



## Informe Técnico

# *Análisis de la Isla de Calor y Mapa de Clima Urbano en AMSS*

**Proyecto: Planificación para el incremento de la temperatura debido al cambio climático en el Area Metropolitana de San Salvador**

**Octubre 2016**



**Autores:** Juan A. Acero, Begoña Gonzalez, Pablo Ayala, Celina Kattan

**Proyecto:** Planificación para el incremento de la temperatura debido al cambio climático en el Area Metropolitana de San Salvador

Financiado por CDKN (Climate & Development Knowledge Network)

Octubre, 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece la colaboración al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) del Gobierno de El Salvador y a los funcionarios del Observatorio Ambiental que proveyeron la información y datos necesarios para el desarrollo del presente informe, así como sus comentarios e aportes de conocimiento experto de climatología de la región del Area Metropolitana de San Salvador.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCION .....	1
2. CARACTERISTICAS CLIMATICAS DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR .....	3
2.1. Caracterización topográfica.....	3
2.2. Usos del suelo.....	4
2.3. Climatología regional .....	4
3. DATOS Y METODOS .....	6
3.1. Valores climáticos y análisis de la Isla de Calor de AMSS .....	6
3.1.1. Datos de estaciones superficiales.....	6
3.1.2. Datos de mediciones remotas .....	8
3.2. Mapa de Clima Urbano .....	11
3.2.1. Descripción general .....	11
3.2.2. Descripción de las capas SIG para el mapa de clima urbano .....	13
3.2.2.1. Evaluación de la vegetación urbana a través del índice NDVI.....	14
3.2.2.2. Cálculo de pasillos/zonas de ventiladas .....	15
4. RESULTADOS .....	16
4.1. Valores climáticos en AMSS .....	16
4.1.1. Temperatura .....	16
4.1.2. Vapor de agua .....	17
4.1.3. Viento.....	19
4.2. Análisis de la isla de calor de AMSS .....	21
4.2.1. Mediciones superficiales.....	21
4.2.2. Mediciones remotas .....	24
4.3. Mapa de Clima Urbano .....	31
4.3.1. Descripción de tipologías urbanas .....	31
4.3.2. Mapa de Análisis del Clima Urbano.....	33
4.3.3. Mapa de Recomendaciones para el Clima Urbano.....	36
5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES EN AMSS.....	40
BIBLIOGRAFÍA .....	43



## 1. INTRODUCCION

Los últimos informes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático señalan que el fenómeno del cambio climático es indiscutible (IPCC 2014) lo que implica una inminente necesidad de adaptación.

En concreto, uno de los sectores más vulnerables es el medio construido urbano ya que muchos de los riesgos asociados al cambio climático se concentran en las áreas urbanas donde está previsto que en el futuro se concentre la mayor parte de la población mundial. Así pues las actuaciones en ciudades son esenciales para una adaptación satisfactoria al cambio climático global. Esto es especialmente relevante en zonas tropicales (en concreto, en el Area Metropolitana de San Salvador) donde se ha constatado una mayor sensibilidad al cambio climático (Informe “Tendencia de la temperatura del aire y los eventos extremos de olas de calor en AMSS”). El informe citado anteriormente señala que el cambio climático ya se está registrando en AMSS con un incremento de 0.5°C de la temperatura media en el periodo 1991-2015 con respecto al periodo 1961-1990. Para finales de siglo, se podría esperar un aumento de 2.9-3.9°C en la temperatura promedio de AMSS dependiendo de la evolución de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

Independientemente del cambio climático, las zonas urbanas tienen unas condiciones climáticas alteradas con respecto al medio natural/rural del entorno. Este fenómeno es comúnmente conocido como la ‘isla de calor’ de una ciudad pudiendo ocasionar cambios significativos en los niveles de confort térmico de sus ciudadanos ya que las áreas urbanas acumulan calor y en general, tienen mayor temperatura del aire y menor intensidad de viento.

Las diferentes condiciones climáticas y los niveles de confort térmico entre zonas de una misma ciudad dependen de cómo se haya planificado y diseñado el conjunto de la ciudad, es decir, cual es la ubicación y tipología de barrios en relación con el clima regional. En concreto, algunas de las características urbanas que condicionan el clima en las ciudades son: el ratio entre la altura de edificaciones y la anchura de calles; la mayor o menor presencia de vegetación, el volumen edificado, la disposición de los elementos urbanos y el tipo de materiales urbanos empleados.

