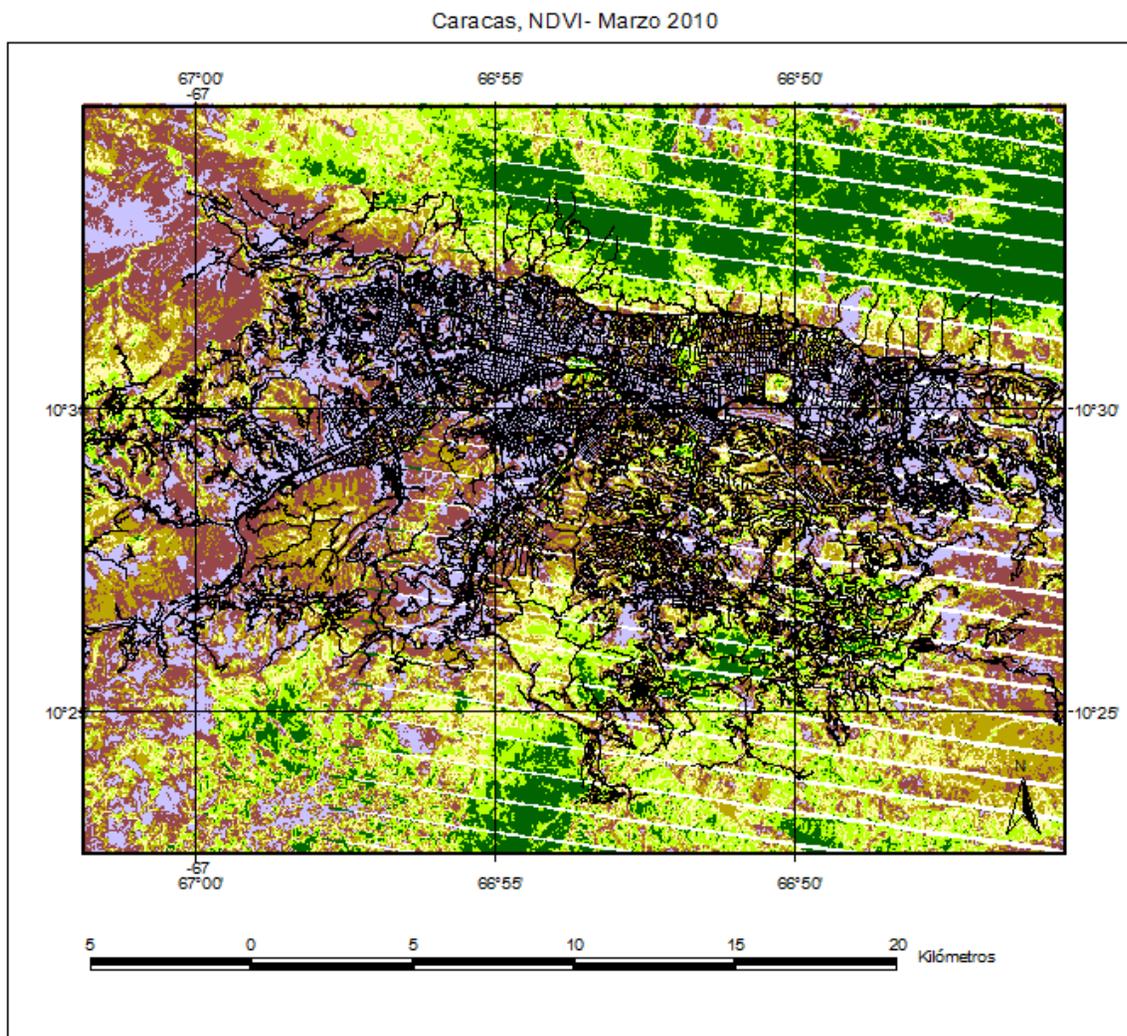
Redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVS, B,
Elaboración propia,
E 1: 100.000
Enero, 2011.

AUTOR: PROF.ª KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA







Universidad Central de Venezuela
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Doctorado de Facultad de Arquitectura

Trabajo especial de Grado para optar
al Doctorado de Facultad.
"Geotecnología Espacial Aplicada al
Estudio del Fenómeno de Islas
Térmicas Urbanas".

Mapa N° 30

LEYENDA

Índice de Vegetación - NDVI

- 0,511 - -0,214 Áreas urbanas sin vegetación
- 0,214 - -0,078 Vegetación bajo severo stress hídrico
- 0,078 - 0,075 Vegetación con alto stress hídrico
- 0,075 - 0,253 Vegetación con medio stress hídrico
- 0,253 - 0,608 Vegetación con bajo stress hídrico
- 0,608 - 1 Vegetación sin stress hídrico

Caracas redes viales

Fuente: USGS Landsat 7 ETM+, colección,
Bases Cartográficas IGVSB,
Elaboración propia,
E1: 100.000
Diciembre, 2010.

AUTOR: PROF.a KARENIA CORDOVA SAEZ
TUTOR: Dra. MARIA HELENA HOBAICA

