

ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL EN EL VALLE DE ABURRÁ MEDIANTE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Santiago Trujillo Uribe

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

Dr.-Ing. Engelberth Soto Estrada



ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

**ENVIGADO
2012**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PRELIMINARES.....	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Objetivos del proyecto	11
1.2.1 Objetivo General.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
1.3 Marco de referencia.....	12
1.4 Hipótesis.....	24
2. METODOLOGÍA.....	25
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	27
3.1 Obtención y selección de la información satelital.....	27
3.2 Ajuste de la información	30
3.3 Selección del método para estimar la temperatura superficial	35
3.4 Estimación de la temperatura superficial (TS) del valle de Aburrá	38
3.5 Cálculo de la intensidad de la vegetación.....	41
3.6 Análisis de correlación.....	44
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
4.1 Estimación de la TS.....	46
4.2 Estimación del NDVI.....	48
4.3 Correlación entre la intensidad de la vegetación y la TS.....	49
4.4 Estimación del índice de isla de calor superficial para el Valle de Aburrá	52

4.5	Comparación entre comunas.....	54
4.6	Observaciones puntuales	57
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	61
6.	TRABAJOS CITADOS.....	69

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características básicas de las islas de calor superficiales y atmosféricas (EPA, 2011)	15
Tabla 2. Estimaciones del fenómeno isla de calor en algunas ciudades del mundo (Memon, Leung, & Liu, 2009).....	18
Tabla 3. Características de los sensores multiespectrales satélites Landsat (NASA, 2007)	22
Tabla 4 Resolución en metros de cada longitud de onda en los satélites Landsat (NASA, 2007)	22
Tabla 5. Criterios de selección de imágenes satelitales.....	27
Tabla 6. Imágenes Landsat identificadas para el área de estudio.....	28
Tabla 7. Imágenes elegidas.....	28
Tabla 8. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5 y 7 (NASA, 2007)	36
Tabla 9. Parámetros Landsat 5 (Chander, 2008).....	37
Tabla 10. Parámetros Landsat 7 (NASA, 2007).....	37
Tabla 11. Correlación NDVI y TS.....	45
Tabla 12 Temperaturas estimadas para el Valle de Aburrá en °C.....	46
Tabla 13. NDVI promedio 1986-2010 valle de Aburrá.....	49
Tabla 14 Correlación NDVI y TS 2010 sin nubes.....	51
Tabla 15 Índice de isla de calor urbano Valle de Aburrá	52
Tabla 16 UHII 2010 sin nubes.....	52
Tabla 17. Comparación entre la comuna El Poblado y Robledo NDVI vs TS	54
Tabla 18. Observación de puntos específicos en el valle de Aburrá	60

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Ilustración 1. Modelo del efecto isla de calor (EPA, 2011)	10
Ilustración 2. Superficies duras vs. Superficies blandas (EPA, 2011).....	13
Ilustración 3. Energía solar que alcanza la superficie terrestre (Longitud de onda vs Intensidad solar normalizada) (EPA, 2011).....	14
Ilustración 4. Capas atmosféricas urbanas (Eixo Atlántico, 2008).....	15
Ilustración 5. Imagen térmica que ilustra el fenómeno de isla de calor superficial (EPA, 2011)	16
Ilustración 6. Temperaturas superficiales y atmosféricas durante el día y la noche dependiendo de las superficies que están presentes (EPA, 2011)	17
Ilustración 7. Incremento en el consumo energético con el incremento en la temperatura (EPA, 2011).....	19
Ilustración 8. Espectro Electromagnético (Teledet, 2011)	21
Ilustración 9. Absorción de la luz en la vegetación (Ilustración por Robert Simmon) (NASA, 2010)	23
Ilustración 10. Representación del NDVI de todo el planeta (NASA, 2003).....	24
Ilustración 11. Diagrama de flujo de la metodología.....	26
Ilustración 12. Banda térmica (banda 6) de las imágenes satelitales seleccionadas.....	29
Ilustración 13. Daño en el SLC del Landsat 7 (USGS, 2010)	31
Ilustración 14. Segmentos de imágenes sin información del Landsat 7	31
Ilustración 15. Diagrama de flujo de la herramienta GapFill (Bustillos, 2012).....	32
Ilustración 16. Zona de estudio	33
Ilustración 17. Imágenes térmicas ajustadas al área de estudio	34
Ilustración 18. Diagrama de flujo para la estimación de la TS.....	39
Ilustración 19. Temperatura superficial del valle de Aburrá 1986-2010.....	40
Ilustración 20. Procedimiento para la obtención del NDVI en ERDAS.....	42

Ilustración 21. NDVI 1986-2010 valle de Aburrá	43
Ilustración 22. Representación del ZCIT (Estrada, 2010).....	47
Ilustración 23. Precipitación mensual valle de Aburrá 2008 (Estrada, 2010).....	48
Ilustración 24. Imágenes con nubes y sin nubes.....	50
Ilustración 25. TS 2010 Valle de Aburrá sin nubes.....	51
Ilustración 26. TS urbana vs rural para el año 2004 en el valle de Aburrá	53
Ilustración 27. NDVI vs TS para el barrio Robledo	55
Ilustración 28. NDVI vs TS barrio El Poblado.....	56
Ilustración 29. Zonas identificadas del valle de Aburrá 2010.....	57
Ilustración 30. El estadio Atanasio Girardot con una TS promedio de 21.8°C (Pineda)....	58
Ilustración 31. El parque Norte y el Jardín Botánico de Medellín, con una TS promedio de 23.2°C (Vidal)	58
Ilustración 32. Cerros El Volador y Nutibara con una TS promedio de 23.8°C y 23.2°C respectivamente (Vidal)	58
Ilustración 33. Zona industrial del Barrio Colombia con una TS promedio de 34.9°C (Vidal)	59
Ilustración 34. Zona industrial de la autopista y el municipio de Itagüí con una TS promedio de 34.5°C (Google, 2010)	59
Ilustración 35. Techo verde: dotación de sombra y evapotranspiración (EPA, 2011).....	63
Ilustración 36. Imagen térmica comparando un techo verde y uno común (EPA, 2011)	64
Ilustración 37. Ubicación de los árboles para mitigar la isla de calor (EPA, 2011).....	65
Ilustración 38. Emisividad y reflectancia de los diferentes tipos de techo (EPA, 2011)	67

RESUMEN

El fenómeno de isla de calor urbana tiene grandes efectos sobre el microclima de las ciudades y conlleva a serios problemas como el aumento del consumo energético, la disminución de la calidad de vida y el incremento de enfermedades asociadas a factores climáticos. Para mitigar la isla de calor se conocen gran variedad de estrategias, pero para poder aplicarlas antes se debe conocer la magnitud del problema.

En esta investigación se examina el fenómeno de isla de calor en el valle de Aburrá, en donde desafortunadamente aún no se realizan estudios al respecto. Sin datos científicos que sustenten qué factores, como el agotamiento de la cobertura vegetal y el uso de materiales de construcción de baja reflectividad solar, influyen en el aumento del fenómeno de isla de calor, no se podrán respaldar estrategias que permitan mitigar este fenómeno.

Utilizando imágenes satelitales Landsat entre los años 1986 y 2010, se estimó la temperatura superficial (TS) del valle de Aburrá y sus zonas rurales cercanas. Luego de estimar la temperatura se calculó el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el cual es un indicador de la presencia de vegetación, con el fin de correlacionar estas dos variables y establecer la influencia de la vegetación en la temperatura superficial. Las estimaciones indicaron que el área urbana presenta una temperatura superior al área rural circundante, obteniéndose índices de isla de calor urbana (diferencia entre los promedios en ambas zonas) de entre los 5,53 °C y 8,18 °C para las fechas analizadas. Por otro lado, se obtuvieron correlaciones entre los -0,47 y -0,73, lo cual indica correlaciones inversas moderadas entre la vegetación y la temperatura superficial.

Este trabajo permitió concluir que el fenómeno de isla de calor es representativo en el área urbana del valle de Aburrá, por lo que deben planificarse estrategias para su reducción y control. Es necesario continuar este estudio para poder realizar predicciones sobre el aumento de la temperatura que se podrá originar con el crecimiento del área urbana.

Palabras clave: percepción remota, Landsat, isla de calor, temperatura superficial, NDVI

ABSTRACT

The urban heat island phenomenon has great effects over cities microclimate, which leads to serious problems such as increase in energy consumption, life quality diminishing and an increment in disease related to climate factors. To mitigate the heat island effects there are series of strategies, but to be able to apply them the magnitude of the problem must be known first.

This investigation examines the urban heat island phenomenon in El Valle de Aburrá, where unfortunately no related studies have been done. Without the scientific data to support that factors such as vegetation depletion or the use of low solar reflective material have influenced in the increase of the heat island phenomenon, strategies to mitigate this phenomenon cannot be taken into account.

Using Landsat satellite images, the surface temperature (ST) of El Valle de Aburrá and its closer rural areas was estimated. After estimating the temperature, the NDVI index was calculated, which is an indicator of vegetation presence with the idea of correlating these two variables in order to know how much influence vegetation had on surface temperature.

The results immediately showed that the temperature in the urban area is considerably higher than that of the closer rural area. The UHI (Urban Heat Island Index) varied between 5,53 °C and 8,18 °C over the period of time analyzed. On the other hand, the correlations obtained were in between -0,47 and -0.73, that indicates a moderate inverse relationship between vegetation and surface temperature.

The study concludes that the urban heat island phenomenon is representative in the urban area located in the Aburra Valley, for which strategies to control or reduce its effects must be planned. It's necessary to continue further studies to be able to make predictions about how the surface temperature might increase due to urban growth.

Key words: Remote sensing, Landsat, heat island, surface temperature, NDVI

INTRODUCCIÓN

El fenómeno isla de calor se refiere al exceso de calor que se presenta en la atmósfera urbana y/o sus superficies, en comparación con las zonas rurales circundantes no urbanizadas (Stathopoulou & Cartalis, 2006).

La temperatura superficial puede estimarse mediante técnicas de percepción remota. La percepción remota hace referencia a la obtención de información sin tener contacto físico con el cuerpo que se analiza (Teledet, 2011). En este estudio se utilizó la información obtenida por los satélites Landsat 5 y 7, los cuales tienen la capacidad de obtener información térmica de la superficie de la Tierra. Los satélites Landsat son satélites operados por la NASA y el USGS (United States Geological Survey), que a partir de 1972 están recolectando información de la Tierra desde el espacio (NASA, 2012).

Este estudio se centró en estimar la magnitud de la isla de calor superficial en el área metropolitana del valle de Aburrá por medio de técnicas de percepción remota. Se utilizaron cuatro (4) imágenes satelitales Landsat distribuidas en el periodo 1986-2010. Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación entre la temperatura superficial y la intensidad de la vegetación para establecer la influencia de ésta en la temperatura superficial.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aumento de superficies duras urbanas tiene grandes impactos sobre el medio ambiente, no sólo paisajísticos sino también microclimáticos.

La alteración del clima y del microclima (es decir, el clima de un área localizada) se conoce como efecto de isla de calor. Este fenómeno es generado por las superficies artificiales que componen las calles, los andenes, los edificios, los techos, etc. y se manifiesta en un aumento de temperatura en comparación con las áreas circundantes con mayor cobertura vegetal (basado en Oke, 1982).

El fenómeno isla de calor depende de factores como la latitud, la altura sobre el nivel del mar, la topografía, el tamaño de la ciudad (Wienert & Kuttler, 2005) y la estabilidad atmosférica (Tomlinson, et al., 2010). Este efecto se potencializa en países tropicales (Oke T. R., 1982). La Ilustración 1 esquematiza la distribución del efecto de la isla de calor dependiendo del tipo de cobertura superficial predominante.

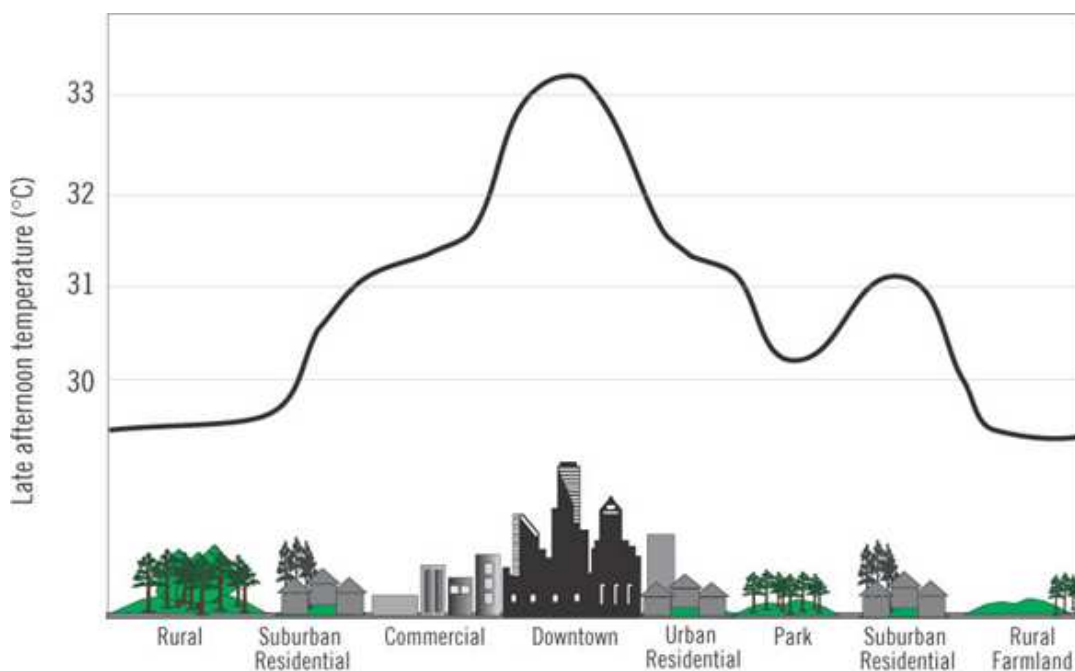


Ilustración 1. Modelo del efecto isla de calor (EPA, 2011)

El efecto isla de calor aumenta el consumo energético (Konopacki & Akbari, 2002), lo que incrementa la concentración de ozono a nivel superficial (Rosenfeld, et al., 1998) e inclusive la tasa de mortalidad debido al alza en las temperaturas (Christen & Voogt, 2004).

El valle de Aburrá no es ajeno a este efecto. Aquellos que han vivido en la región durante las últimas décadas han notado un cambio en la temperatura de la ciudad, tal y como lo muestran los datos del científico Germán Poveda, que indican que la temperatura promedio de Medellín ha aumentado de 21 °C en 1964 a 23 °C en el 2005 (Gomez, 2008).

A pesar de esta evidencia, hacen falta estudios que demuestren la influencia del crecimiento urbano sobre la temperatura de la ciudad. Este trabajo intentó aportar al estudio de este fenómeno mediante el cálculo, como ya se mencionó, de la temperatura superficial utilizando imágenes satelitales.

Esta información puede ser útil para determinar zonas críticas que requieran intervenciones como techos verdes, corredores verdes, parques al interior de zonas urbanas, materiales de construcción sostenibles y/o pavimentos permeables.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Calcular la temperatura superficial en el área metropolitana del valle de Aburrá para establecer la influencia del crecimiento urbano en la temperatura superficial promedio, mediante el análisis de imágenes satelitales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar la información espacial más adecuada para realizar el cálculo de temperatura superficial mediante la búsqueda de imágenes Landsat en bases de datos gratuitas. Las imágenes deben estar comprendidas entre 1980 y 2012.
- Ajustar la información digital para homogeneizar los datos, utilizando los programas ArcGIS 10 y Erdas 9.1.
- Determinar el procedimiento para estimar la temperatura superficial a través del estudio de los documentos técnicos de las imágenes Landsat.
- Calcular la temperatura superficial en al menos cuatro momentos (repartidos a lo largo del periodo de estudio) para establecer el comportamiento de la temperatura superficial utilizando el procedimiento seleccionado.

- Analizar el comportamiento de la temperatura superficial frente al crecimiento del área urbana para establecer la relación entre estas variables y con ello establecer posibles tendencias.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

A. Fenómeno de isla de calor

La isla de calor (UHI, por sus siglas en inglés que quiere decir urban heat island) es un efecto resultante del desarrollo de las zonas urbanas donde calles, edificios y otro tipo de infraestructuras reemplazan zonas con vegetación o espacios abiertos. El fenómeno es atribuido a un gran número de factores como el uso materiales de baja reflectividad solar (asfalto y concreto), baja permeabilidad de las superficies, las cuales se secan con mayor facilidad que las superficies verdes, reducción en la transferencia de calor y fuentes antropogénicas de calor como los vehículos y la industria (Stathopoulou & Cartalis, 2006). Esta anomalía conlleva a que las zonas urbanas tengan una mayor temperatura que las áreas rurales circundantes.

Se estima que durante el día el promedio de temperatura anual en las ciudades densamente pobladas (>1 millón de habitantes) puede llegar a ser entre 1 y 3 °C más caliente que las zonas rurales que las rodean y en una noche calmada y despejada esta diferencia puede ser hasta de 12 °C (EPA, 2011).

B. Causas del efecto isla de calor

Las islas de calor urbanas son causadas por el desarrollo de los centros urbanos y los cambios en las propiedades térmicas e irradiancias de su infraestructura. Por ejemplo, los edificios altos disminuyen la velocidad a la cual las ciudades se enfrían en las noches. A diferencia del calentamiento global, las islas de calor son cambios climáticos locales y no globales ya que sus efectos se limitan a una escala mucho menor, pero los efectos de ambos fenómenos son similares ya que pueden inducir a un mayor consumo energético, afectar la salud y perjudicar los elementos ambientales de un lugar (EPA, 2011).

Para profundizar un poco más en la raíz del problema se mencionan varios factores que contribuyen a la formación de las islas de calor urbanas.

Reducción de la vegetación: los árboles y la vegetación proveen sombra que ayuda a mantener la temperatura superficial baja. Adicionalmente, por medio de un proceso llamado evapotranspiración, donde las plantas liberan vapor de agua al ambiente, regulan la temperatura del aire. Como consecuencia de la pérdida de cobertura vegetal y su sustitución por superficies impermeables como andenes, techos y vías el agua se dirige directamente a acueductos y alcantarillados evitando que esta se evapore para mantener la humedad en el ambiente, lo que contribuye a la regulación de la temperatura del aire. Consecuentemente, esto origina un crecimiento en las temperaturas tanto superficiales como atmosféricas (ver Ilustración 2).

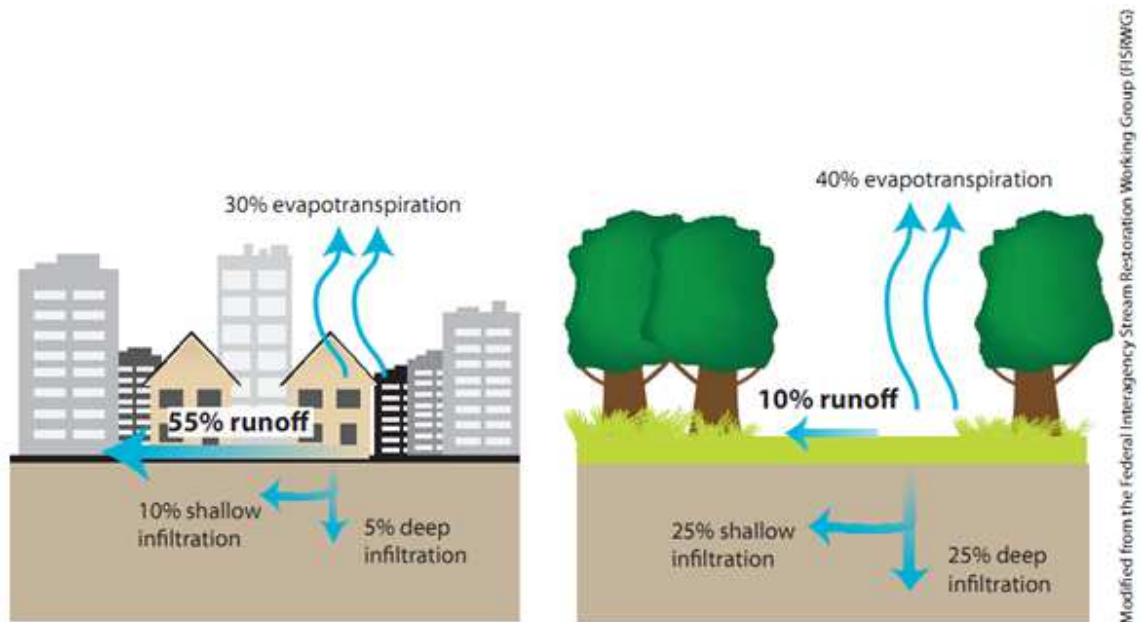


Ilustración 2. Superficies duras vs. Superficies blandas (EPA, 2011)

Propiedades de los materiales de construcción: propiedades como la reflectividad solar (albedo), emisividad térmica y capacidad calórica influyen enormemente en las islas de calor, ya que definen la forma en que la energía solar es reflejada, emitida o absorbida por la estructuras. La energía solar que llega a la tierra tiene una longitud de onda que varía entre los 250 y 2500 nm, se compone de rayos ultra violeta (5%), luz visible (43%) y rayos infrarrojos (52%), siendo estos últimos los que se perciben en forma de calor (ver Ilustración 3) (EPA, 2011).