Por otra parte, el impacto del calor en la salud ha sido investigado por diversos autores (Koppe et al. 2004; Michelozzi et al. 2009; Stone et al. 2010). En concreto, se comprobó que una ola de calor en 2003 fue la causante de más de 70,000 muertos en Europa. En California (EEUU) una ola de calor en 2006 produjo más de 16,000 visitas a servicios de emergencia (Knowlton et al. 2009). Es por ello que desarrollar adecuadamente entornos urbanos puede mejorar no solo la calidad de vida y confort térmico de los ciudadanos, sino también reducir los impactos en salud y los costos económicos asociados (por ejemplo, consumos energéticos para refrigeración). En concreto, se ha estimado que la demanda energética por enfriamiento para Latinoamérica aumentará en un 1704% entre los años 2000 y 2050 (Isaac and van Vuuren 2009).

Así pues, en un **contexto de adaptación al cambio climático**, se establece como prioritario conocer la casuística del clima urbano en el Área Metropolitana de San

Salvador (AMSS), y consecuentemente **planificar el desarrollo urbano** e implementar las medidas necesarias para minimizar los impactos ambientales mejorando la habitabilidad en términos de salud (estrés térmico) y confort de los ciudadanos.

En cuanto a medidas de adaptación urbanas, se ha comprobado que las actuaciones correctoras de mejora aplicadas en áreas plenamente desarrolladas tienen menos efectividad y son más costosas que aplicar criterios y recomendaciones simples en las primeras fases de la planificación urbana. En este sentido, después de conocer la casuística de la isla de calor de AMSS, el desarrollo de un mapa de clima urbano (MCU) desde la perspectiva de la planificación urbana se convierte en algo necesario para ayudar a urbanistas y otros responsables de tomar decisiones adecuadas para el desarrollo de la ciudad.

Así pues, el presente informe tiene como objetivo hacer una revisión y análisis del clima urbano (isla de calor) de AMSS, y presentar de un mapa de clima urbano con recomendaciones para la adaptación urbana al cambio climático.

## 2. CARACTERÍSTICAS CLIMATICAS DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

### 2.1. Caracterización topográfica

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) está compuesta por 14 municipios pertenecientes a los departamentos de San Salvador y La Libertad, localizados en un área que abarca el 3 % del territorio nacional –en la zona central del país que se encuentra circunscrita entre el volcán de San Salvador, el lago de Ilopango y el cerro Guazapa–, y sin embargo concentra al 27 % de su población. El conjunto del área urbanizada ocupa alrededor a 165 km<sup>2</sup>. La diferencia de cota topográfica es muy significativa, variando entre los 350 y 1950 m.s.n.m. si consideramos todo el conjunto del área municipal y entre los 400 y 1000 m.s.n.m. si consideramos la zona urbanizada. En la Figura 1 se representa un mapa que incluye el desarrollo urbano de AMSS.