Las superficies urbanas tienen un albedo menor que las superficies presentes en las zonas rurales por lo que tienden a absorber mayor cantidad de calor. Además de la radiación reflejada también está la emitida por las superficies (emisividad térmica), que es la capacidad que éstas tienen de eliminar calor o de emitir radiación infrarroja de onda larga. Mientras mayor sea la emisividad térmica, la temperatura superficial será menor. Por último, está la capacidad calórica de un material, que se refiere a la cantidad de calor que es capaz de almacenar. Materiales como el metal o la roca tienen una capacidad calórica alta en comparación con materiales encontrados en zonas rurales, como la arena y la tierra, alcanzando a almacenar hasta dos veces más calor que los materiales de las zonas rurales (EPA, 2011).

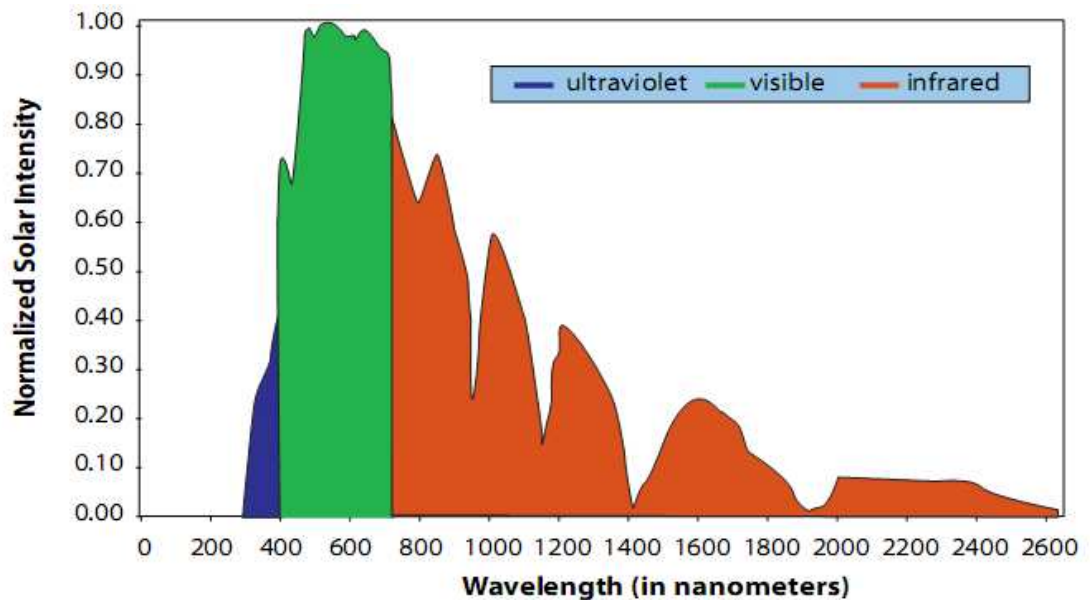


Ilustración 3. Energía solar que alcanza la superficie terrestre (Longitud de onda vs Intensidad solar normalizada) (EPA, 2011)

Geometría urbana: la geometría urbana hace referencia a la distribución y las dimensiones de la infraestructura. Esto influye en el flujo del viento, en la absorción de la energía y en la capacidad de emisividad térmica debido a que los edificios altos actúan como barrera que evitan el flujo de calor convirtiendo estas zonas en islas de calor. La geometría urbana tiene mayor influencia en las noches ya que un elemento conocido como “cañón urbano” (corredores viales entre altos edificios) previene que el calor liberado por las estructuras durante la noche alcance una altura donde su efecto no se sienta, sino que lo atrapa calentando el aire en el proceso. Durante el día el cañón urbano tiende a actuar de manera positiva ya que provee sombra en esa zona (EPA, 2011).

Fuentes antropogénicas: afecta principalmente a las islas de calor atmosféricas y hace referencia a todo lo que emite calor que fue producido por el hombre. Por ejemplo, los medios de transporte, los procesos industriales, la calefacción y la ventilación. Las ciudades son más sensibles a este efecto en las épocas de invierno y cuando son densamente pobladas, aunque no es una de las grandes causas de las islas de calor (EPA, 2011).

Clima y localización geográfica: el viento y la nubosidad afectan el desarrollo de las islas de calor ya que estas se potencializan cuando el viento es débil y el cielo está despejado, puesto que por efecto de la convección los vientos fuertes y la nubosidad evitan que gran parte de la radiación solar alcance la superficie. La localización geográfica y la topografía de un lugar definirán gran parte del clima puesto que series de montañas aledañas podrían bloquear el viento o bien pueden dirigirlo por una vía específica o grandes cuerpos de agua pueden moderar la temperatura por medio de la evaporación (EPA,

2011). La geografía también determina el tiempo que ese lugar se encuentra expuesto a la radiación solar puesto que en algunos lugares podrá variar durante el año (lugares con estaciones) mientras que en otros es constante (cerca al ecuador).

C. Tipos de isla de calor

Existen tres tipos de isla de calor urbana (Oke, 1976):

- Isla de calor de la capa de dosel
- Isla de calor de la capa límite
- Isla de calor de superficie

Los primeros dos tipos de isla de calor hacen referencia al calentamiento de la atmósfera urbana que se divide en dos capas, la capa de dosel urbana (urban canopy layer) y la capa límite urbana (urban boundary layer). La primera de estas capas hace alusión a la zona más cercana a las superficies y consiste en el aire atrapado entre las superficies urbanas como edificios y la capa límite que llega hasta 1,5 km sobre la superficie (ver Ilustración 4).

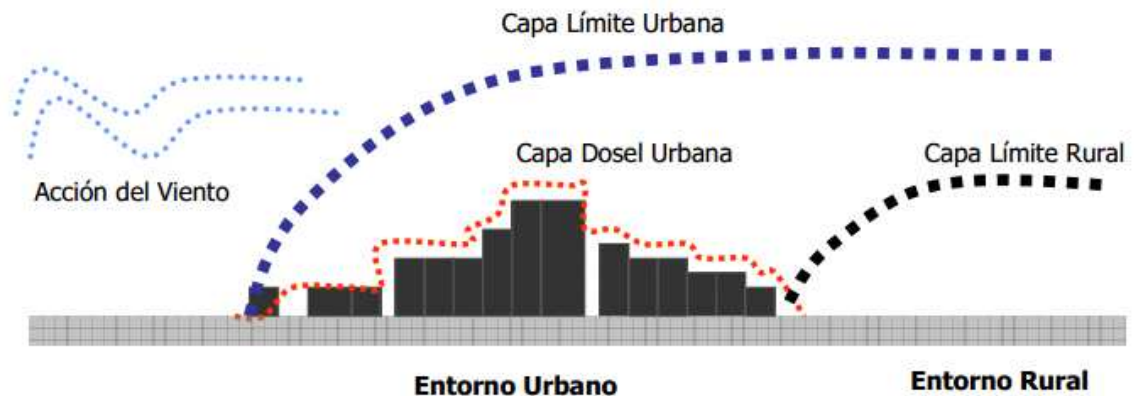


Ilustración 4. Capas atmosféricas urbanas (Eixo Atlántico, 2008)

Para medir la temperatura de las capas atmosféricas se utilizan estaciones climáticas, mientras que para medir la temperatura superficial se utilizan imágenes obtenidas con sensores remotos de satélites o aviones. Ya que este estudio se basa en el cálculo de la temperatura superficial y no de la temperatura del aire, se establecen a continuación las diferencias que existen entre los tipos de islas de calor para no crear confusiones entre las conclusiones y métodos utilizados por los diferentes estudios alrededor del mundo (ver Tabla 1).

Tabla 1. Características básicas de las islas de calor superficiales y atmosféricas (EPA, 2011)

Parámetro	UHI Superficial	UHI Atmosférico
Desarrollo temporal	<ul style="list-style-type: none"> • Presente en todo el día y la noche. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser insignificante o no existe durante el día.

	<ul style="list-style-type: none"> • Es más intenso durante el día y el verano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Intenso durante la noche, el atardecer y en invierno.
UHI Pico (Condiciones de UHI más intensas)	Mayor variación espacio temporal <ul style="list-style-type: none"> • Día: 10 a 15°C • Noche: 5 a 10°C 	Menor variación: <ul style="list-style-type: none"> • Día -1 a 3°C • Noche-7 a 12°C
Método de identificación más utilizado	Medición Indirecta: <ul style="list-style-type: none"> • Percepción remota 	Medición directa: <ul style="list-style-type: none"> • Estaciones climáticas fijas • Atravesadores móviles
Representación	<ul style="list-style-type: none"> • Imagen térmica 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapas de isotermas • Gráfica de temperatura

La isla de calor superficial es más intensa cuando la nubosidad es baja y los vientos débiles, por lo que es la condición ideal para medirla, además de que un día claro permite que la imagen satelital tenga información más confiable (EPA, 2011).

Los científicos utilizan sensores en aviones y satélites para obtener imágenes térmicas como la mostrada en la Ilustración 5. En esta imagen (Salt Lake City, Utah, Julio 13 de 1998), las partes más calientes son aquellas de color blanco (70°C) y las partes más frías las de color azul oscuro (30°C).

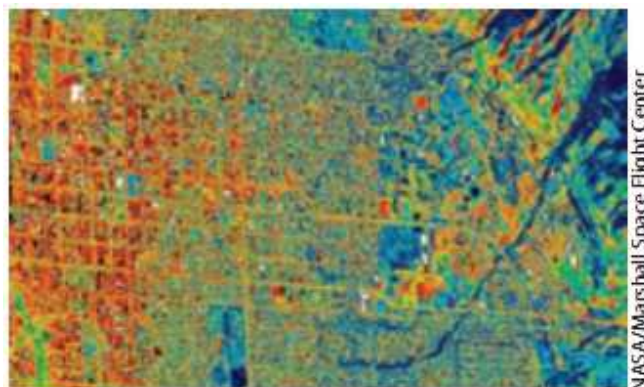


Ilustración 5. Imagen térmica que ilustra el fenómeno de isla de calor superficial (EPA, 2011)

Por otro lado, se sabe que la isla de calor atmosférica tiene una mayor intensidad desde el atardecer hasta temprano en la mañana, debido a la liberación de calor de la infraestructura urbana (EPA, 2011). La liberación de calor de las superficies duras ocasiona un incremento substancial en la temperatura del aire. Para tener una mayor claridad de como las islas de calor superficiales y atmosféricas se presentan en el día y en la noche, dependiendo del tipo de superficie, se presenta la Ilustración 6. Las temperaturas que aparecen en la imagen no representan ningún valor ni están relacionadas con una medición de algún lugar en específico, son sólo un modelo representativo de la variación de la temperatura del aire y la superficie entre el día y la noche (EPA, 2011). Las líneas de color naranja representan la temperatura durante el

día, mientras que las de color azul representan la noche. Por su parte, las líneas discontinuas representan la temperatura del aire mientras las continuas las de la superficie.

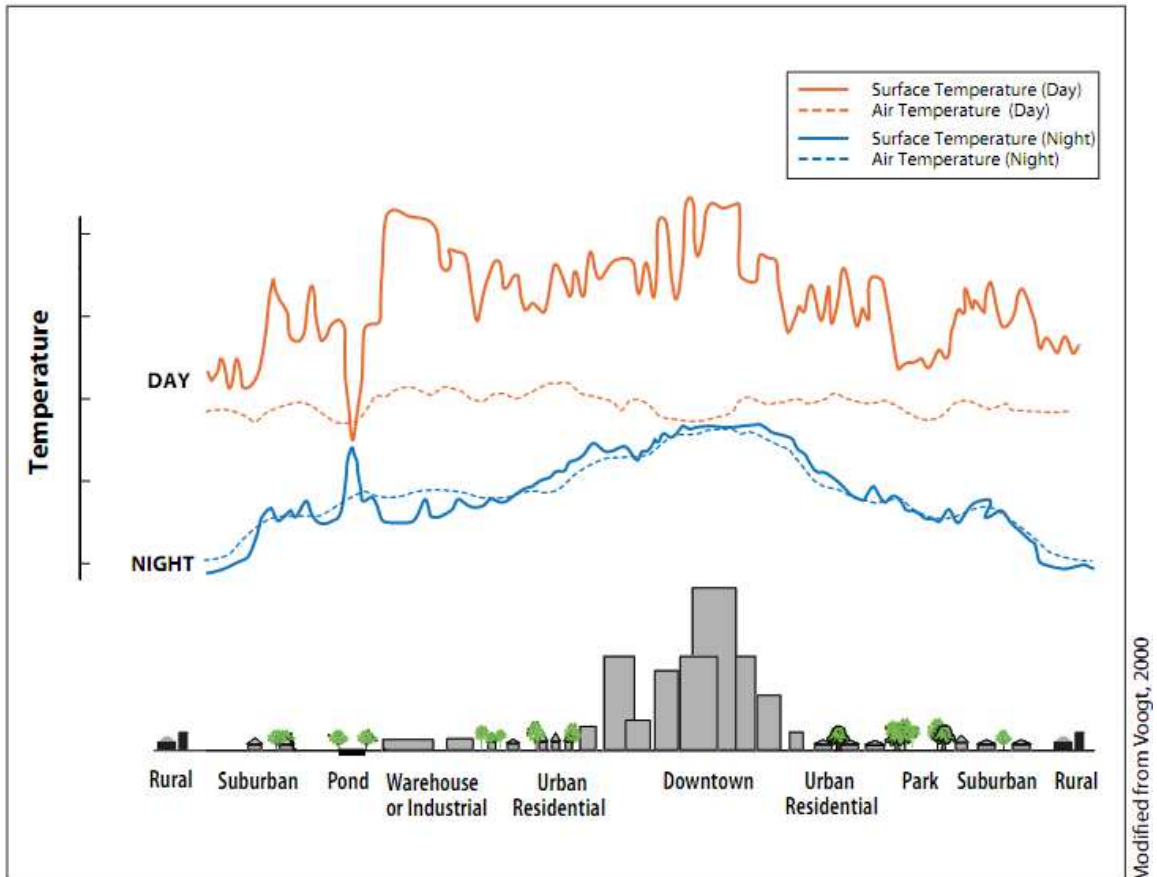


Ilustración 6. Temperaturas superficiales y atmosféricas durante el día y la noche dependiendo de las superficies que están presentes (EPA, 2011)

Para cuantificar el efecto isla de calor se comparan la temperatura promedio de la zona urbana y la temperatura promedio de las áreas rurales no urbanizadas circundantes (Memon, Leung, & Liu, 2009). La diferencia entre estas temperaturas (también conocido como índice de isla de calor o UHI) cuantifica el fenómeno. Cuando el índice es positivo nos indica que la temperatura de la zona urbana es mayor a la de la zona rural. La Tabla 2 muestra valores de islas de calor estimados para algunas ciudades alrededor del mundo. Las ciudades cuyos nombres tienen un número 1 indican que el análisis se realizó con la temperatura superficial y las que tienen un 2 con la temperatura atmosférica.

Tabla 2. Estimaciones del fenómeno isla de calor en algunas ciudades del mundo (Memon, Leung, & Liu, 2009)

Study area	Reference study	Approach	UHII (°C)
Atlanta, USA ^{1§}	Hafner and Kidder (1999)	Modeling	+ 1.2
NYC, USA ^{1§}	Holt and Pullen (2006)	Modeling	+ 2.2
Pyongyang, N. Korea ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 4.0
Ho Chi Minh City, Vietnam ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 5.0
Hungary ^{1§}	Pongracz et al. (2006)	Satellite data	+ 6.0
Shanghai, China ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 7.0
Manila, Philippines ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 7.0
Tokyo, Japan ^{1§}	Saitoh et al. (1995)	Modeling	+ 8.0
Seoul, S.Korea ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 8.0
Bangkok, Thailand ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 8.0
Beijing, China ^{1§}	Hung et al. (2005)	Satellite data	+ 10.0
Atlanta, USA ^{1*}	Hafner and Kidder (1999)	Modeling	- 2.1
Atlanta, USA ^{2§}	Hafner and Kidder (1999)	Modeling	+ 0.6
Fairbanks, Alaska, USA ^{2§}	Magee et al. (1999)	Weather station data	+ 1.0
Szeged, Hungary ^{2§}	Unger et al. (2001)	Site survey data	+ 2.6
Seoul, S. Korea ^{2§}	Kim and Baik (2005)	Weather station data	+ 3.4
Hong Kong, China ^{2§}	Girdharan et al. (2007)	Site survey data	+ 3.4
Rome, Italy ^{2§}	Bonacquisti et al. (2006)	Modeling	+ 5.0
Mexico city, Mexico ^{2§}	Jauregui (1997)	Weather station data	+ 5.0
NYC, USA ^{2§}	Gedzelman et al. (2003)	Weather station data	+ 5.0
Paris, France ^{2§}	Lemonsu and Masson (2002)	Modeling	+ 8.0
Hong Kong, China ^{2§}	Present study	Weather station data	+ 10.5
Łódź, Poland ^{2§}	Klysiak and Fortuniak (1999)	Weather station data	+ 12.0
Atlanta, USA ^{2*}	Hafner and Kidder (1999)	Modeling	- 0.5
Granada, Nicaragua ^{2*}	Montavez et al. (2000)	Weather station data	- 2.0

¹Surface-temperature based. ²Air-temperature based. *Negative UHII. [§]Positive UHII.

D. Efectos de la isla de calor

Las islas de calor afectan el entorno en el que habitamos y al ser humano directamente de varias formas. Algunos de estos impactos son positivos, especialmente en países con estaciones climáticas en donde la temporada de crecimiento de algunas plantas se alarga, pero la mayoría son negativos (EPA, 2011). A continuación se describen los principales impactos que tienen las islas de calor sobre nuestro ambiente:

Incremento en el consumo energético: el incremento de temperatura en las oficinas, hogares e industrias produce un aumento en el consumo energético debido al uso de sistemas de aire acondicionado (EPA, 2011). Durante el verano, con el incremento de la temperatura, el consumo energético se incrementa considerablemente (ver Ilustración 7) aunado a que en muchos lugares del mundo la energía proviene de hidroeléctricas, las cuales, durante la época de sequía, no pueden garantizar la máxima generación teniéndose que utilizar otros medios como las plantas termoeléctricas contribuyendo a la contaminación. La Ilustración 7 es un ejemplo de la ciudad de Nueva Orleans, donde se observa que cuando la temperatura aumenta de 20 °C a 35 °C también lo hace el consumo promedio de energía.

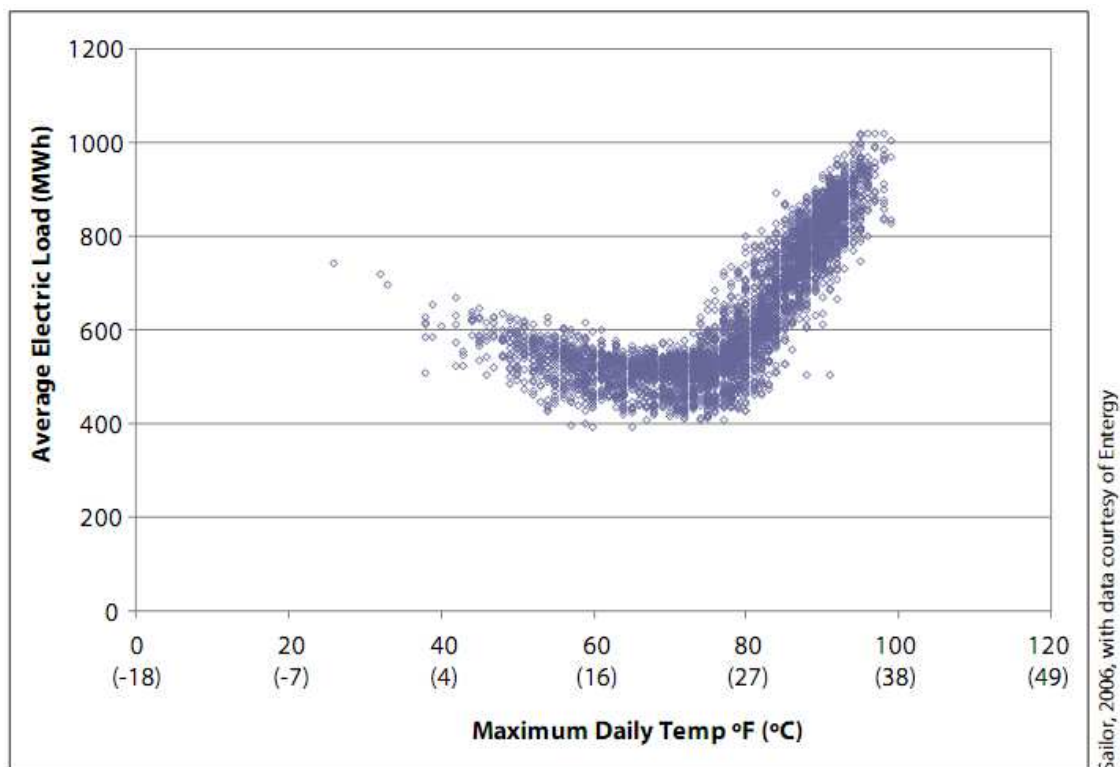


Ilustración 7. Incremento en el consumo energético con el incremento en la temperatura (EPA, 2011)

Calidad del aire y Gases de Efecto Invernadero (GEI): como ya se dijo, al incrementarse el consumo energético, dependiendo de qué tan “limpia” sea la energía de la ciudad, se incrementará la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica por la emisión de compuestos como dióxido de azufre (SO₂), óxidos nitrosos (NO_x), material particulado (PM), dióxido de carbono (CO₂) y otros. Estos gases pueden contribuir al calentamiento global, ocasionar lluvia ácida y afectar la salud de las personas de manera directa. Adicionalmente, el incremento en las temperaturas aumenta la formación de ozono al nivel del suelo, el cual se genera cuando los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV's) reaccionan en la presencia de luz solar (Rosenfeld, et al., 1998).