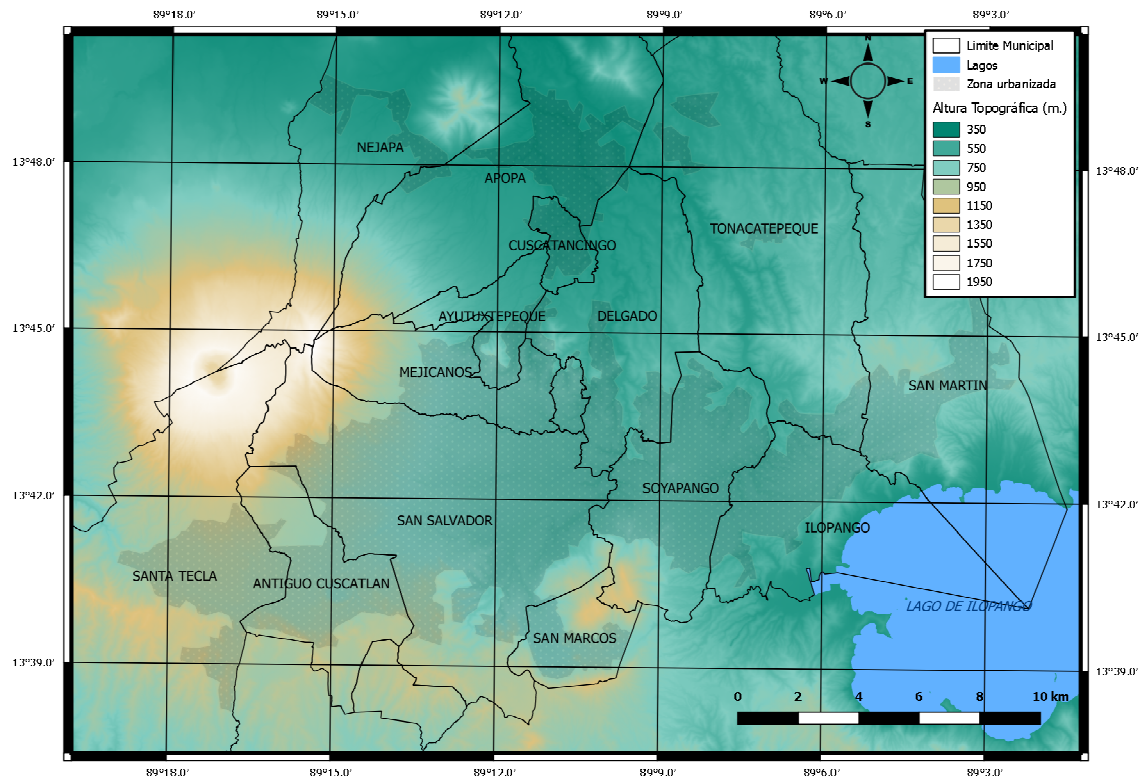


Figura 1. Mapa topográfico de la zona urbana del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

Existe una planicie central (600 – 800 m.s.n.m) donde se encuentran los municipios de San Salvador, Soyapango, Mejicanos, Ilopango, Ciudad Delgado delimitada al Este por el Lago de Ilopango (438 m.s.n.m.) y al Oeste por el Volcán de San Salvador (1967 m.s.n.m.)- Al sur se encuentra la cordillera del Bálsamo con alturas máximas de 1100 m.s.n.m. y el cerro San Jacinto de similar altura (en el noroeste del municipio de San Marcos). Al norte se encuentran unos cerros más bajos con una elevación que no excede los 800 m.s.n.m. (Cerro Mariona)

## 2.2. Usos del suelo

La transformación que ha sufrido la zona del AMSS ha sido significativa debido al gran aumento de la población en los últimos años. Como referencia, entre 1949 y 2002 el área de cubrimiento por infraestructura paso del 12.5% al 28.5%, lo que implica una gran expansión de la mancha urbana y consecuente alteración del uso del suelo en el AMSS. En el caso de algunos municipios como San Salvador el incremento del porcentaje de área urbanizada llegaba al 61.5% (en 2002). Evidentemente, estas alteraciones (aumento de la superficie artificializada) tienen una afección directa en la acumulación de calor y consecuentemente en el incremento del efecto ‘isla de calor’ del AMSS. En la Figura 2 se presenta la actual distribución de los usos de suelo en AMSS.