Salud y confort: el incremento en las temperaturas, tanto de día como de noche, puede afectar la salud humana al ocasionar situaciones de estrés, dificultades respiratorias, calambres, cansancio, deshidratación, ataques de calor y hasta muertes. En 1995, en el medio oeste, murieron más de 1.000 personas debido a una oleada de calor (EPA, 2011). En el verano de 2003 una anomalía meteorológica proporcionó las condiciones necesarias para experimentar las temperaturas más altas y el ambiente más seco que se haya visto desde 1540 en Europa (World Meteorological Organization, 2010). Este evento fue tan intenso que ocasionó la muerte de por lo menos 70.000 personas (Robine, et al. 2008) y otra gran cantidad de impactos como la pérdida de sembrados evaluados en

US\$12,3 billones, US\$1,6 billones en daños ocasionados por incendios forestales, el incremento del precio de la energía a más de US\$ 130 por MWh y el derretimiento de gran parte de los glaciares en los Alpes (Schar & Jendritzky, 2004).

Calidad del agua: las islas de calor contribuyen a la polución térmica del agua, lo que afecta todos los aspectos de la vida acuática, afectando especialmente el metabolismo y la reproducción de las especies acuáticas, en caso de que esta agua llegue a un río, un lago, un humedal o el mar (EPA, 2011).

E. Estimación de temperatura superficial

Debido a que los seres humanos no podemos observar la parte del espectro electromagnético que transfiere calor (banda infrarroja), se han creado sofisticados modelos numéricos y físicos, tales como los balances de energía, modelos de laboratorio, simulaciones tridimensionales, modelos Gaussianos, análisis estadísticos y otras simulaciones numéricas para lograr estimar la temperatura superficial (Weng, 2008). Existe otra herramienta que no se basa en la creación de modelos complejos. Se trata de imágenes satelitales obtenidas por medio de sensores multiespectrales, los cuales obtienen información en diferentes anchos de banda del espectro electromagnético. Entre estos sensores, están los sensores térmicos infrarrojos, que logran detectar la temperatura superficial de un cuerpo por medio de la radiación solar reflejada y el calor emitido.

El segmento infrarrojo de la luz tiene una longitud entre los 0.7 a 100 μm , pero para la percepción remota se utilizan tres segmentos de interés que se encuentran en este rango: cercana a la infrarroja (0.7-1.3 μm), infrarroja media (1.3-3.0 μm) e infrarroja lejana (7.0-15 μm), siendo este último segmento el utilizado para detectar la temperatura, por lo que también se le conoce como banda térmica infrarroja (NASA, 2007).

El espectro electromagnético de la luz se presenta en la Ilustración 8. En la imagen se puede ver el segmento visible de la luz en una gama de colores que se encuentran entre los 400 y 700 nm, mientras que la banda infrarroja (infrared) varía aproximadamente entre los 10^{-6} y 10^{-4} metros (1 y 100 μm). Por otro lado la banda térmica infrarroja, llamada también banda infrarroja larga, se encuentra entre los 8 y 15 μm (NASA, 2007).

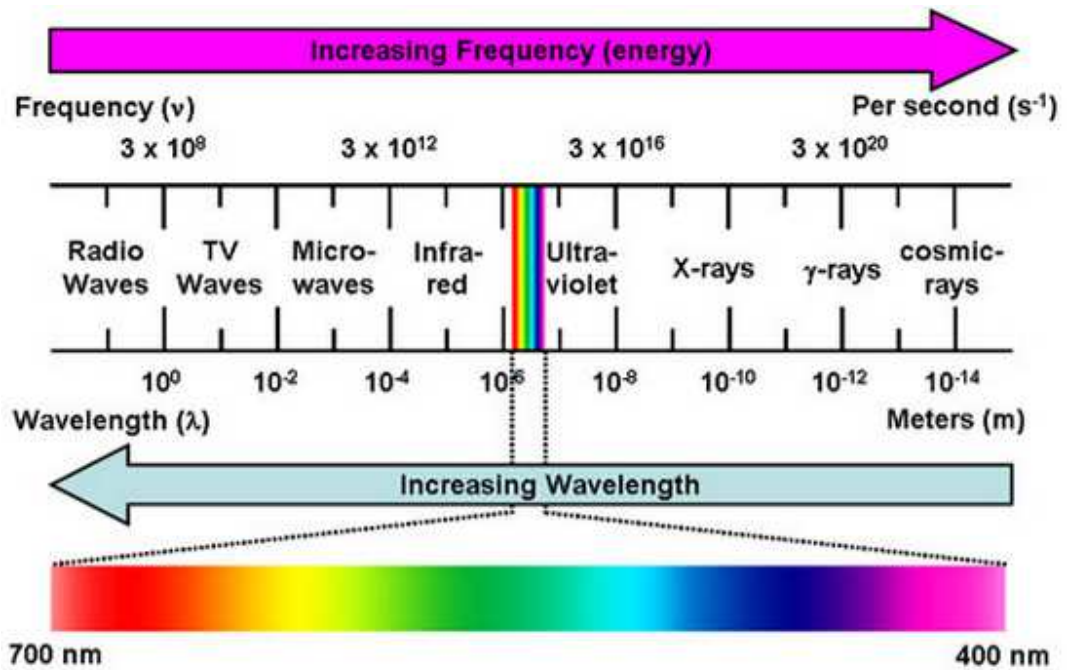


Ilustración 8. Espectro Electromagnético (Teledet, 2011)

Entre los sensores que pueden obtener imágenes térmicas se encuentran los satélites Landsat 5 y 7. Landsat 5 proporciona una resolución espacial (tamaño del pixel que representa un área en el terreno) de 120 metros, en tanto que Landsat 7 una resolución de 60 m, ambas resoluciones hacen referencia solo a la banda térmica. Las características principales de los satélites Landsat pueden observarse en la Tabla 3 y la Tabla 4. En la tabla L(s) representa el tipo de instrumento, donde RBV es un sensor en el espectro de luz visible (rojo, verde y azul), MSS es un sensor multispectral y TM quiere decir generador de mapas temáticos (thematic mapper). ETM y ETM+ son solo el mismo sensor TM mejorado, mientras que la letra R en la última columna representa el periodo de retorno del satélite en días (resolución temporal).

Un factor que no se establece en la tabla es la resolución radiométrica, la cual se refiere a los niveles en que se divide la información recibida por el satélite para ser procesada, en el caso de las imágenes Landsat se tiene una resolución de 8 bits, indicando que existen 2^8 o 256 divisiones (NASA, 2010).

Las imágenes obtenidas por los satélites Landsat almacenan en cada pixel un valor entre 0 y 255 que se conoce como número digital. Estos números digitales representan un valor de reflectancia de la superficie (dependiendo del sensor y de la banda, 120x120 m o 60x60 m de superficie). Para poder interpretarlos como valores de temperatura superficial, ya sea en grados Celsius o Kelvin, es necesario convertir estos números digitales mediante ecuaciones ajustadas a cada sensor (NASA, 2007).

Tabla 3. Características de los sensores multiespectales satélites Landsat (NASA, 2007)

Sistema	Lanzamiento (fin de uso)	Instrumento	Resolución espacial (metros)	Alt (km)	R (Días)
Landsat1	7/23/1972 (1/6/1978)	RBV	80	917	18
		MSS	80		
Landsat2	1/22/1975 (2/25/1982)	RBV	80	917	18
		MSS	80		
Landsat3	03/05/1978 (03/31/1983)	RBV	40	917	18
		MSS	80		
Landsat 4	7/16/1982	MSS	80	705	16
		TM	30		
Landsat 5	03/01/1984	MSS	80	705	16
		TM	30		
Landsat 6	10/05/1993 (10/05/1993)	ETM	15 (pan)	705	16
			30 (mss)		
Landsat 7	01/04/1999	ETM+	15 (pan)	705	16
			30 (mss)		

Tabla 4 Resolución en metros de cada longitud de onda en los satélites Landsat (NASA, 2007)

Satélite	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (metros)	Satélite	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (Metros)
Landsat 5 TM	(1) 0,45 a 0,52	30	Landsat 7 ETM+	(1) 0,45 a 0,52	30
	(2) 0,52 a 0,60	30		(2) 0,52 a 0,60	30
	(3) 0,63 a 0,69	30		(3) 0,63 a 0,69	30
	(4) 0,76 a 0,90	30		(4) 0,76 a 0,90	30
	(5) 1,55 a 1,75	30		(5) 1,55 a 1,75	30
	(6) 10,4 a 12,5	120		(6) 10,4 a 12,5	60
	(7) 2,08 a 2,35	30		(7) 2,08 a 2,35	30
			(8) 0,52 a 0,9	15	

F. Determinación de intensidad de vegetación

Una vez estimada la temperatura superficial, el siguiente paso es relacionarla con alguna variable de la cual se crea que pueda depender. Una variable que puede ser relacionada con la temperatura superficial es la intensidad de la vegetación. Como se mencionó, las superficies duras tendrán una temperatura mayor a aquellas superficies con vegetación,

por lo que la presencia de la vegetación deberá tener alguna influencia en la temperatura promedio del área urbana.

Uno de los índices más utilizados para estimar la intensidad de vegetación es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). El NDVI, o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia de dos partes del espectro electromagnético. Es utilizado para determinar la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación (Teledet, 2011).

Este índice se calcula utilizando la longitud de onda roja (0,6 a 0,7 μm) y la cercana al infrarrojo (0,7 a 1,1 μm). La razón por la cual se utilizan estas dos longitudes de onda, es porque las plantas más sanas tienden a absorber gran cantidad de la onda roja y a reflejar la mayor parte de la onda cercana al infrarrojo (NASA, 2007). En la Ilustración 9 se puede apreciar un ejemplo de cómo se utiliza el NDVI para conocer el estado de vegetación. En la imagen, la planta sana a la izquierda absorbe mayor cantidad de luz visible (roja) y refleja mayor cantidad de luz en la banda cercana al infrarrojo, mientras que la de la izquierda, menos sana, absorbe menor cantidad de luz visible (roja) y refleja menor cantidad de luz cercana a la infrarroja.

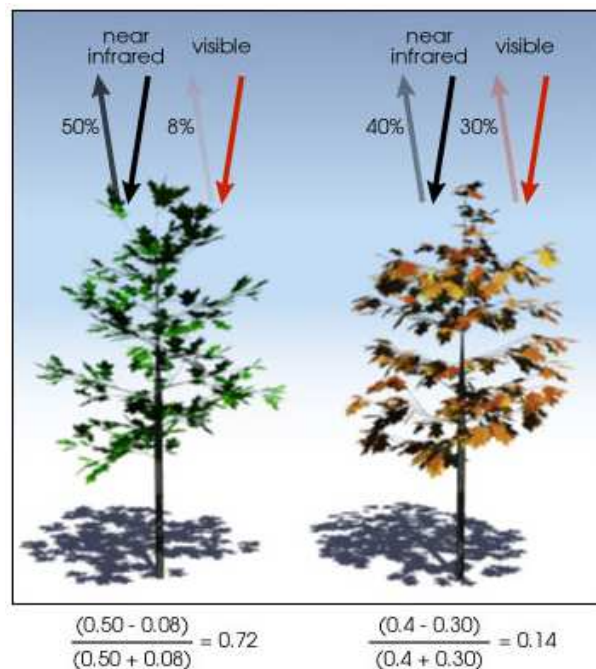


Ilustración 9. Absorción de la luz en la vegetación (Ilustración por Robert Simmon) (NASA, 2010)

La ecuación que se utiliza para realizar el cálculo del NDVI arroja como resultado valores entre -1 y 1, los valores más cercanos a 1 indican vegetación sana, aquellos por encima de 0 representan tierra o vegetación con muy baja capacidad fotosintética y los valores por debajo de cero y muy cercanos a -1 representan cuerpos que no tengan la capacidad de reflejar la onda cercana al infrarrojo y al mismo tiempo absorber la luz roja, lo que

significa ausencia de vegetación. La ecuación utilizada para el cálculo del índice NDVI se presenta a continuación:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

NIR: quiere decir near infrared, lo cual en español significa cercano al infrarrojo.

El color en el que se representa la escala del NDVI dependera de quien lo este aplicando o del software con el que se realice. Comunmente se muestran los valores de las plantas sanas de un color verde, por lo que al NDVI también se le conoce como indice verde. Un ejemplo de una imagen procesada para ver el NDVI se puede apreciar en la Ilustración 10, en donde se puede observar el planeta tierra y a la derecha una escala en donde los valores cercanos a 1 estan representados por un color verde oscuro y a medida que el valor disminuye el color se aclara hasta pasar a café y finalmente a blanco.

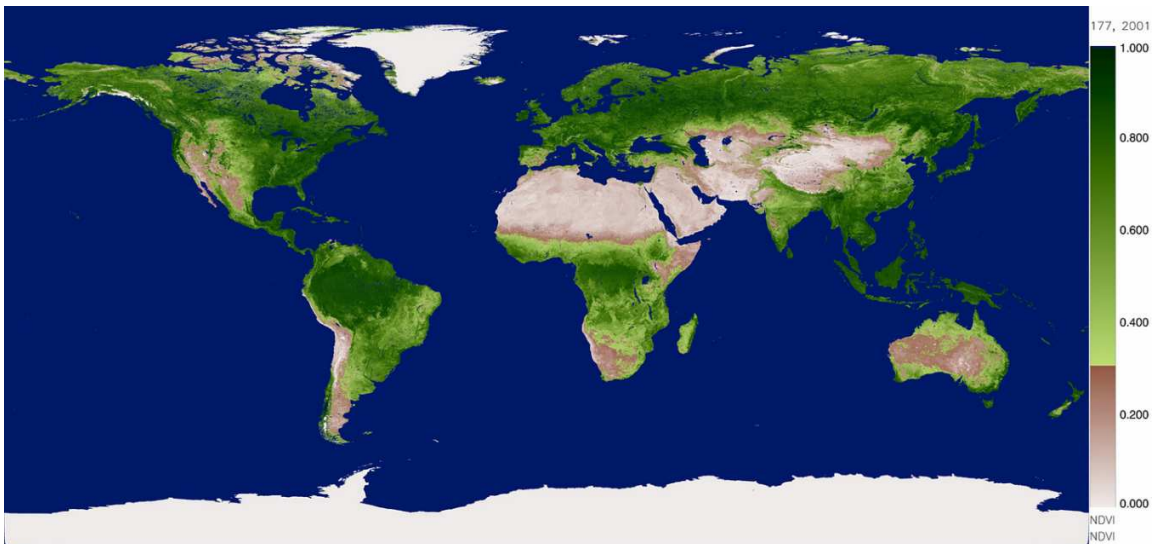


Ilustración 10. Representación del NDVI de todo el planeta (NASA, 2003)

1.4 HIPÓTESIS

La temperatura superficial promedio de la zona urbana del valle de Aburrá podrá ser correlacionada con la presencia e intensidad de la vegetación, la cual tendera a disminuir a medida que la intensidad de la vegetación incremente.

2. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se describe a continuación:

Selección de información espacial

Esta etapa se basa en la obtención de las imágenes satelitales Landsat del valle de Aburrá entre los años 1986 y 2010 para poder establecer una relación entre el crecimiento urbano y el aumento de la temperatura superficial, comparando la temperatura calculada en las diferentes épocas de la zona de estudio. El rango de años entre 1986 y 2010, fue elegido a consideración de los investigadores como un periodo entre el cual hubiese existido un crecimiento urbano que pudiera apreciarse y también por ser una época de la cual se puede obtener información satelital.

Ajuste de información digital

Preparación de la información: delimitación del área de estudio, corrección radiométrica y geométrica de los datos para poder comparar la información en la misma zona y con el mismo sistema de referencia. La preparación de la información se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS 10.

Selección del método para la estimación de temperatura superficial

Investigación en páginas web, artículos, libros y otras fuentes para determinar la metodología para calcular la temperatura superficial.

Estimación de temperatura superficial

Aplicar la metodología elegida en la etapa anterior. Este procedimiento se realizó utilizando los software ArcGIS 10 y ERDAS 9.1.

Estimación de la intensidad de la vegetación

Utilizar el índice NDVI para estimar la intensidad de la vegetación y posteriormente poder correlacionarla con la temperatura superficial.

Correlación entre variables (vegetación y temperatura)

Establecer la correlación entre la temperatura superficial y la intensidad de la vegetación.

La Ilustración 11 muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada.

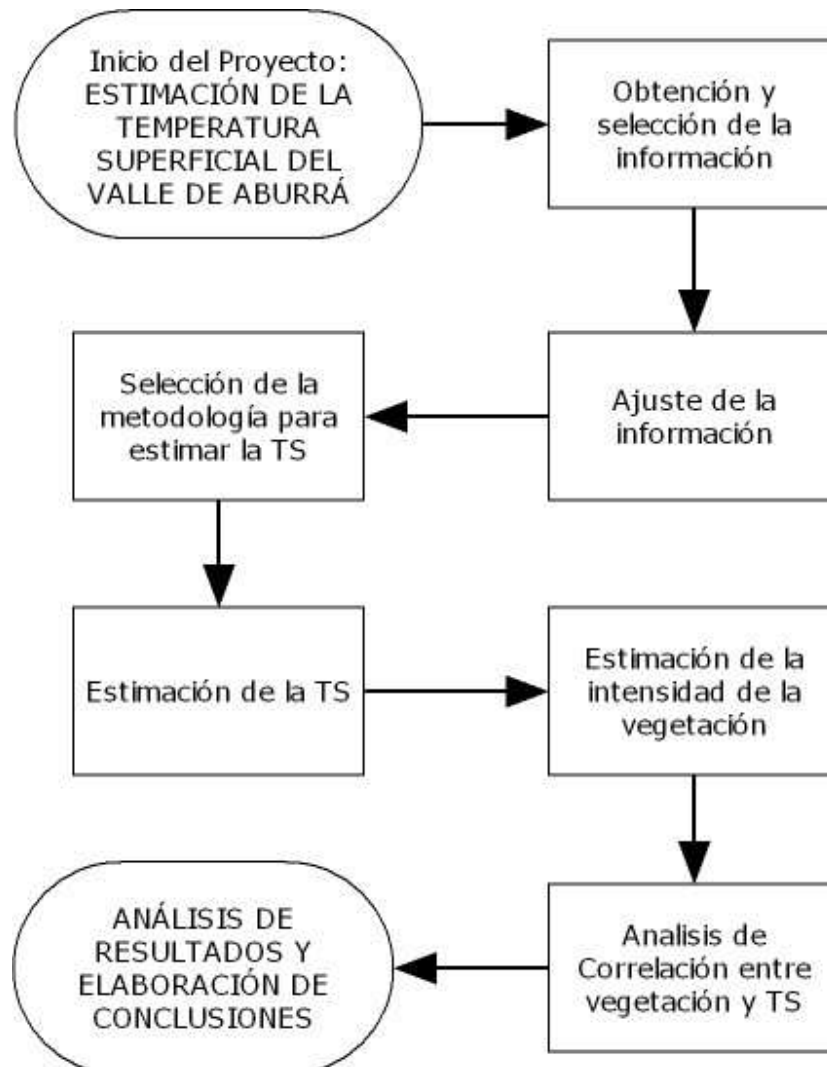
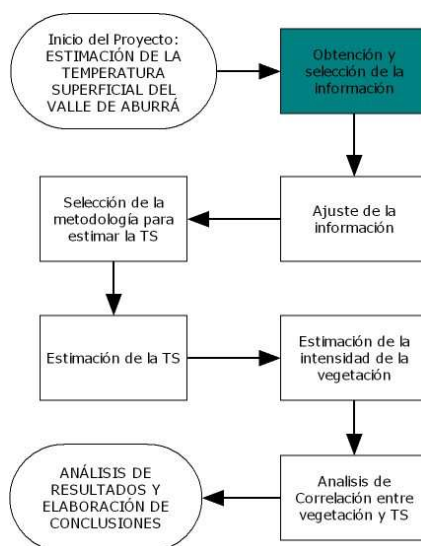


Ilustración 11. Diagrama de flujo de la metodología

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 OBTENCIÓN Y SELECCIÓN DE LA INFORMACIÓN SATELITAL



El primer paso fue obtener y seleccionar la información con la cual se trabajaría. Estas imágenes se obtuvieron de bases de datos como la del USGS. Para su selección se consideró la fecha de adquisición (en lo posible se trató de seleccionar imágenes distribuidas en el periodo de análisis) y el porcentaje de nubosidad. Los criterios de selección utilizados para el proyecto pueden apreciarse en la Tabla 5, en esta tabla las palabras path y row hacen referencia a una ubicación geográfica del satélite sobre la tierra. Las imágenes descargadas se resumen en la Tabla 6.

Tabla 5. Criterios de selección de imágenes satelitales

Path	9
Row	56
Sensor	Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+
Año inicial	1986
Año final	2012
% Nubes	<15%

Tabla 6. Imágenes Landsat identificadas para el área de estudio

Sensor	Año	Fecha adquisición
Landsat 5	1986	8 de Septiembre
Landsat 5	1990	14 de Enero
Landsat 7	2000	21 de Agosto
Landsat 7	2001	7 de Julio
Landsat 7	2001	14 de Diciembre
Landsat 7	2003	2 de Noviembre
Landsat 7	2004	6 de Febrero
Landsat 7	2004	2 de Junio
Landsat 7	2006	22 de Agosto
Landsat 7	2009	2 de Enero
Landsat 7	2010	21 de Enero
Landsat 7	2011	24 de Mayo

Una vez obtenida la información se procedió a analizar en detalle su calidad (cantidad de nubes sobre la zona interés) para elegir las imágenes con las cuales trabajar y realizar la comparación. Luego de examinar las imágenes se concluyó que se trabajaría con las 4 imágenes de la Tabla 7, que se pueden observar en la Ilustración 12.