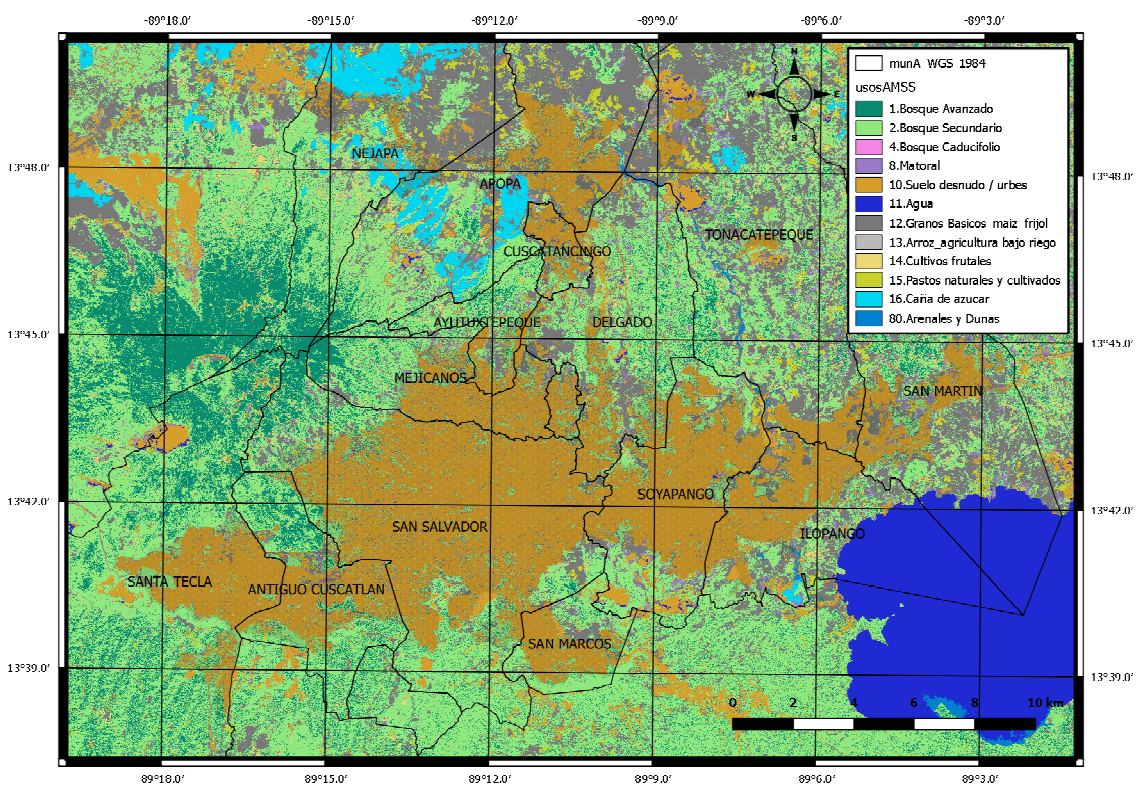


Figura 2. Mapa de usos del suelo actual en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

## 2.3. Climatología regional

El clima de AMSS se clasifica como trópicos húmedos (Aw: región tropical de sabana). Los cambios de temperatura a lo largo del año son pequeños pero el régimen de lluvias tiene dos periodos bien marcados influidos por la posición e intensidad de los sistemas meteorológicos condicionados por la variación de la influencia del Sol a lo largo del año.

Existe pues una estación seca entre noviembre y abril, donde los meses de marzo y abril son los más calurosos debido a la existencia de sistemas de alta presión que proporcionan estabilidad atmosférica con días despejados, elevada radiación solar y disminución de la intensidad de viento. Por el contrario la estación lluviosa (mayo a

octubre) está condicionada por el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el Norte del Ecuador, sobre Centroamérica y la presencia de vientos Alisios. Las lluvias más intensas se suelen dar en junio y septiembre, presentándose una “canícula” con prácticamente ausencia de lluvia durante julio y/o agosto debido al acercamiento del anticiclón del Atlántico, limitando el ascenso convectivo y proporcionando estabilidad a la región.

Por otra parte la orografía tiene una influencia significativa en el clima regional. Las cadenas montañosas originan que gran parte del país se encuentre a sotavento de los vientos Alisios. Estos son vientos de Este que inyectan humedad desde el Caribe hacia Centroamérica. Así pues la orografía ocasiona una disminución del régimen de precipitación en la región.

Asociado al régimen de lluvias y presencia de anticiclones, la radiación solar aumenta durante la época seca alcanzándose el máximo en marzo. Por el contrario, los meses de junio y septiembre al aumentar la presencia de baja presiones (con la ZCIT) la nubosidad (y lluvia) aumenta y la radiación solar disminuye significativamente.



### 3. DATOS Y METODOS

En este apartado se describe la metodología seguida para el estudio. Se especifican los datos que se han utilizado y qué tratamiento metodológico se ha llevado a cabo para obtener los resultados.

Este aparato se compone de dos sub-secciones:

1. Análisis de los valores climáticos y de la Isla de Calor y
2. Elaboración del Mapa de Clima de Urbano en AMSS

#### 3.1. Valores climáticos y análisis de la Isla de Calor de AMSS

Se ha realizado un análisis de los parámetros meteorológicos en las estaciones de medición con la finalidad de disponer de un conocimiento general de la climatología general del AMSS. Los parámetros analizados han sido: temperatura y humedad relativa (presión de vapor) del aire, velocidad y dirección de viento, observando diferencias temporales, así como diferencias entre ubicaciones de medida e interpretando la afección de los fenómenos sinópticos en las características climáticas de AMSS.

En el análisis también se ha incluido una separación por periodos climáticos del año. Así se ha tomado como época de lluvias desde el 15 de Mayo al 15 de Octubre, considerándose la época seca el resto del año.