Tabla 7. Imágenes elegidas

Sensor	Año	Fecha adquisición
Landsat 5	1986	8 de Septiembre
Landsat 7	2000	21 de Agosto
Landsat 7	2004	6 de Febrero
Landsat 7	2010	21 de Enero

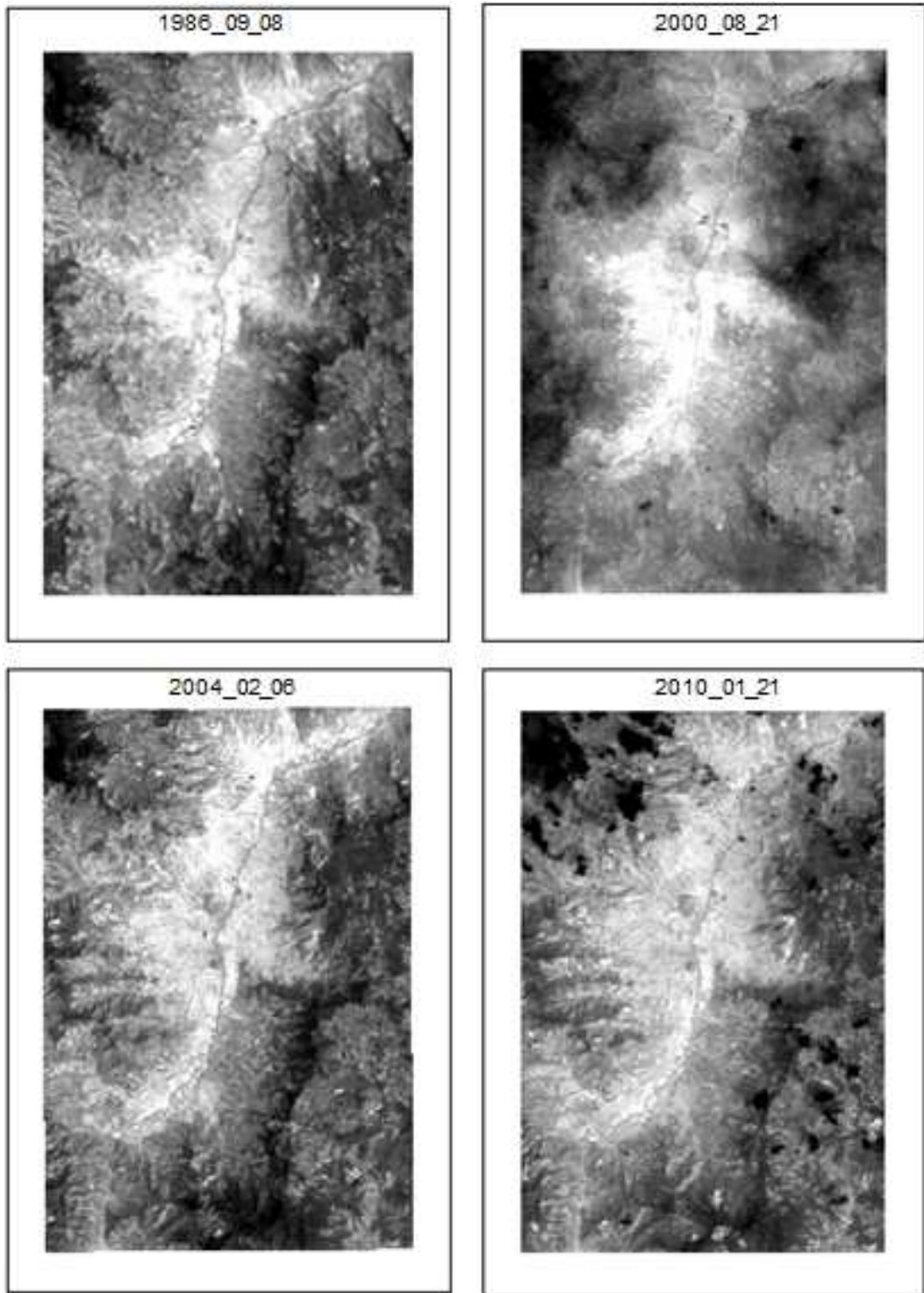
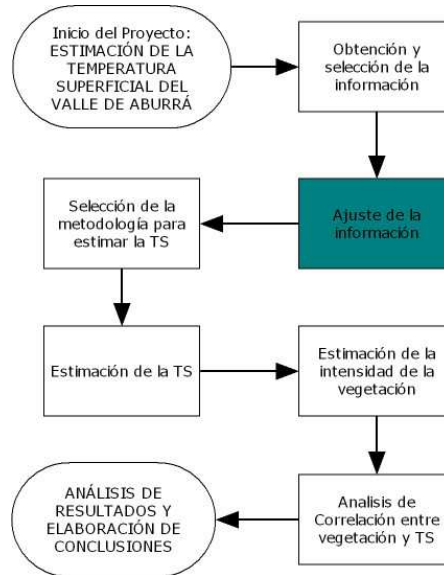


Ilustración 12. Banda térmica (banda 6) de las imágenes satelitales seleccionadas

3.2 AJUSTE DE LA INFORMACIÓN



El ajuste de la información consistió en transformar el sistema de referencia de las imágenes satelitales de WGS84 al sistema oficial de Colombia y específicamente del valle de Aburrá: Magna SIRGAS Colombia Oeste. El sistema de referencia es un conjunto de convenciones que le permiten a un observador hacer medidas desde determinado lugar de la tierra. Estas pueden ser de carácter geográfico (medidas en grados) o proyectadas (medidas en metros) sobre un tipo de superficie. Esta operación se realizó con el software ArcGIS 10.

Analizando detenidamente las imágenes, se logró detectar un error en muchas de ellas. Al indagar al respecto se conoció que a partir del 2003, las imágenes del Landsat 7, presentan un error conocido como pérdida del corrector de línea de escaneo (USGS, 2010). Este error se aprecia como líneas negras en la imagen, los cuales son datos faltantes que resultan por una falla en el corrector de la línea de escaneo (SLC, por sus siglas en inglés que quiere decir Scan Line Corrector). En la Ilustración 13 se puede apreciar el funcionamiento del sensor con este corrector y sin él, en tanto que en la Ilustración 14 se observa el error que genera en las imágenes satelitales tomadas a partir del 2003.

El error originado por la falla en el SLC genera una pérdida de información de aproximadamente 22%, ya que las líneas sin escaneo pueden medir entre 390 a 450 metros. (Bustillos, 2012). Para corregir ese error se utilizó una herramienta llamada *GapFill*. *GapFill* es un modelo diseñado para corregir el error de las imágenes Landsat que se basa en la interpolación entre celdas adyacentes. El funcionamiento de esta herramienta se puede ver en la Ilustración 15.

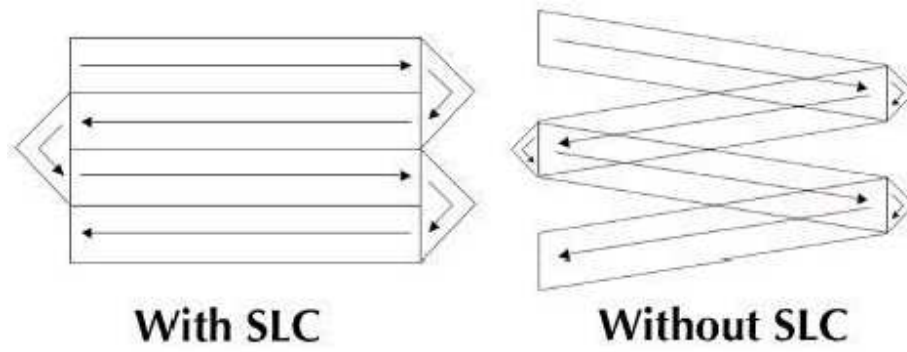


Ilustración 13. Daño en el SLC del Landsat 7 (USGS, 2010)

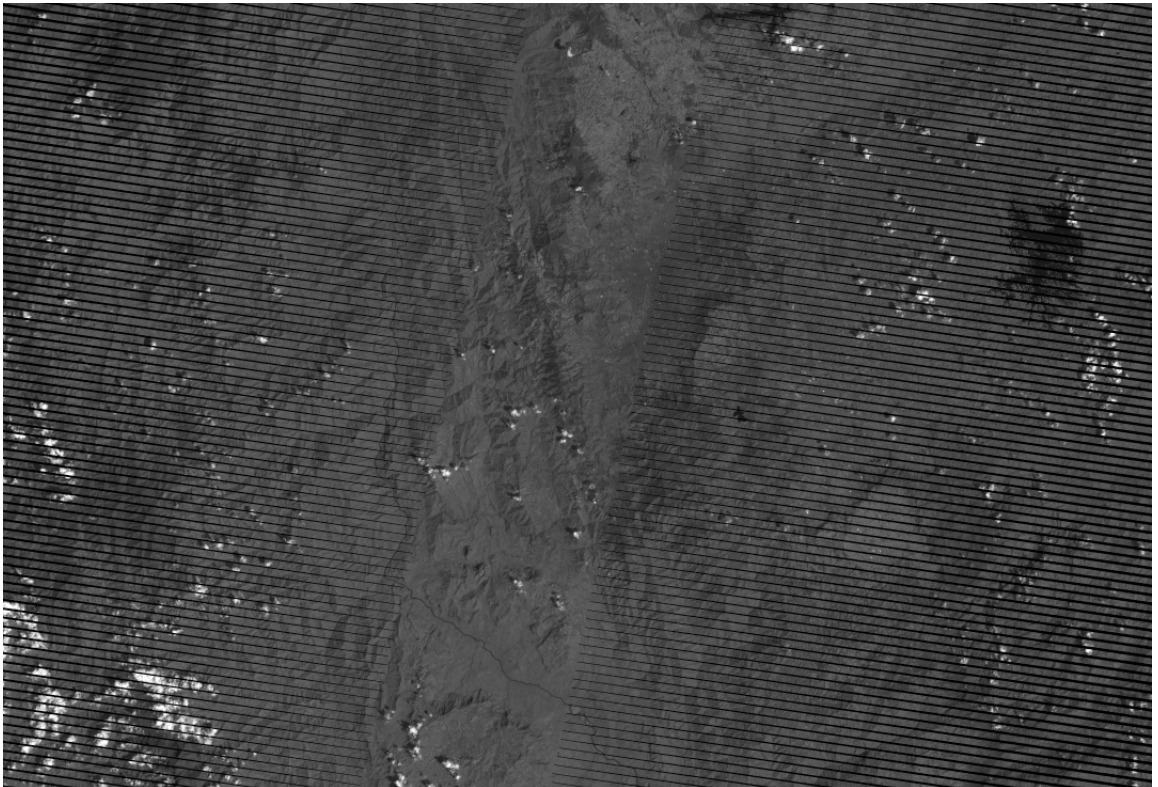


Ilustración 14. Segmentos de imágenes sin información del Landsat 7

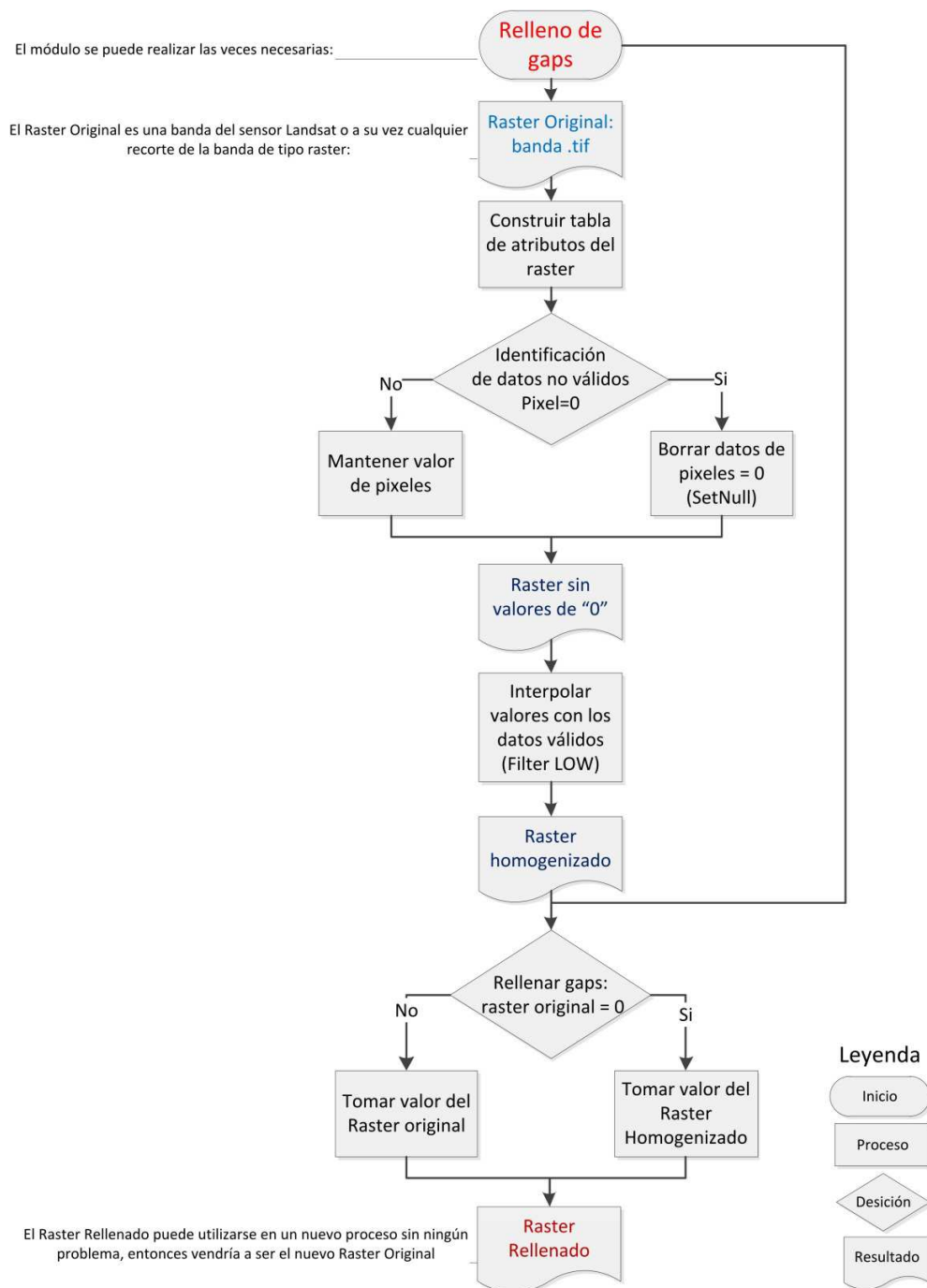


Ilustración 15. Diagrama de flujo de la herramienta GapFill (Bustillos, 2012)

Una vez corregidas las imágenes del Landsat 7 se delimitó el área de estudio. Las coordenadas extremas fueron determinadas con base en la extensión de una imagen satelital de alta definición adquirida por la EIA. El área de estudio fue delimitada con las siguientes coordenadas, ésta cubre un área de 20 X 30 km Ilustración 16.

X_1 :1156339,17914 m	Y_1 :1195715,48524 m
X_2 :1176471,00313 m	Y_2 :1165773,67602 m

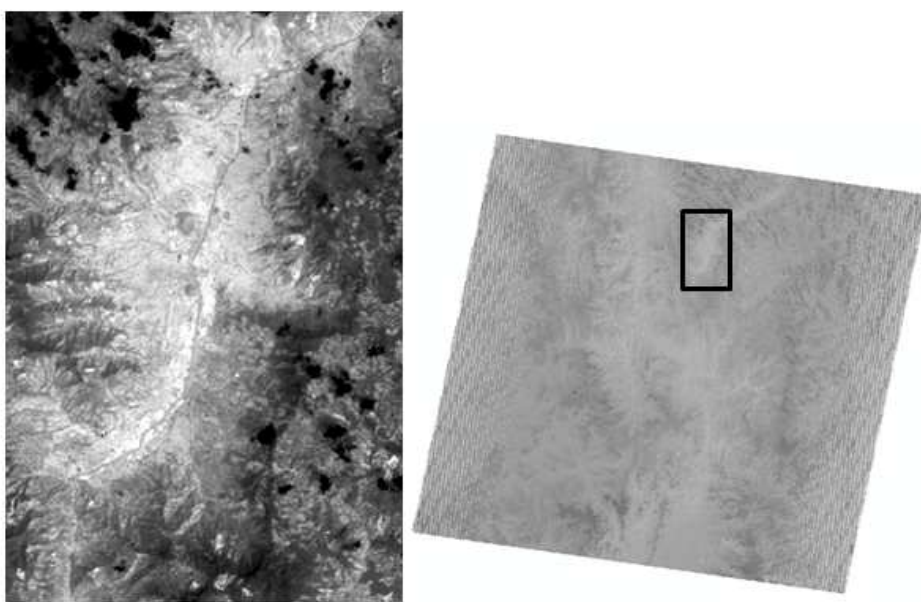


Ilustración 16. Zona de estudio

Todas las imágenes satelitales se cortaron con esta extensión para limitar el estudio a la zona de interés (Ilustración 17), para lograr esto se utilizó la herramienta clip (cortar) de ArcGIS en donde la capa a cortar era la imagen satelital y la extensión la capa de puntos creada. Durante la extracción de las imágenes se definió una resolución espacial de 30 m para todas las bandas, de modo que se facilitaran los cálculos y las correlaciones entre capas de diferente resolución espacial más adelante. La técnica de re-muestreo utilizada para modificar la resolución espacial de las bandas fue la del vecino más cercano, la cual no modifica el valor de las celdas.

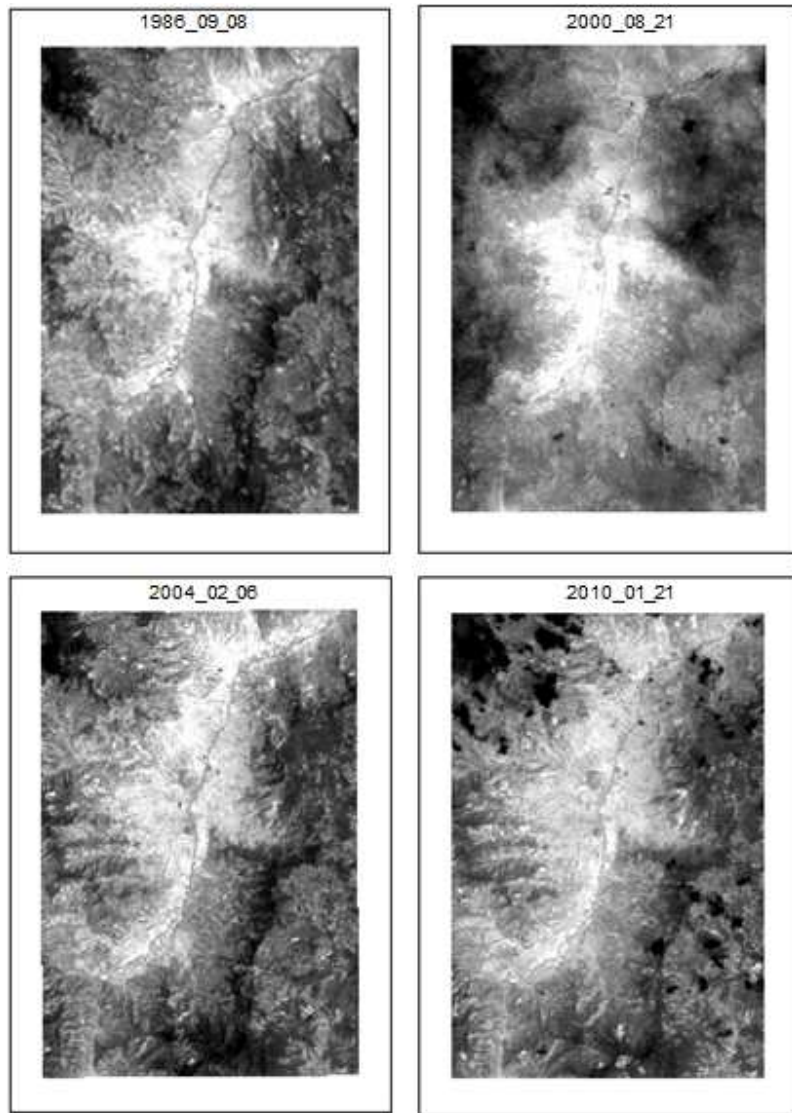
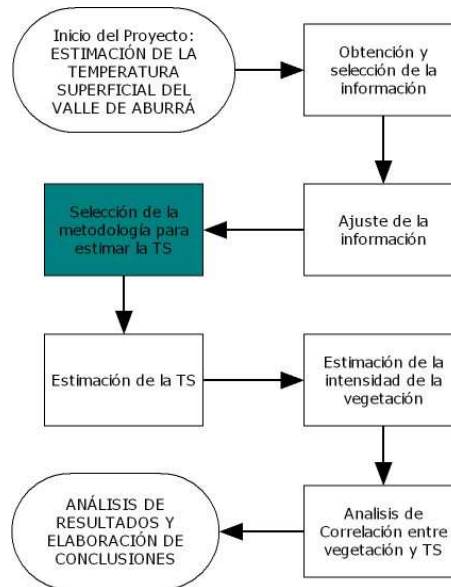


Ilustración 17. Imágenes térmicas ajustadas al área de estudio

3.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA ESTIMAR LA TEMPERATURA SUPERFICIAL



Para hallar el método para estimar la temperatura superficial se consultaron artículos académicos, foros de internet, expertos y gran cantidad de bibliografía.

Esta búsqueda condujo al manual de usuario de Landsat 7 (NASA, 2007), en el cual se proponen las ecuaciones para transformar los números digitales en temperatura superficial en grados Kelvin. Adicionalmente, se consultaron los coeficientes de calibración radiométrica recomendados para Landsat 7 y Landsat 5. Las ecuaciones empleadas se presentan a continuación.

Ecuación 1: transformación de números digitales a irradiación. Esta ecuación transforma los números digitales de las imágenes que están a 8 bits y que van de 0 a 255, a unidades de radiación (radiance) cuyas unidades de medida son: watts/(m² * ster * μm) (NASA, 2007).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCALMAX - QCALMIN} \right) * (QCAL - QCALMIN) - LMIN_{\lambda}$$

L_{λ} = Irradiación espectral en la apertura del sensor en watts/(m² * ster * μm)

QCAL = Valor del pixel cuantificado en ND (número digital)

$L_{MIN\lambda}$ = irradiación espectral correspondiente al QCALMIN en watts/(m² * ster * μm)

$L_{MAX\lambda}$ = irradiación espectral correspondiente al QCALMAX in watts/(m² * ster * μm)

QCALMIN = el valor mínimo de pixel cuantificado (correspondiente a LMIN) en DN es igual a 1 para productos del LPGA (Level 1 Product Generation System) y productos del NLAPS (National Landsat Archive Production System) procesados después del 4/4/2004, mientras que para productos del NLAPS procesados antes de 4/5/2004 es igual a 0.

QCALMAX = número mayor de pixel cuantificado (correspondiente a LMAX) in DN = 255

Ecuación 2: esta ecuación permite transformar la irradiación en temperatura superficial en grados Kelvin (NASA, 2007).

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Dónde:

T: Temperatura en grados Kelvin efectiva en satélite

K1: Constante de calibración 1

K2: Constante de calibración 2

L_{λ} : Irradiación espectral en la apertura del sensor en watts/(m² * ster * μm)

Debido a que esta ecuación arroja los valores de temperatura en grados Kelvin y deseamos tenerlos en grados Celsius, ya que es una unidad más común para el público de la zona de interés, a los valores obtenidos les restamos 273.15 y ese es el resultado final. Las tablas 8, 9 y 10 muestran las constantes de calibración y demás parámetros utilizados.

Tabla 8. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5 y 7 (NASA, 2007)

Sensor	Constante 1 - K1 W/(m ² *ster*μm)	Constante 2 - K2 Kelvin
Landsat 7	666,09	1282,71
Landsat 5	607,76	1260,56

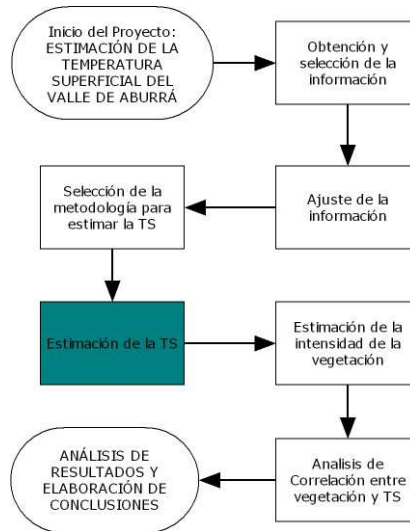
Tabla 9. Parámetros Landsat 5 (Chander, 2008)

Banda	Rango espectral (μm)	$L\text{MIN}_\lambda$ $W/(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \text{m})$	$L\text{MAX}_\lambda$ $W/(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \text{m})$
1	0,452-0,518	-152	169
2	0,528-0,609	-2,84	333
3	0,626-0,693	-1,17	264
4	0,776-0,904	-1,51	221
5	1,567-1,784	-0,37	30,2
6	10,45-12,42	1,2378	15,3032
7	2,097-2,394	-0,15	16,5
Sensor TM (Qcalmin=1 y Qcalmax=255)			

Tabla 10. Parámetros Landsat 7 (NASA, 2007)

ETM+ Rangos espectrales de reflectancia vativos/ $(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu\text{m})$								
# de Banda	Procesadas antes de Julio 1 del 2000				Procesadas después de Julio 1 del 2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
1	6,20	297,50	6,20	194,30	6,20	293,70	6,20	191,60
2	6,00	303,40	6,00	202,40	6,40	300,90	6,40	196,50
3	4,50	235,50	4,50	158,60	5,00	234,40	5,00	152,90
4	4,50	235,00	4,50	157,50	5,10	241,10	5,10	157,40
5	1,00	47,70	1,00	31,76	1,00	47,57	1,00	31,06
6	0,00	17,40	3,20	12,65	0,00	17,04	3,20	12,65
7	0,35	16,60	0,35	10,93	0,35	16,54	0,35	10,80
8	5,00	244,00	5,00	158,40	5,00	243,10	5,00	158,30

3.4 ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL (TS) DEL VALLE DE ABURRÁ



La temperatura superficial se calculó utilizando el software ArcGIS 10. La Ilustración 18 resume el procedimiento utilizado.

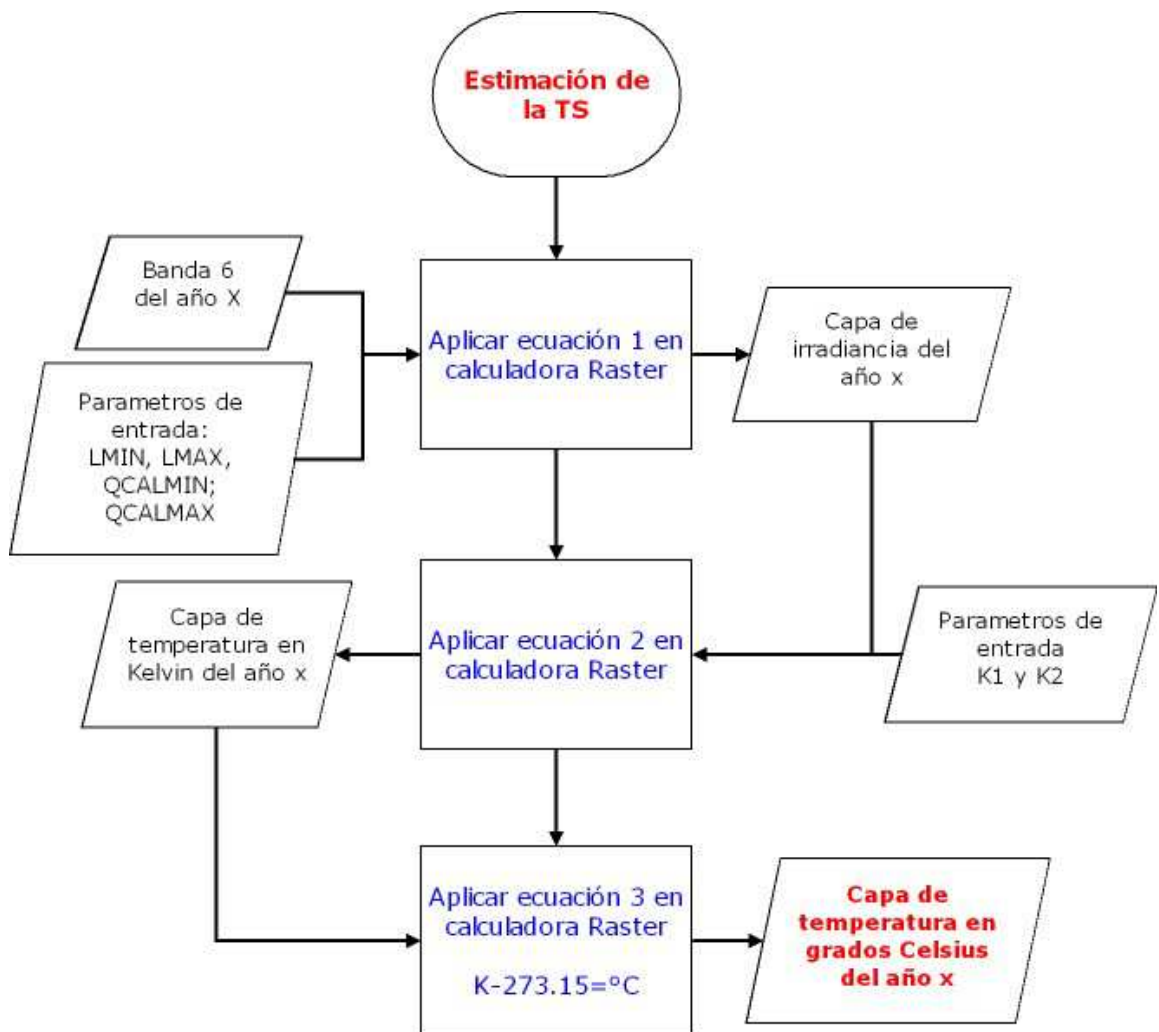


Ilustración 18. Diagrama de flujo para la estimación de la TS

Una vez calculada la temperatura superficial en grados Celsius se puede modificar la simbología de la capa para facilitar la observación y diferenciar la temperatura. En este caso se estableció una escala que fuera de azul a rojo. El azul representando los lugares más fríos y el rojo los más cálidos (ver Ilustración 19). Este mapa muestra, a simple vista, la aparición del fenómeno de isla de calor.

Este procedimiento se repitió para las cuatro imágenes satelitales. Los resultados completos se muestran más adelante en el capítulo 4, discusión de resultados.

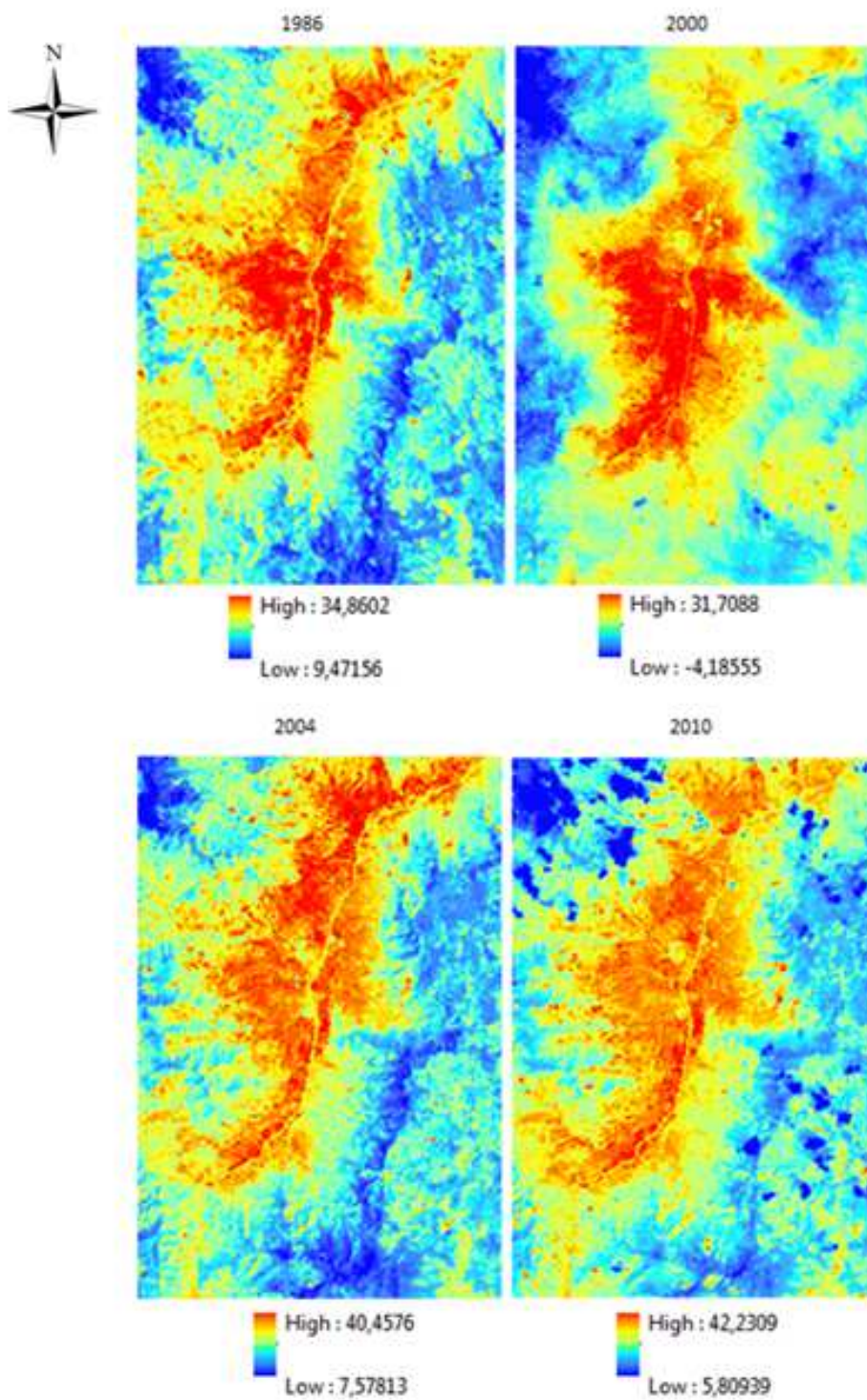
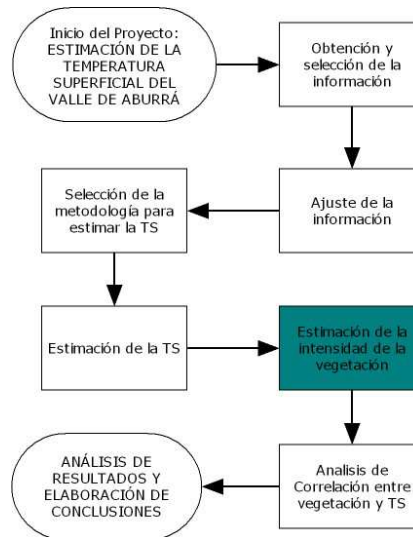


Ilustración 19. Temperatura superficial del valle de Aburrá 1986-2010

3.5 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE LA VEGETACIÓN



Como ya se mencionó, para calcular la intensidad de vegetación se utilizó la ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

En la ecuación se sustituyeron los valores de las bandas 3 (rojo) y 4 (NIR). Esta ecuación funciona tal y como se explicó en la sección F del marco de referencia (Determinación de intensidad de vegetación). Para este cálculo se utilizó el software ERDAS y el procedimiento se muestra en la Ilustración 20.

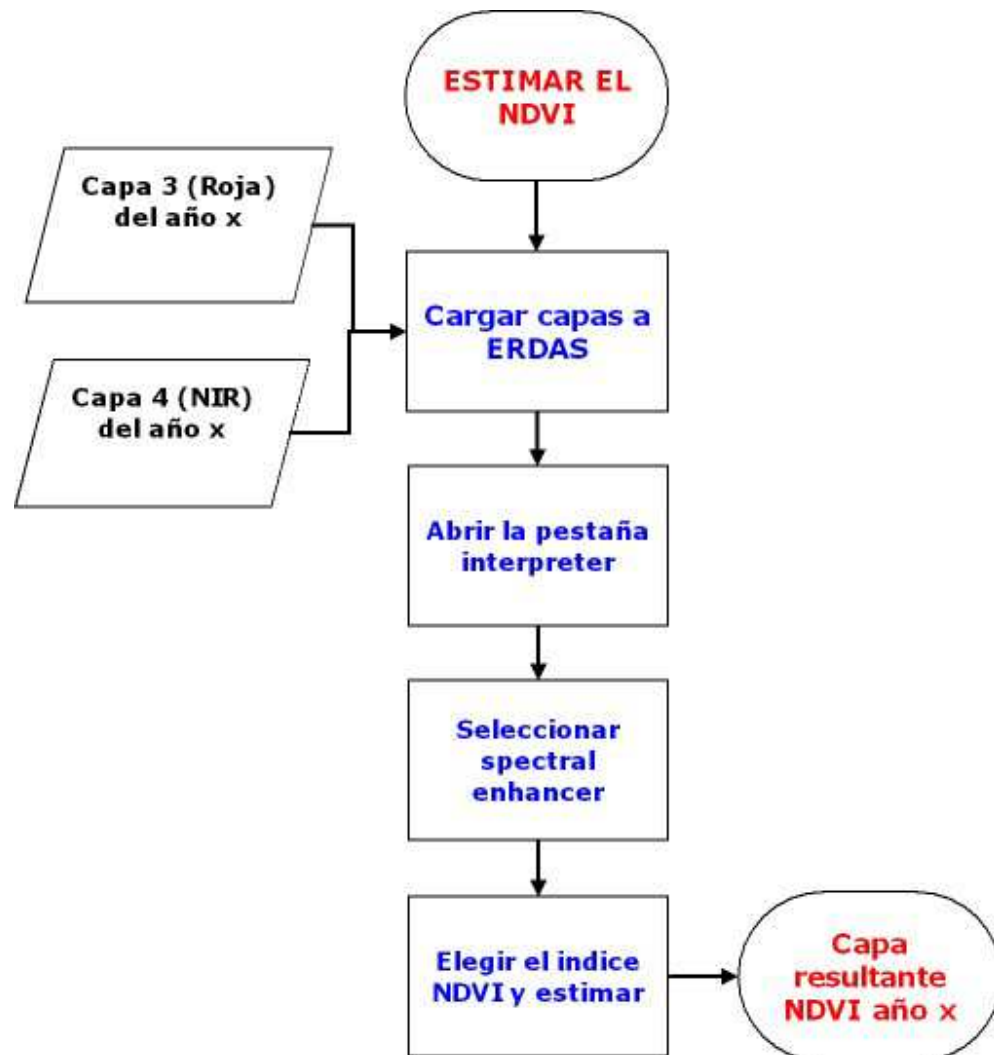


Ilustración 20. Procedimiento para la obtención del NDVI en ERDAS

La Ilustración 21 las imágenes procesadas para obtener el índice NDVI. En este mapa el color verde representa la vegetación, mientras que el color café representa estructuras diferentes a la vegetación.

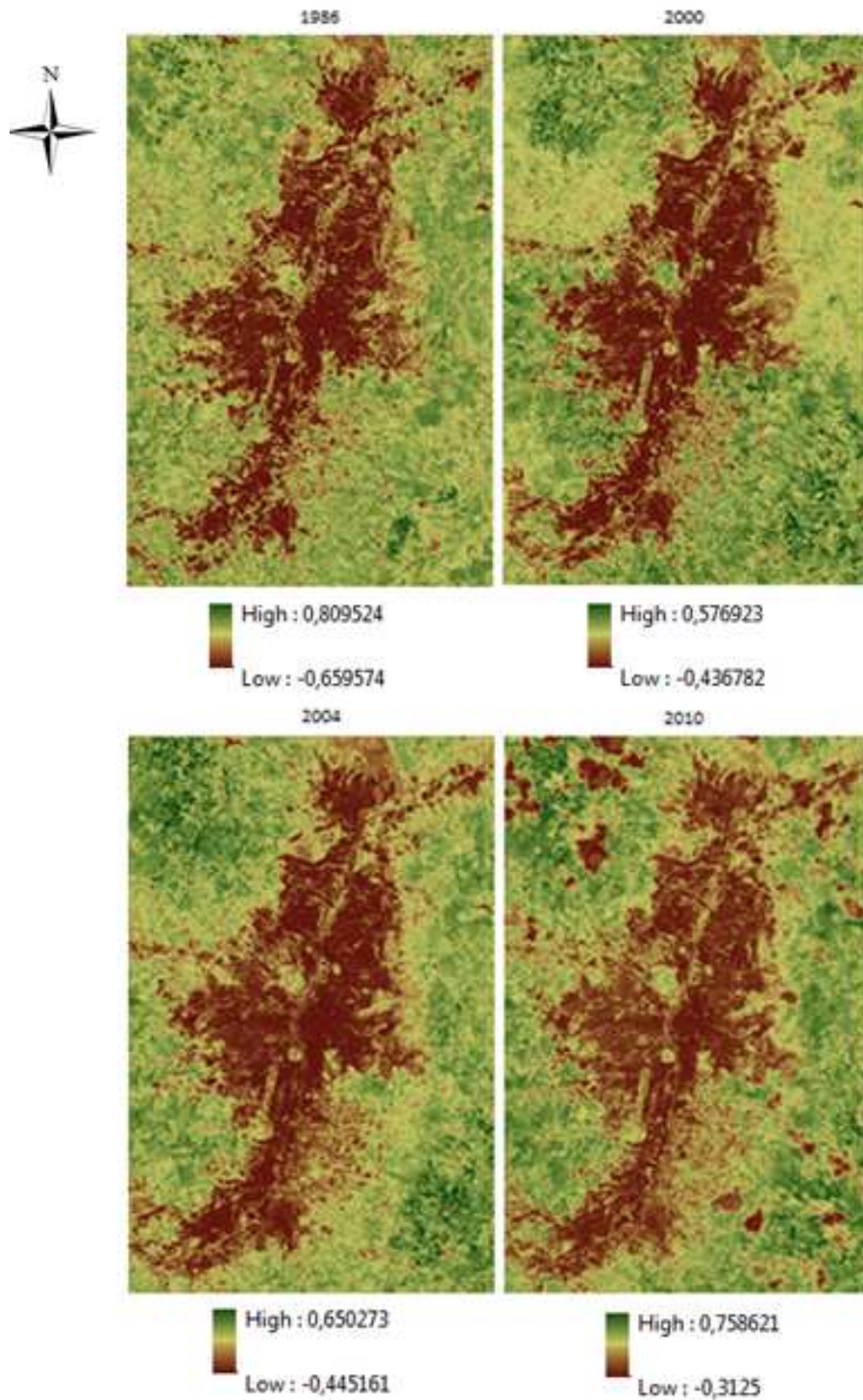
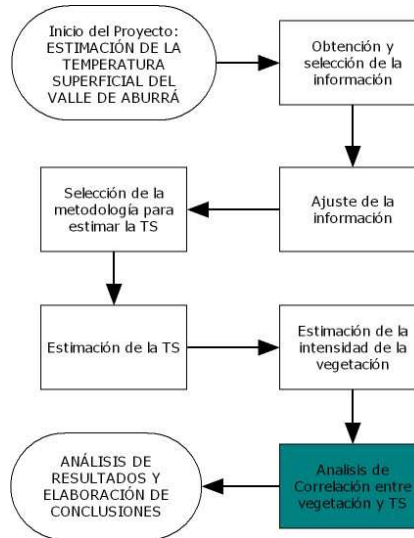


Ilustración 21. NDVI 1986-2010 valle de Aburrá

3.6 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN



La correlación entre los valores del indicador NDVI y la temperatura superficial se realizó utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (Z_{ik} - \mu_i) (Z_{jk} - \mu_j)}{N - 1}$$

- Dónde:
 Z - valor de la celda
 i,j - las capas
 μ - el promedio de la capa
 k - número de celda en particular

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j}$$

- Dónde:
 Cov_{ij} – Es la covarianza entre las dos capas
 δ_i - Desviación estándar de la capa i
 δ_j - Desviación estándar de la capa j

Estas ecuaciones implican que la correlación variara entre -1 y 1, donde 1 significa una correlación positiva (es decir, al incrementarse una variable se incrementa la otra) y -1 una correlación negativa (al incrementarse una variable disminuye la otra). Los valores de correlación obtenidos para los diferentes años pueden observarse en la Tabla 11.