La valoración de la intensidad de la isla de calor urbana de AMSS se ha hecho desde dos aproximaciones:

1. Análisis de mediciones de estaciones superficiales
2. Análisis de mediciones remotas

##### 3.1.1. Datos de estaciones superficiales

Para el análisis de las variables climáticas y de la isla de calor en AMSS se han utilizado la serie de datos registrados entre los años 2011 y 2015 (Fuente de datos: MARN). En este periodo, se han analizado tanto los datos horarios de temperatura, velocidad y dirección de viento, como las series de temperatura máxima y mínima diaria.

Se han usado diferentes estaciones de medida de la Red Meteorológica de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) del Gobierno de El Salvador para caracterizar el clima urbano del AMSS y las diferencias climáticas con el entorno rural/natural. La descripción de dichas estaciones se presenta en la Tabla 1.

Como estación de referencia de clima rural/natural de la región (es decir, sin la perturbación urbana del AMSS) se ha usado la estación de Sensuntepeque. El resto son estaciones que se encuentran dentro de la zona urbana de AMSS.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio de la Isla de Calor de AMSS

Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Elevación (m.s.n.m.)
UES-Universidad	13.719°	-89.203°	710
Aeropuerto Ilopango	13.698°	-89.118°	615
PROFACE- SantaTecla	13.684°	-89.287°	965
Sensuntepeque (Guacotecti)	13.871°	-88.645°	630
Centro de Gobierno	13.706°	-89.200°	670

La estación de ‘UES-Universidad’ se ubica en una zona ajardinada y áreas arboladas y dispone de edificios cercanos de varias alturas. La estación de ‘PROFACE-SantaTecla’ se ubica en un área boscosa rodeada de vegetación e influenciada por las laderas del volcán de San Salvador. Por su parte ‘Centro de Gobierno’ se encuentra en la zona urbana central de San Salvador en una zona fuertemente artificializada aunque con arbolado cercano. La estación de ‘Aeropuerto Ilopango’ está cerca de una pista de aterrizaje-despeje del aeropuerto, sobre zonas ajardinadas y con arbustos cercanos y alguna construcción cercana. En la figura 3 se presenta unas fotos de estas estaciones. Finalmente, la estación de ‘Sensuntepeque’ se encuentra a unos 50 km de AMSS en un área rural. La ubicación y las características del entorno pueden asemejarse al clima original de San Salvador previo al desarrollo urbano.

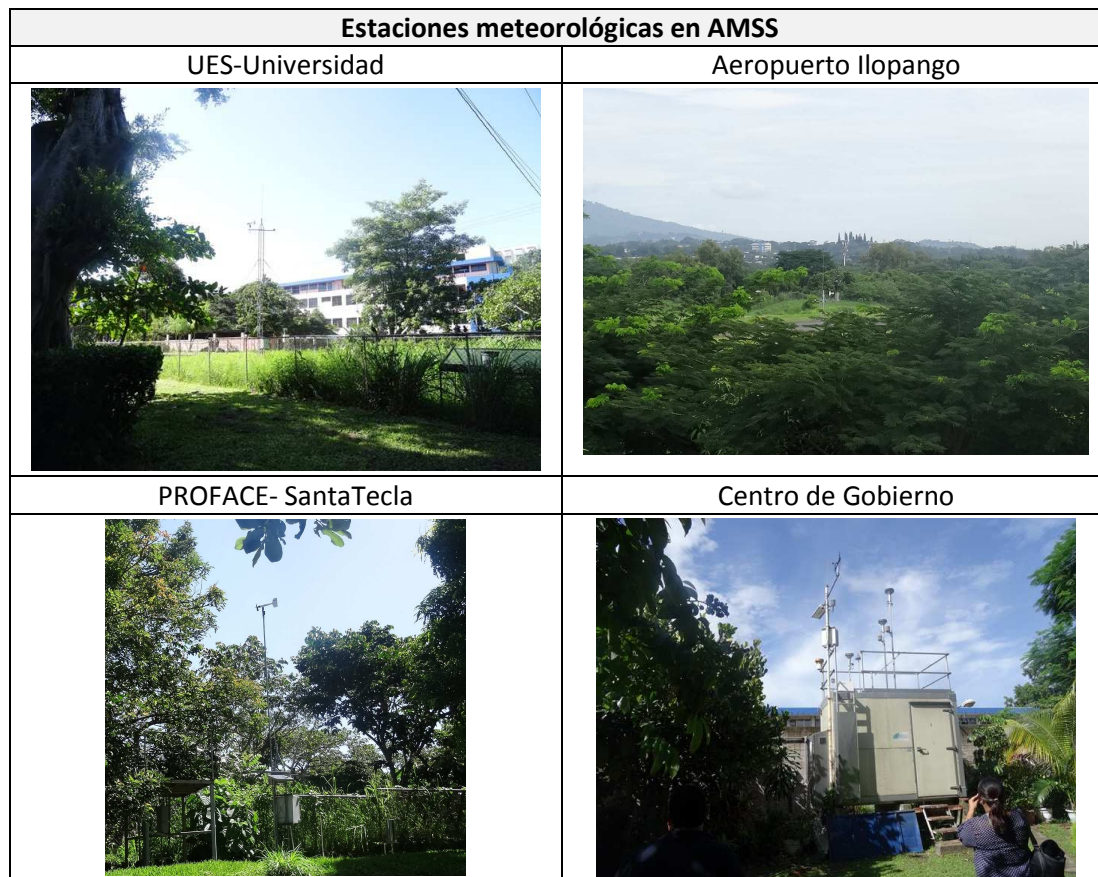


Figura 3. Fotográficas de las estaciones de medición del AMSS

### 3.1.2. Datos de mediciones remotas

Un indicador del efecto de isla de calor urbana es la temperatura superficial, que difiere de la temperatura del aire, pero que puede ayudar a identificar zonas urbanas con mayor acumulación de calor por efecto de la urbanización.

Se han usado los datos de LANDSAT (satélites operados por la NASA) para calcular la temperatura superficial terrestre (TST) en el AMSS en dos años diferentes (2000 y 2015). La finalidad ha sido observar la tendencia temporal de TST en los últimos tiempos y cuantificar lo que se conoce como isla de calor superficial (ICS). Para ello se han tomado las series de datos de Landsat 5 y Landsat 8.

#### Procedimiento de cálculo

El cálculo de TST se ha realizado siguiendo la metodología propuesta por Artis & Carnahan (1982) que sido empleada en otros estudios similares. El método se basa en aplicar la corrección de la emisividad superficial terrestre (EST) a los valores de la temperatura de brillo proporcionados por Landsat, según la siguiente fórmula:

$$S_t = \frac{T_B}{1 + (\lambda \times T_B / \rho) \ln \varepsilon}$$

donde  $T_B$  es la temperatura de brillo;  $\varepsilon$  es la emisividad superficial;  $\rho = 1.438 \times 10^{-2}$  m K;  $\lambda$  es la longitud de onda central de radiancia emitida.

La temperatura de brillo se ha calculado a partir de la radiancia espectral en la parte superior de la atmósfera de una banda del infrarojo térmico. En el caso de Landsat 8 (datos del año 2015) se ha usado la banda 10 y en el caso de Landsat 5 (datos del 2000), la banda 6, cuyos valores de  $\lambda$  son 10.9 y 11.15 micras respectivamente.

Para el cálculo de EST se ha seguido la metodología presentada por Sobrino et al. (2008) que depende de la fracción de cobertura vegetal ( $P_v$ ) directamente relacionado con el índice NDVI (de siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*). Este método de cálculo de EST se conoce como NDVI<sup>THM</sup> (de las siglas en inglés *NDVI Thresholds Method*). Así pues la EST se ha calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} a_i \rho_{red} + b_i & NDVI < 0.2 \\ \varepsilon_{v,i} P_v + \varepsilon_{s,i} (1 - P_v) + C_i & 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ \varepsilon_{v,i} + C_i & NDVI > 0.5 \end{cases} \quad [1]$$

donde

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2 \quad \text{y} \quad C_i = (1 - \varepsilon_{s,i}) \varepsilon_{v,i} \cdot F' \cdot (1 - P_v)$$

NDVI<sub>min</sub> y NDVI<sub>max</sub> se consideran valores constantes e iguales a 0.2 y 0.5 respectivamente y NDVI se calcula a partir de la reflectancia espectral de las bandas del infrarojo cercano y visible que corresponden a la banda 5 y 4 de Landsat 8 y la banda 4 y 3 de Landsat 5 respectivamente.



Por su parte,  $\epsilon_v$  y  $\epsilon_s$  corresponden a emisividades de vegetación y suelo desnudo respectivamente, y se considera que  $F'$  es constante e igual a 0.55.