Tabla 11. Correlación NDVI y TS

Valores de Correlación	
Año	Correlación
1986	-0,60330
2000	-0,47199
2004	-0,62702
2010	-0,39179

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ESTIMACIÓN DE LA TS

En la Tabla 12 se resumen los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones para la estimación de la temperatura superficial. Se presentan la temperatura mínima, máxima y promedio en grados Celsius. Para ver la imágenes de TS ir a la Ilustración 19.

Tabla 12 Temperaturas estimadas para el Valle de Aburrá en °C

Fecha de Información	Tmin	Tmax	Tprom
08/09/1986	9,47	34,86	20,8
21/08/2000	-4,18	31,71	12,9
06/02/2004	7,58	40,46	22,2
21/01/2010	5,81	42,23	23,06

La información obtenida sugiere que existe un incremento de temperatura en el valle de Aburrá entre 1986 y 2010. No obstante, este aumento puede deberse a múltiples factores como las variaciones normales de temperatura entre las épocas del año. La zona de estudio, de hecho, se encuentra en una zona de convergencia intertropical (ZCIT). El ZCIT es un fenómeno climático generado por la confluencia entre los vientos alisios del noreste y sureste que causan que los vientos asciendan formando corrientes que transportan aire hacia la parte alta de la troposfera (ver Ilustración 22). El ZCIT se mueve hacia el norte o sur del ecuador en diferentes periodos del año, lo cual causa variaciones climáticas en todo el mundo.

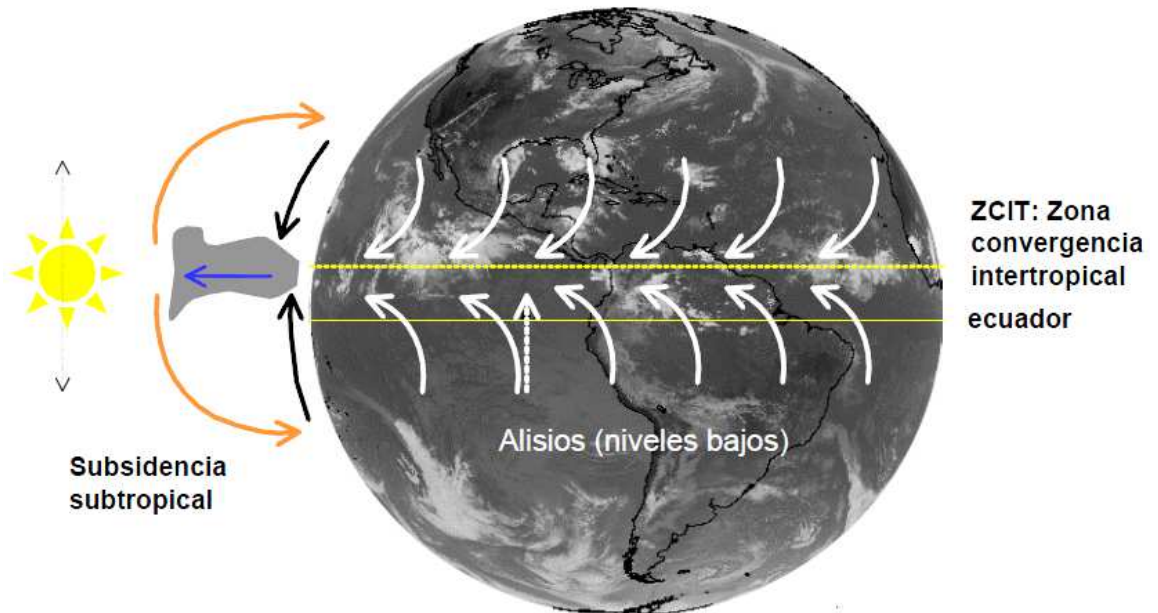


Ilustración 22. Representación del ZCIT (Estrada, 2010)

En el valle de Aburrá, los movimientos del ZCIT a lo largo del año generan un comportamiento cíclico en las lluvias, con dos picos altos y dos bajos (ver Ilustración 23). En esta imagen pueden apreciarse los picos bajos y altos de precipitación promedio. Los picos bajos en enero y julio pueden asociarse con temperaturas más altas, mientras que los picos altos en mayo y octubre pueden asociarse a temperaturas más bajas, ya que factores como la mayor nubosidad y precipitación influirán en el intercambio calórico de las superficies.

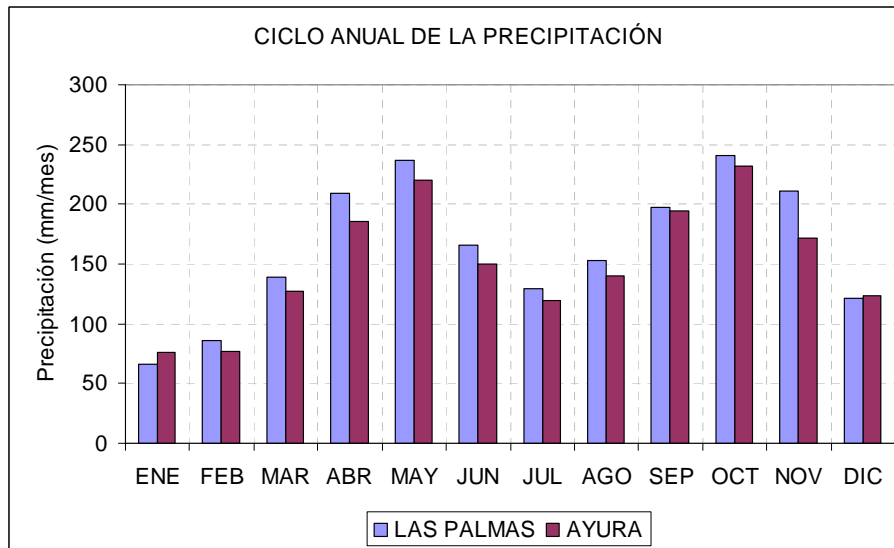


Ilustración 23. Precipitación mensual valle de Aburrá 2008 (Estrada, 2010)

Con el fin de eliminar o minimizar la influencia de una variable como el ZCIT de un análisis de este carácter, lo óptimo sería la obtención de información que corresponda al mismo periodo del año. No obstante, esto no establece que los valores no vayan a verse afectados por otras variables climáticas pues estas son poco predecibles y existe una gran variedad, tales como el fenómeno del niño o la niña, tormentas tropicales y monzones.

Considerando lo anterior, resulta evidente que el número de imágenes analizadas no es suficiente para obtener resultados concluyentes. Desafortunadamente, no fue posible conseguir información para la misma época del año, ni un gran número de imágenes, ya sea porque la información no está disponible o porque la zona de interés se encuentra cubierta por nubes gran parte del año.

4.2 ESTIMACIÓN DEL NDVI

En Tabla 13 se resumen los valores NDVI promedios de cada una de las capas y en la Ilustración 21 de la sección 3.5 pueden observarse las imágenes procesadas.

Tabla 13. NDVI promedio 1986-2010 valle de Aburrá

Fecha	NDVI
08/09/1986	0,3799
21/08/2000	0,0894
06/02/2004	0,1308
21/01/2010	0,2768

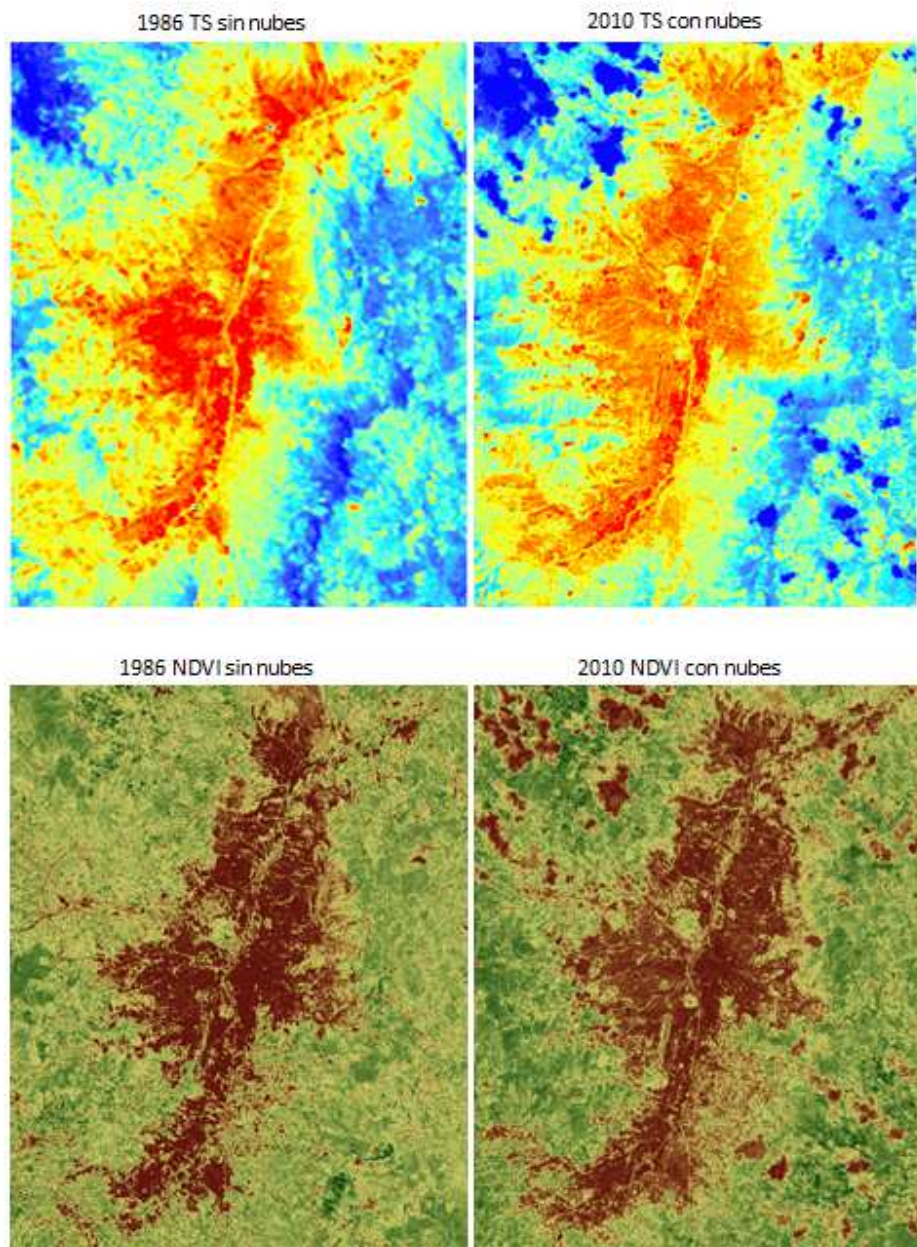
Los resultados demuestran que la intensidad de la vegetación era mayor en 1986, pero que vuelve a subir en el año 2010 con respecto al 2000 y 2004. Esto se debe a que este promedio no estima la cantidad de vegetación que existe en una zona sino su intensidad, por lo que es perfectamente posible que en el año 2010 la vegetación estuviera más sana o madura que en el 2000 y 2004, pero no que hubiera mayor porcentaje.

4.3 CORRELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA VEGETACIÓN Y LA TS

Los valores de la Tabla 11 indicaron que los valores de 2000 y 2010 presentan una correlación baja. Los valores de TS de año 2000 resaltan por ser bajos (lo que puede deberse a condiciones climáticas particulares), en tanto que los valores del año 2010 se ven afectados, como se mencionó, por la presencia de nubes.

La correlación entre el índice NDVI y la TS se ve afectada si existen nubes en la imagen satelital, ya que el índice NDVI toma un valor de -1 donde hay nubes, lo que no significa que en el terreno exista una ausencia total de vegetación. Por otra parte, el sensor Landsat registra la temperatura de la superficie de las nubes, la cual es considerablemente inferior a la de la superficie terrestre, lo que también afecta el cálculo. Para comprender mejor como influyen las nubes en la correlación ver la Ilustración 24.

Ilustración 24 Imágenes con nubes y sin nubes



Para eliminar las nubes de la correlación se clasificaron las imágenes Landsat utilizando un procedimiento de clasificación supervisada y la ecuación de Mahalanobis, la cual es comúnmente utilizada para clasificar los usos del suelo. Esta clasificación fue validada, encontrándose una confiabilidad de 88,8%; es decir, 88,8% de los puntos de control clasificados (un total de 250 puntos fueron analizados) representaban correctamente las coberturas en el terreno.

Con la clasificación de coberturas fue posible eliminar las nubes (ver Ilustración 25). Posteriormente, se volvió a correlacionar la información para el año 2010. El resultado obtenido se puede ver en la Tabla 14, la cual es mucho mayor que la anterior.

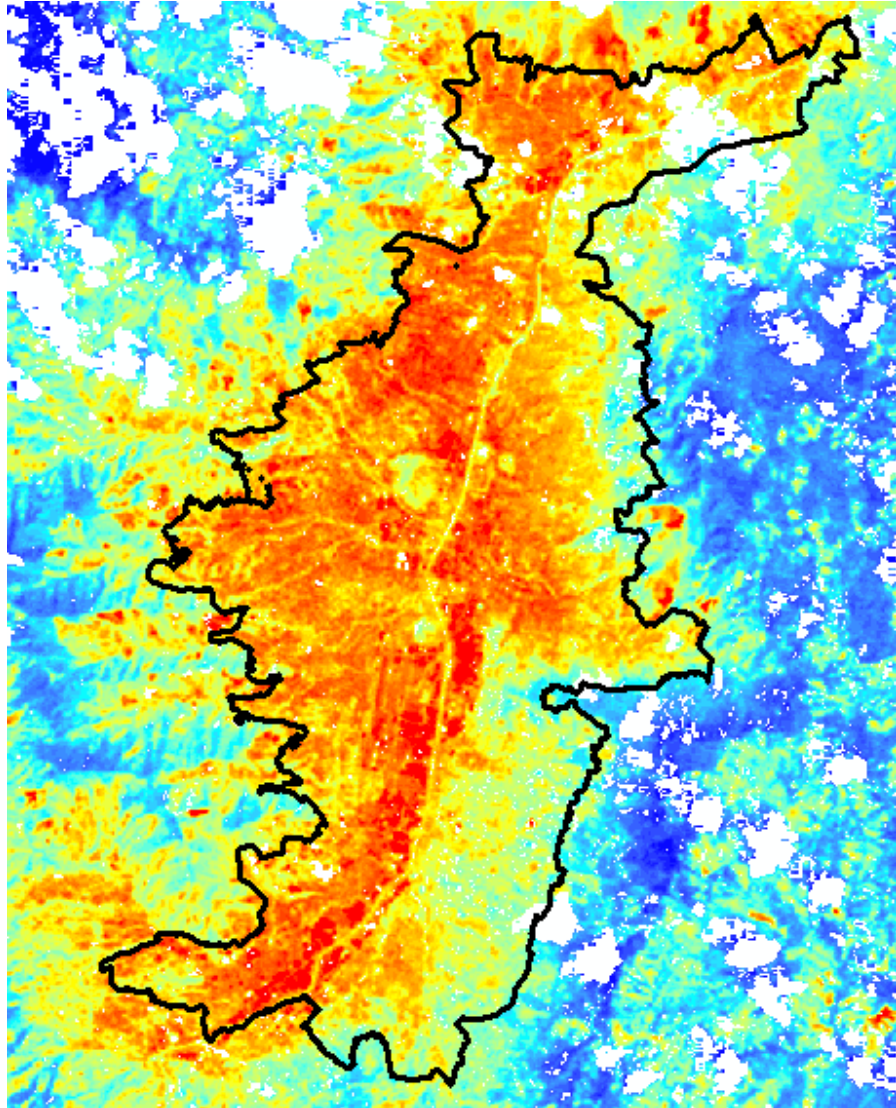


Ilustración 25. TS 2010 Valle de Aburrá sin nubes

Tabla 14 Correlación NDVI y TS 2010 sin nubes

Año	Correlación
2010	-0,73486

Las correlaciones obtenidas representan una relación inversa, ya que a medida que la temperatura aumenta el valor del NDVI disminuye, indicando que donde hay temperatura más altas hay superficies diferentes a la vegetación y donde las temperaturas son menores hay vegetación. En general la correlación indica que existe una relación moderada, pues esta varía entre los -0,47 y -0,73 y se considera moderada cuando va desde los (0,5 a 0,8) (Arango, 2012).

4.4 ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ISLA DE CALOR SUPERFICIAL PARA EL VALLE DE ABURRÁ

Como se estableció en la hipótesis, era de esperarse que con la disminución de la vegetación, que puede ser reemplazada por superficies duras, se encuentre un patrón que indique un aumento en la temperatura superficial. Para comparar los datos se realizaron varios análisis que permitieran sacar conclusiones de la zona en general y de sectores específicos del espacio analizado.

La Tabla 15 muestra los valores obtenidos para el índice de isla de calor urbana utilizando la temperatura superficial promedio de la zona urbana y la zona rural, así como el índice de isla de calor (UHII) obtenido por la diferencia entre ambas.

Tabla 15 Índice de isla de calor urbano Valle de Aburrá

Fecha	TSPU	TSPR	UHII
1986/09/08	24,89°C	19,36°C	+5,53°C
2000/08/21	18,90°C	10,72°C	+8,18°C
2004/02/06	26,55°C	20,68°C	+5,87°C
2010/01/21	28,04°C	21,25°C	+6,67°C

TSPU: Temperatura superficial promedio urbana.

TSPR: Temperatura superficial promedio rural.

UHII: Urban Heat Island Index (Índice de isla de calor urbana)

De nuevo se realiza una corrección de nubes para la imagen del 2010 con el fin de estimar el UHII sin el error generado por estas. En la Tabla 16 pueden observarse el UHII cuando se eliminaron las nubes de la imagen.

Tabla 16 UHII 2010 sin nubes

Fecha	TSPU	TSPR	UHII
2010/01/21	28,25°C	22,06°C	+6,19°C

Los valores indican que la temperatura superficial promedio, tanto del área urbana como del área rural, ha ido en aumento y que la diferencia entre éstas, es decir, el índice UHII, también se ha incrementado. Esto nos indica que aunque las imágenes se hayan tomado en épocas diferentes del año, donde pudo haber existido una radiación solar diferente, la isla de calor urbana estuvo presente en el valle de Aburrá y va en aumento. En la Ilustración 26 se muestra el límite urbano del valle de Aburrá del año 2009, el cual fue utilizado en cada una de las imágenes para realizar este análisis y obtenido de la base de datos de información georreferenciada de la Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Al analizar los resultados obtenidos puede verse que aunque la diferencia entre la zona urbana y rural disminuyó unos 0,48 °C, sigue siendo 0,66 °C mayor que la que se presentó en 1986. El resto de las capas no presentan una nubosidad que justifique realizar correcciones (tal y como se puede apreciar visualmente en la Ilustración 17, en donde las manchas negras representan las nubes) por lo tanto se conservan los mismo valores.

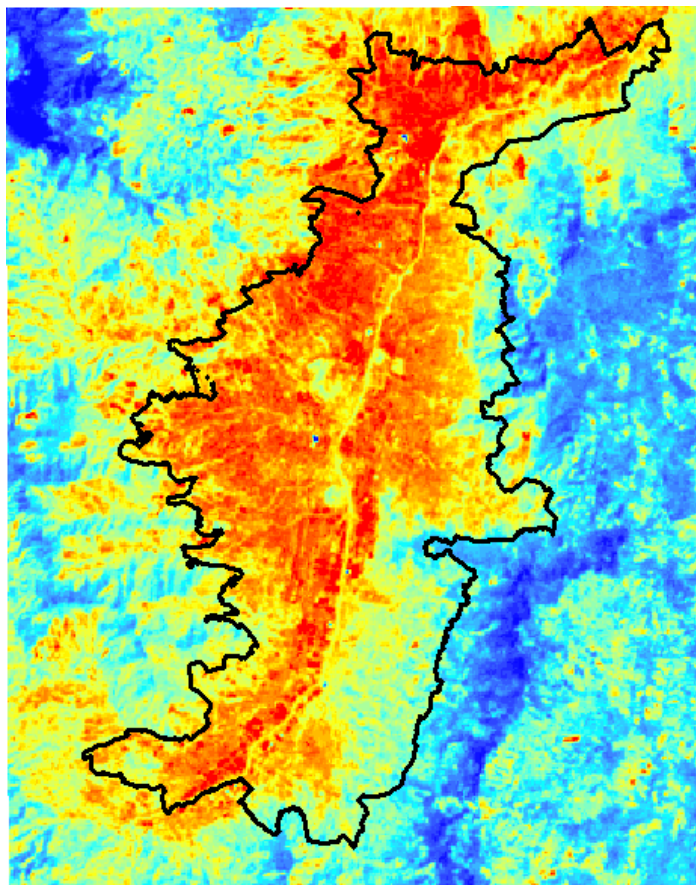


Ilustración 26. TS urbana vs rural para el año 2004 en el valle de Aburrá

4.5 COMPARACIÓN ENTRE COMUNAS

En esta parte del estudio se optó por realizar análisis un poco más localizados y observar el comportamiento de las variables a una escala de mayor detalle. En este caso se realizó una comparación entre la comuna de El Poblado y Robledo, el motivo por el cual se eligieron estas dos comunas para el análisis se debe a que ambas zonas han tenido un desarrollo significativo entre 1986 y 2010, pero con una leve diferencia, El Poblado se ha desarrollado en altura, mientras que Robledo ha crecido más de manera horizontal. El crecimiento en altura, como se estableció en la sección 1.3, tiene un efecto conocido como cañón urbano, el cual tiene ciertas influencias sobre la isla de calor. Durante el día actúa de manera positiva al proveer sombra, pero durante la noche hace que el aire se caliente más al evitar que este salga con facilidad.

A continuación se presentan la Ilustración 27 e Ilustración 28, donde puede observarse el comportamiento que tienen las capas de TS y NDVI durante el periodo de estudio (1986-2010). En ambas comunas puede evidenciarse la disminución de la cobertura vegetal y como la temperatura superficial promedio aumenta. No obstante el efecto esperado puede observarse, pues en la comuna El Poblado la temperatura superficial promedio siempre es dos o tres grados menor que en Robledo, inclusive en los años donde el NDVI promedio es mayor en la comuna de Robledo o muy similar a la de El Poblado. Esto puede ser un indicador que demuestre que el crecimiento en altura ayudara a prevenir que la temperatura superficial de una zona en general sea muy alta, pero hay que tener presente que durante la noche el efecto contrario ocurre, por lo que si construir en altura o en extensión es mejor dependerá de las especificaciones de la zona. Los resultados del análisis se pueden apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17. Comparación entre la comuna El Poblado y Robledo NDVI vs TS

Comuna	Fecha	Tprom	NDVIprom
El Poblado	08/09/1986	22,43	0,309
Robledo	08/09/1986	24,68	0,29
El Poblado	21/08/2000	19,83	0,02
Robledo	21/08/2000	16,39	0,00
El Poblado	06/02/2004	23,24	-0,033
Robledo	06/02/2004	27,00	-0,026
El Poblado	21/01/2010	25,52	0,15
Robledo	21/01/2010	28,31	0,17

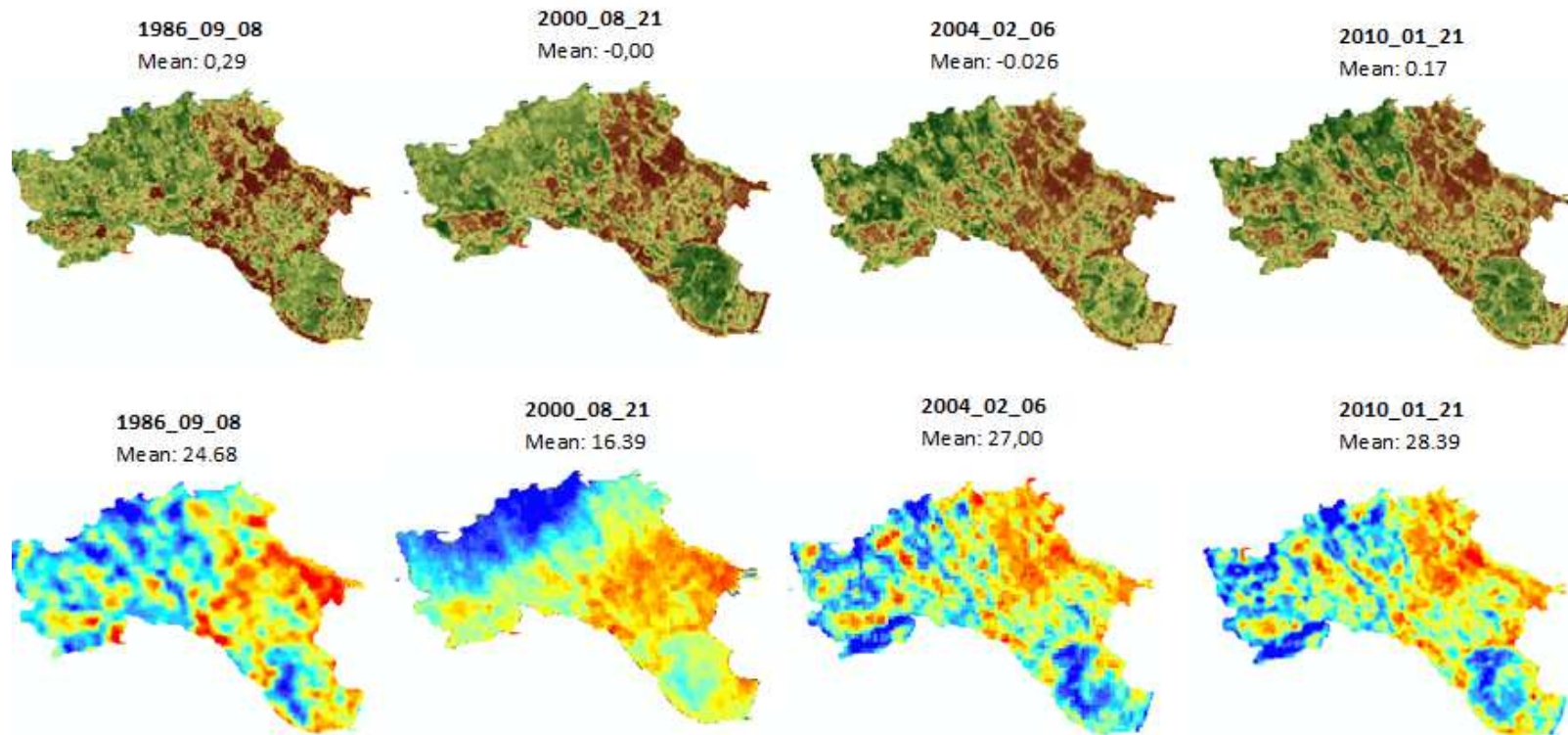


Ilustración 27. NDVI vs TS para el barrio Robledo

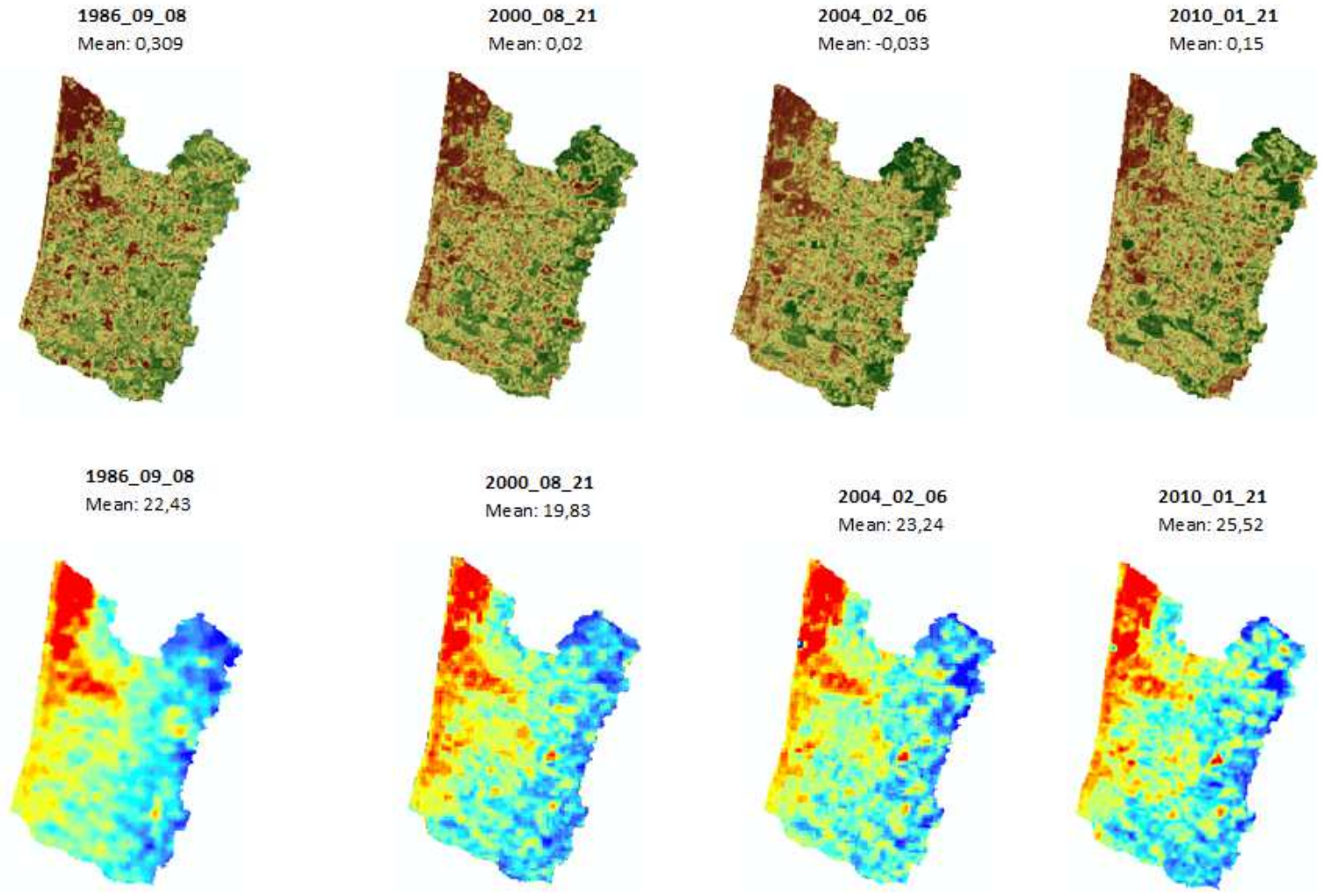


Ilustración 28. NDVI vs TS barrio El Poblado

4.6 OBSERVACIONES PUNTUALES

En todas las imágenes hay ciertas zonas puntuales que llaman la atención de manera inmediata porque ilustran de manera clara la temperatura superficial que pueden tener los diferentes tipos de cobertura. A continuación se presentan la Ilustración 29 temperatura superficial con algunas zonas de interés observadas, las cuales fueron analizadas para ver de qué tipo de superficie se trataba.

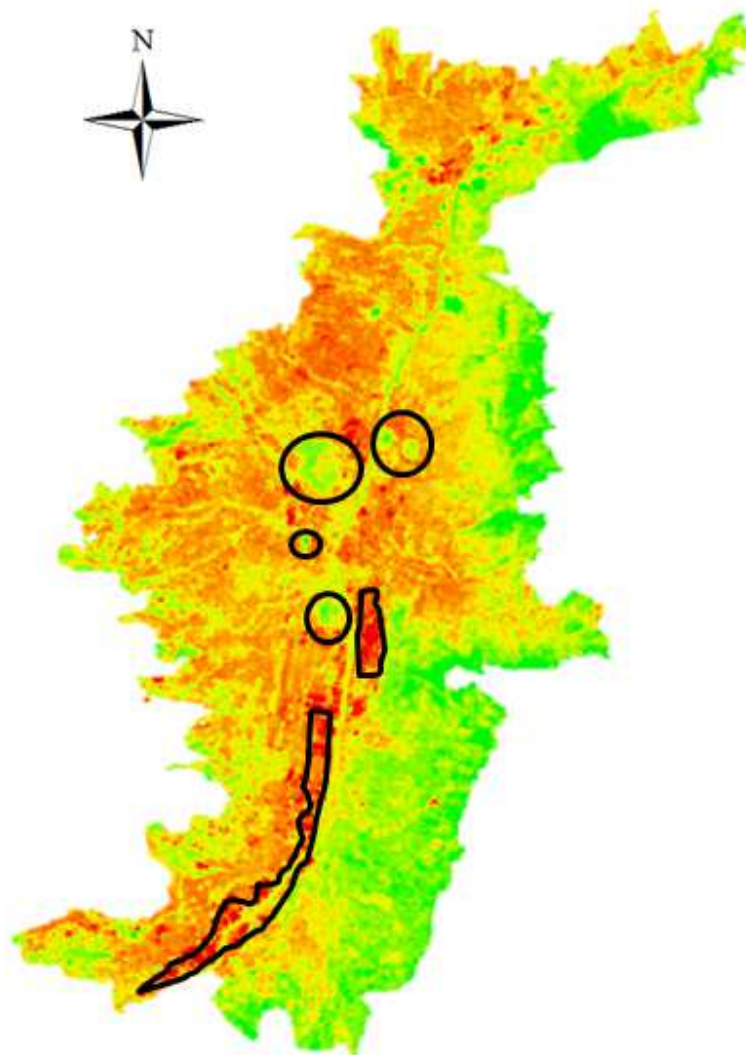


Ilustración 29. Zonas identificadas del valle de Aburrá 2010

Las superficies de baja temperatura identificadas son:



Ilustración 30. El estadio Atanasio Girardot con una TS promedio de 21.8°C (Pineda)



Ilustración 31. El parque Norte y el Jardín Botánico de Medellín, con una TS promedio de 23.2°C (Vidal)



Ilustración 32. Cerros El Volador y Nutibara con una TS promedio de 23.8°C y 23.2°C respectivamente (Vidal)

Las superficies identificadas que tienen una alta temperatura son:



Ilustración 33. Zona industrial del Barrio Colombia con una TS promedio de 34.9°C (Vidal)



Ilustración 34. Zona industrial de la autopista y el municipio de Itagüí con una TS promedio de 34.5°C (Google, 2010)

Las zonas industriales cubiertas en su mayoría por techos de color gris tienen una temperatura superficial entre 12 y 14°C mayor a la de las zonas verdes que hallamos dentro de la ciudad. Esto demuestra en casos puntuales que la diferencia en la TS entre las diferentes estructuras tiene un valor considerable. Estos datos arrojan importantes resultados en cuanto al confort térmico dentro de las instalaciones como oficinas o fábricas, pues una temperatura superficial mayor aumentara la temperatura interna de estas estructuras, obligando a quienes las habitan a utilizar más los equipos de aire acondicionado, con el fin de mantener las condiciones de trabajo óptimas. Los resultados resumidos de este análisis se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Observación de puntos específicos en el valle de Aburrá

Lugar	T promedio
Estadio	21,8
Cerro Volador	23,8
Cerro Nutibara	23,2
Parque norte	23,2
Zona industrial Itagui	34,5
Barrio Colombia	34,9

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En general puede concluirse que el valle de Aburrá es una zona con un índice de isla de calor urbano superficial de aproximadamente 6 °C. Esto implica que la zona urbana esta 6 °C más caliente que las zonas rurales circundantes y aunque el tamaño de la muestra analizado es insuficiente, al parecer este índice va en aumento. A rasgos generales habitar una zona 6 °C más caliente que las zonas rurales circundantes implica un mayor consumo energético, una disminución en la calidad de vida y el aumento de enfermedades relacionadas al calor. Adicionalmente, esto tendrá un efecto en la temperatura atmosférica, en especial durante noche, donde todas las estructuras liberan el calor calentando el aire.

En cuanto a la correlación que existe entre la vegetación y la temperatura superficial, se puede establecer que tienen una correlación moderada. Esto indica que la TS depende en cierto grado de la vegetación, pero no totalmente y que influyen varias factores climáticos como el ZCIT, el fenómeno del niño, la niña, los ciclos intranuales de precipitación y otros más. El hecho que la TS dependa en cierto grado de la vegetación indica que puede presentar una solución a la disminución de la isla de calor en cierta medida. Se concluye que el NDVI, aunque sirve como variable para definir si la TS depende de la vegetación, no es la variable más recomendable para realizar dicho análisis. Se recomienda entonces que se realice una clasificación de las coberturas superficiales y posteriormente se correlacione ese resultado con la TS.

Mediante la comparación de las comunas se pudo establecer que un crecimiento en altura proporciona unas condiciones positivas en cuanto a disminuir la isla de calor se refiere. Esto se debe a la sombra que proporcionan los edificios a los corredores viales, lo cual se conoce como el efecto de cañón urbano. Por otro lado, las observaciones puntuales también arrojaron conclusiones interesantes. Inmediatamente se visualiza una diferencia de entre 12 y 14°C entre edificaciones en zonas industriales y zonas con gran cantidad de vegetación. Esta diferencia de temperatura tendrá un efecto sobre la temperatura atmosférica y una influencia aún mayor al interior de las edificaciones. De contar con una capa de mejor resolución, se podría llegar a establecer una escala de temperaturas entre las diferentes coberturas presentes, como techos blancos, techos negros, prados, arboles entre otros.

En conclusión no se puede decir con certeza si el índice de isla de calor superficial crecerá o no o si existe un aumento en la TS influenciado por el crecimiento urbano. Dicho esto el objetivo general no logra cumplirse a cabalidad, pues no se puede establecer mediante la información disponible, pero algo que sí puede concluirse es que los efectos de este fenómeno, que se presentan por el mayor calentamiento de las superficies duras, si tienen y seguirán teniendo un impacto significativo sobre la ciudad y sus habitantes. Para disminuir dichos impactos se presentan las siguientes estrategias utilizadas alrededor del mundo para mitigar las islas de calor.

A. Techos y muros verdes

Los techos y muros verdes son en síntesis una capa vegetal que crece sobre el techo o muro de una edificación. Al proveer a la estructura con una **sombra** contra los rayos del sol y por medio de la **evapotranspiración**, las plantas sobre estas estructuras pueden enfriar tanto la temperatura superficial como atmosférica. A continuación se explica a mayor detalle porque los techos verdes permiten una reducción en la temperatura tanto superficial como del aire (EPA, 2011).

Dotación de sombra: al estar sobre la estructura (techo o muro), las plantas y el sustrato ayudan a bloquear los rayos del sol y evitan que calienten la estructura, disminuyendo así la temperatura superficial. Debido a que las plantas no reflejan gran parte de los rayos infrarrojos estas no se calientan tanto, y pueden conseguir reducciones que varían entre los 11 y los 25 °C con respecto a estructuras descubiertas (EPA, 2011). Esto se traduce en una temperatura interna menor dentro de las edificaciones, por lo que el uso de máquinas como el aire acondicionado se vería disminuido y con esto bajaría el consumo de energía.

Evapotranspiración: las plantas sobre la estructura permiten una modificación de la temperatura del aire. La transpiración (proceso en el cual las plantas absorben agua por medio de sus raíces, y la expulsan por sus hojas) y la evaporación (proceso que ocurre en la superficie de la vegetación, tallos, hojas y/o sustratos, por medio del cual hay un intercambio de calor entre el medio y la planta), en conjunto se les conoce como evapotranspiración, el cual causa que el aire se enfríe.

La Ilustración 35 muestra un diagrama de un techo verde y como este puede actuar para enfriar el entorno, en donde las plantas previenen que el sol alcance la estructura y el agua evapotranspirada enfría el aire.

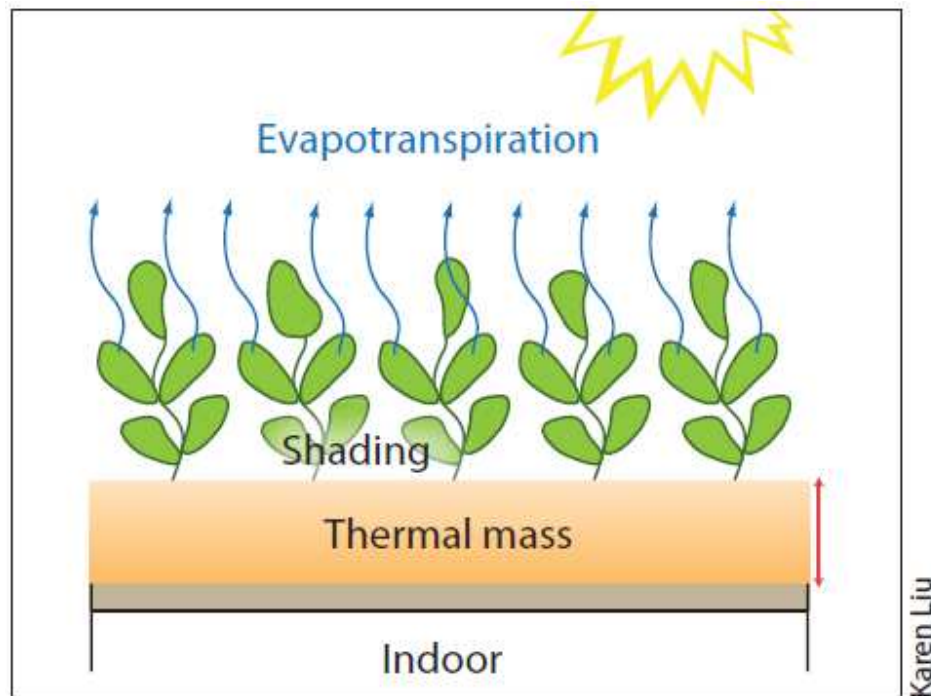


Ilustración 35. Techo verde: dotación de sombra y evapotranspiración (EPA, 2011)

Para evidenciar los efectos de los techos verdes, no solo en teoría sino en la realidad, se llevaron a cabo varios estudios durante el verano en algunas ciudades de Estados Unidos, en donde se comparaba la temperatura de techos verdes con aquella de techos adyacentes negros o de color. En Chicago, IL un techo verde tenía una temperatura superficial que variaba entre los 33 y los 48 °C, mientras que los techos negros adyacentes tenían temperaturas de 76 °C. Por otro lado la temperatura del aire sobre los techos verdes es hasta 4 °C menor que sobre los techos convencionales adyacentes. En Florida un estudio similar dio como resultado una temperatura superficial para los techos verdes de 30 °C, mientras que los techos de color tenían una temperatura de 57 °C. En la Ilustración 36 se muestra una imagen normal a al lado de una imagen térmica con diferentes estructuras para visualizar la temperatura superficial de estas. La imagen muestra una edificación en la ciudad de Chicago, en donde se demuestra el contraste de temperaturas entre un techo verde y uno convencional. (EPA, 2011)



Ilustración 36 Imagen térmica comparando un techo verde y uno techo común (EPA, 2011)

Estos estudios demuestran que los techos verdes no son solo aplicaciones para hacer ver mejor una estructura, o por una simple aspiración de conservar el medio ambiente, sino que constituyen medidas funcionales para el entorno en el que vivimos.

B. Arborización

Como ocurre con los techos y muros verdes, los árboles y otro tipo de vegetación en las calles y parques ayudaran a mantener la temperatura más baja por medio de la sombra y la evapotranspiración. Durante este estudio se pudo observar que las zonas con alto índice de vegetación evidentemente tenían una menor temperatura, como por ejemplo los cerros, el jardín botánico y el parque norte. Durante las épocas más calientes los arboles ayudan a absorber y reflejar gran parte de la radiación solar antes de que alcance la superficie, logrando que llegue solo entre el 10 y el 30 % de la que lo hace normalmente.

Los científicos han logrado identificar varias estrategias en cuanto al uso de los árboles para mitigar el calor en las edificaciones (EPA, 2011). Una de esta estrategias es plantar los árboles en las caras oeste y este de las edificaciones, ya que el movimiento del sol se da de oriente a oeste y de esta manera se aprovechara la sombra del árbol lo más que se pueda (EPA, 2011). En el ecuador no tiene muchos sentido plantar árboles en las caras norte o sur de las edificaciones ya que el ángulo del sol no variará mucho. Antes de plantar un árbol hay que tomar en cuenta factores como la altura del edificio y su extensión, de modo que se elijan las especies de árbol correctas y la distancia adecuada para que provean la mayor cantidad de sombra posible a éstas. A continuación se presenta la Ilustración 37 que ejemplifica cómo pueden organizarse los árboles para mitigar ciertos efectos del clima. En la imagen se muestra como ciertos tipos de árbol se plantan en el lado este u oeste de las casas para protegerlas del sol, pero también como ciertos árboles se plantan en el lado norte para mitigar el efecto de los vientos invernales. La imagen ejemplifica la situación de una vivienda en un país con estaciones, pero en el caso del valle de Aburrá se pueden excluir estas aplicaciones del diagrama, aunque para zonas más frías de la región si pueden aplicarse estrategias de este tipo.

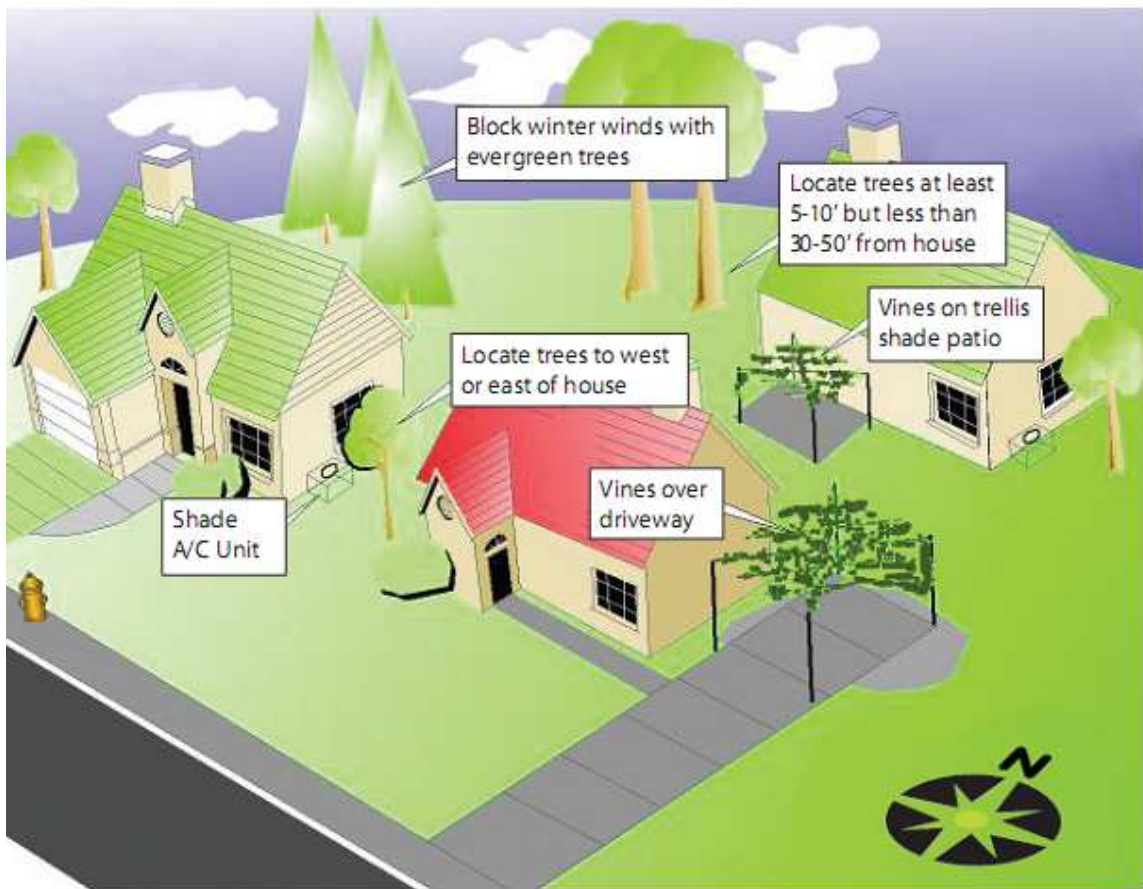


Ilustración 37 Ubicación de los árboles para mitigar la isla de calor (EPA, 2011)

Los beneficios que se pueden obtener al aplicar este tipo de estrategias son el ahorro en el consumo de energía, una mejor calidad del aire y mejor calidad de vida. El ahorro de energía contribuye a disminuir la contaminación por la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero, mientras que los mismos árboles, al tiempo que disminuyen la temperatura, limpian el aire de CO₂.

C. Techos fríos

Como se presentó en la Ilustración 3, la radiación solar que llega a la superficie terrestre se divide en varias longitudes de onda, estas son la ultravioleta que aporta el 5% de la radiación, la luz visible que aporta un 43% y un 52% que se compone de radiación infrarroja, la cual en parte se siente en forma de calor. Estas radiaciones son las que interactúan con las superficies terrestres e incrementan su temperatura, por lo tanto no es suficiente con reflejar solo la luz visible, sino que hay que concentrarse más en la parte del espectro de la luz infrarroja. (EPA, 2011)

Los techos fríos son techos construidos con materiales más reflectivos y emisivos, los cuales puede llegar a permanecer entre 28 y 33 °C más frescos que los techos comunes durante el verano. Para crear un techo frío se requieren materiales con un albedo (% de energía solar reflejada por una superficie) alto. Mientras que los materiales comúnmente utilizados reflejan solo entre el 5 al 15%, los techos fríos pueden reflejar hasta el 65% de la energía solar, lo cual indica que solo el 35% se transfiere a la estructura, esta radiación reflejada incluye toda la radiación que llega a la tierra, no solo la luz visible.

Pero no solo la reflectividad solar es importante en estos materiales, también hay que tener en cuenta la emisividad térmica de estos. La emisividad térmica se define como la cantidad de calor que una estructura es capaz de irradiar por unidad de área a una temperatura dada. Cualquier superficie que se encuentre expuesta a una radiación de energía, comenzará a calentarse hasta alcanzar el equilibrio térmico, lo que implica que la superficie entrega la misma cantidad de calor que recibe. Por lo tanto una superficie con alta emisividad llegara a un equilibrio térmico más rápido que una con baja emisividad, ya que la de alta emisividad entrega el calor con mayor facilidad. En conclusión una superficie con mayor emisividad constituirá un techo más frío.

A continuación se presenta la Ilustración 38 donde se ejemplifica como los diferentes tipos de techos, emiten y reflejan la radiación solar. En la ilustración se observa como un techo negro a la izquierda con una temperatura de 82.2 °C refleja solo el 5 % y emite el 92 %, mientras un techo metálico en el medio con una temperatura de 71.1 °C refleja un 60 % y emite solo un 25 % y un techo blanco a la derecha con una temperatura de 48.8 °C refleja un 75 % y emite un 92 % (EPA, 2011). Estos datos son una representación de un día soleado, pero no pueden ser confundidos con datos reales.

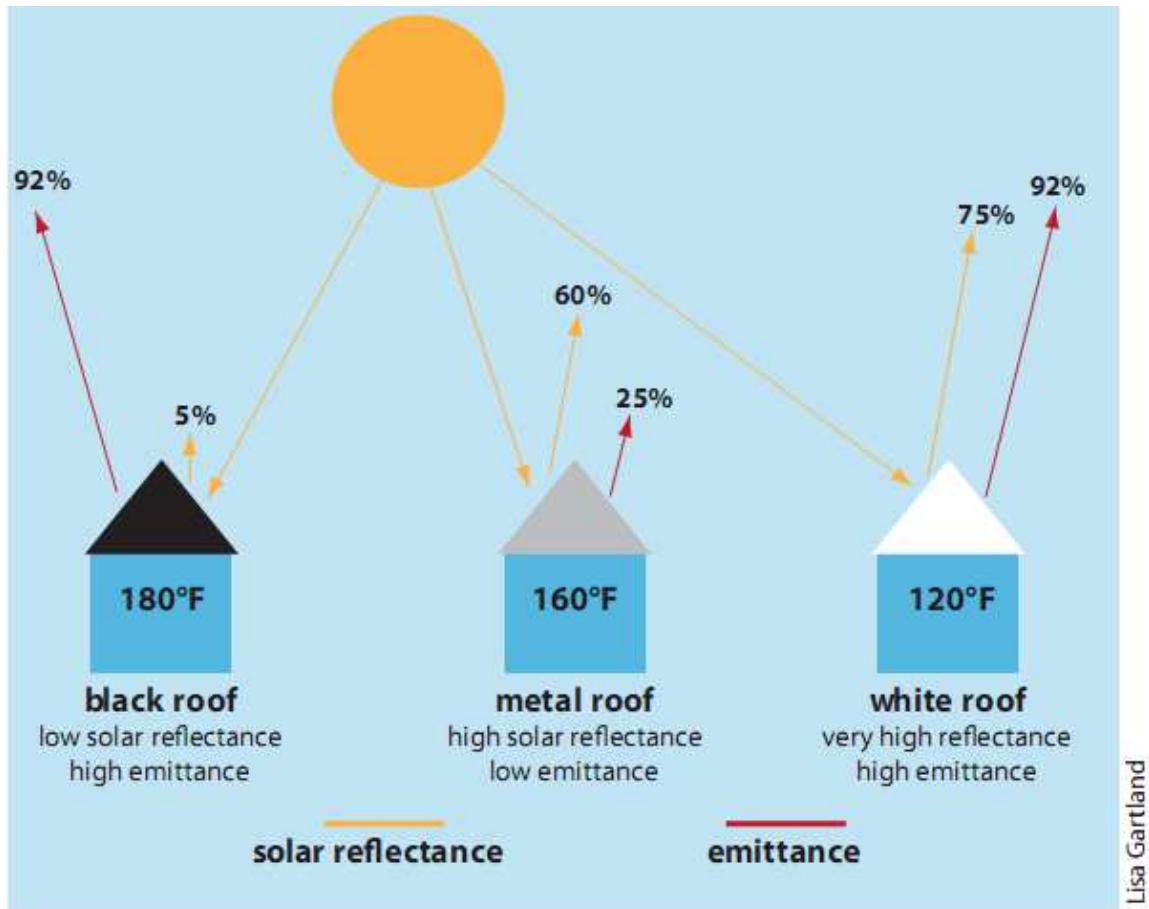


Ilustración 38 Emisividad y reflectancia de los diferentes tipos de techo (EPA, 2011)

Al igual que con los árboles o los techos verdes, los techos fríos tienen los mismos beneficios, disminución en el consumo energético, mitigación de los gases de efecto invernadero y un aumento en la calidad de vida (EPA, 2011).

D. Pavimentos fríos o permeables

Al igual que con los techos fríos, los pavimentos fríos se ven afectados por el tipo de material del que están contruidos y mientras mayor albedo y emisividad tenga mejor será el resultado. Los pavimentos fabricados de asfalto o concreto reflejan entre el 5 y 40 % de la radiación solar, siendo los de concreto mejores, pero se encontró que la reflectancia del asfalto aumenta con la edad, mientras que la del concreto tiende a disminuir (EPA, 2011). Desafortunadamente hasta el momento no existen materiales para la construcción de pavimentos que replacen los actuales, aun cuando los investigadores han logrado colorear pavimentos que logran reflejar hasta el 75 % de la radiación estos no están disponibles a nivel comercial. (EPA, 2011)

No obstante el único factor a tener en cuenta con respecto a los pavimentos no es la reflectividad o la emisividad, sino también su permeabilidad. Un pavimento común es

impermeable, lo que ocasiona que el agua por acción de la gravedad busque otro camino que por lo general termina siendo los alcantarillados, pero ahí es donde entran los pavimentos permeables. Estos pavimentos originalmente fueron creados para el control de inundaciones causadas por tormentas, pero han sobresalido por su capacidad para regular la temperatura (EPA, 2011). Estos pavimentos permiten que el agua ingrese a ciertos vacíos en su estructura y cuando se calientan esta agua se evapora manteniendo el pavimento fresco (EPA, 2011). Esta habilidad es muy similar a la evaporación presentada por las plantas (EPA, 2011).

Aun cuando los pavimentos permeables parezcan una buena opción estos solo tienen un efecto positivo mientras se encuentren mojados, pues cuando están secos por ser una superficie con mucha área de contacto tienden a calentar mucho el aire que los rodea y por otro lado sus vacíos internos almacenan aire caliente que mantiene el pavimento caliente (EPA, 2011). Debido a esto se recomienda su instalación en lugares donde llueva la mayoría del tiempo, pero se requiere mayor entendimiento de las aplicaciones y contribuciones de los pavimentos fríos y permeables antes de instalarlos (EPA, 2011).

Sugerencias

Con el fin de obtener conclusiones más contundentes que sustenten los indicios encontrados en este estudio se hacen las siguientes sugerencias:

A. Obtención de información de mejor calidad

Factores como la resolución de las imágenes, el porcentaje de nubosidad y la hora y fecha en que son tomadas las imágenes, pueden afectar estudio de manera crítica. Por eso es recomendable definir un método que elimine y/o controle estos factores y así obtener valores de temperatura superficial con mayor confiabilidad. Las imágenes deben ser obtenidas preferiblemente a las 12 de la tarde en días soleados, ya que es una hora del día donde las sombras de los edificios no afectaran la obtención de la temperatura superficial, también deben tomarse por debajo de las nubes y finalmente en fechas del año donde el clima sea similar.

Para poder obtener la información se recomienda el uso de UAV's (Unmanned Aerial Vehicles, por sus siglas en inglés), ya que pueden obtener la información en el momento que se requiera, a la altura que se requiera, con una resolución espacial menor a los 10 cm y a un bajo costo.

B. Comparación con la temperatura atmosférica

Relacionar los datos de temperatura superficial con aquellos de la temperatura del aire es de vital importancia, puesto que según la teoría, la isla de calor superficial es más intensa de día, pero la atmosférica se intensifica de noche. Esto implica que las zonas donde la superficie es más caliente pueden estar absorbiendo mayor radiación solar y por lo tanto esta no se transfiere al aire, permitiendo que el aire sea más fresco. Obtener conclusiones de estas características podría ser influyente en determinar el equilibrio correcto entre vegetación y superficies duras en las zonas urbanas con características climáticas similares a las del valle de Aburrá.

6. TRABAJOS CITADOS

- Arango, N. (5 de 11 de 2012). Docente de estadística de la EIA. (S. Trujillo, Entrevistador)
- Bustillos, L. V. (2012). *Gap Fill para imágenes LandsAT*.
- Canada Centre for Remote Sensing. (25 de 09 de 2007). <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/fundamentals/1430>. Recuperado el 10 de Marzo de 2012, de <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/fundamentals/1430>
- Chander, G. (2008). Radiometric Calibration for LandsAT. *Remote Sensing Environment*, 893-903.
- Christen, A., & Voogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology* 24, 1395–1421.
- 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 , 2563-2594.
- EPA. (2010). *Reducing Urban Heat Islands Green Roofs*.
- EPA. (2011). *Urban Heat Island*. Washington D.C.
- Estrada, O. (2010). *La atmósfera y la hidrología: Circulación general de la atmósfera*. Medellín.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. London: Earthscan.
- Gomez, R. V. (18 de 06 de 2008). Borneado a lo Paisa. *El Colombiano*.
- Google. (2010). Medellín.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2008). [siac.gov.co](http://www.siac.gov.co). Recuperado el 10 de 05 de 2012, de http://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Suelo/140510_Ideam_Igac_Metod_CORINELC.pdf
- Jiménez, J. F., & Ramírez, C. (2011). *Mendeley*. Recuperado el 09 de 04 de 2012, de <http://www.mendeley.com/research/modelo-temperaturas-superficiales-aplicado-al-area-urbana-del-valle-aburr-colombia/>
- Konopacki, S., & Akbari, H. (2002). *Energy savings for heat island reduction strategies in Chicago and Houston*. University of California, Berkeley.: Draft Final Report, LBNL-49638.

- Memon, R. A., Leung, D. Y., & Liu, C.-H. (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research* 94, 491–500.
- NASA. (2003). *modis-atmos.gsfc.nasa.gov*. Recuperado el 20 de 10 de 2012, de <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/NDVI/Images/>
- NASA. (2007). *Landsat 7 Science Data Users Handbook*.
- NASA. (2010). *Earth Observatory*. Recuperado el 2012, de http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- NASA. (24 de 10 de 2012). *landsat.gsfc.nasa.gov*. Recuperado el 25 de 10 de 2012, de <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Oke. (1976). The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere* 14, 268–277.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat-island. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–24.
- Pérez, C., & Peña, M. A. (26 de 08 de 2011). *Urban Heat Islands*. Recuperado el 07 de 04 de 2012, de <http://www.urbanheatislands.com/home>
- Pineda, E. Atanasio Girardot. *Atanasio vista aérea*. Fly North, Medellín.
- Robine, J.-M., Siu Lan K, C., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., y otros. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* 331, 171–178.
- Rosenfeld, A., Akbari, H., Romm, J., & Pomerantz, M. (1998). Cool communities strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings* 28, 51–62.
- Schar, C., & Jendritzky, G. (2 de Diciembre de 2004). *Nature*. Recuperado el 25 de Mayo de 2012, de www.nature.com/nature
- Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2006). Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. *Solar Energy* 81 (2007) , 358–368.
- Teledet. (2011). *teledet*. Recuperado el 10 de 10 de 2012, de <http://www.teledet.com.uy/quees.htm>
- The University of Edinburgh. (2011). *chemicalconnection.org.uk*. Recuperado el 20 de 10 de 2012, de <http://www.chemicalconnection.org.uk/chemistry/topics/view.php?topic=3&headingno=5>

- Tomlinson, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., & Baker, C. J. (2010). Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images. *Journal of Climatology (online)*, doi:10.1002/joc.2261.
- USGS. (30 de 12 de 2010). *usgs.gov*. Recuperado el 29 de 10 de 2012, de http://landsat.usgs.gov/products_slcoffbackground.php
- Vidal, C. *Panoramica parque explora y parque norte*. Alcaldía de Medellín, Medellín.
- Weng, Q. (2008). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 335-344.
- Wienert, U., & Kuttler, W. (2005). The dependence of the urban heat island intensity on latitude — A statistical approach. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(5), 677–686.
- World Meteorological Organization. (11 de Agosto de 2010). *Prevention Web*. Recuperado el 25 de Mayo de 2012, de <http://www.preventionweb.net/english/professional/news/v.php?id=14970>