A partir de la revisión de la literatura se han empleado unas fórmulas específicas (Tabla 2) para calcular la EST en las bandas del infrarojo térmico de Landsat 8 y Landsat 5, es decir, la banda 10 y 6 respectivamente. Excepcionalmente a las zonas identificadas por Landsat como agua o nieve se les ha asignado valores de EST de 0.992 y 0.986 respectivamente (Sobrino et al. 2008; Jimenez-Munoz et al. 2014). Al resto se les ha aplicado los valores de EST derivados de las fórmulas de la Tabla 2:

Tabla 2. Fórmulas de estimación de valores de emisividades superficiales

Series de datos	Clasificación vegetal del suelo	Emisividad superficial	Referencias
Landsat8	NDVI<0.2	$\epsilon_{10} = 0.973 - 0.047 * \rho_4$	(Yu et al. 2014)
	0.2 ≤ NDVI ≤ 0.5	$\epsilon_{10} = 0.00149 * P_v + 0.98481$	(Yu et al. 2014; Wang et al. 2015)
	NDVI > 0.5	0.99	(Sobrino et al. 2008)
Landsat5	NDVI<0.2	$\epsilon_6 = 0.979 - 0.035 * \rho_3$	(Yu et al. 2014)
	0.2 ≤ NDVI ≤ 0.5	$\epsilon_6 = 0.004 * P_v + 0.986$	(Yu et al. 2014; Wang et al. 2015)
	NDVI > 0.5	0.99	(Sobrino et al. 2008)

Finalmente, aplicando la fórmula [1] se ha obtenido la TST con una resolución de 30 metros para todo el AMSS.

El análisis de TST en AMSS se ha llevado a cabo por un parte para la época seca y por otra para la época de lluvias. Para cada época climática y cada año (2000 y 20015) se han cogido 4 imágenes Landsat donde la presencia de nubes en el área de AMSS es menor de 10% (Tabla 3)

Las imágenes de Landsat 8 correspondientes al área geográfica de AMSS se tomaron a las 16:18 GMT mientras que las de Landsat 5 a las 15:56 GMT lo que corresponde al periodo matinal ya que AMSS se encuentra en el uso horarios GMT-6.

### Cálculos realizados

Se han realizado los siguientes cálculos:

1. Se ha estimado un **valor promedio de anomalías espaciales de TST en la zona urbana de AMSS** en cada época climática. Esto ha permitido definir zonas calientes y frías (desde el punto de vista de TST) de la zona urbana de AMSS. Para ello se ha calculado EST y TST para cada imagen/escena, así como las anomalías espaciales de TST respecto al valor promedio de TST en la zona urbana de AMSS para dicha imagen/escena.

Se ha considerado que las zonas calientes y zonas frías corresponden al percentil 75 y 25 respectivamente de los valores promedio de anomalías de TST en cada época climática y año considerado.

- Finalmente con idea de **cuantificar la isla de calor superficial (ICS)** se ha calculado la diferencia entre TST en la zona urbana ( $TST_{URBANA}$ ) y en la zona rural ( $TST_{RURAL}$ ). Para ello se ha definido un área alrededor de la zona urbana de AMSS con un radio de 4 kilómetros considerándola zona rural de AMSS. En esta área para cada escena se ha calculado una  $TST_{RURAL}$  promedio representativa de toda el área rural alrededor de la zona urbana. Finalmente se han estimado unos valores promedios y representativos de la ICS (es decir,  $TST_{URBANA} - TST_{RURAL}$ ) en el año 2015 para cada época climática, así como su distribución espacial dentro del área urbana.

En la Figura 4 se puede apreciar la extensión de lo que se ha considerado zona urbana y zona rural de AMSS.

Tabla 3. Imágenes/Escenas de Landsat consideradas para el cálculo de la temperatura superficial terrestre (TST) y el índice de NDVI

Serie de datos y periodo del año	Imagen/escena	Fecha
Landsat8 Época de lluvias (2015)	LC80190512015145LGN00	25/05/2015
	LC80190512015177LGN00	26/06/2015
	LC801905120193LGN00	12/07/2015
	LC80190512015241LGN00	29/08/2015
Landsat8 Época seca (2015)	LC80190512015001LGN00	01/01/2015
	LC80190512015033LGN00	02/02/2015
	LC80190512015049LGN00	18/02/2015
	LC80190512015097LGN00	07/04/2015
Landsat5 Época de lluvias (2000)	LT50190502000296XXX02	22/10/2000
	LT50190502000232XXX02	19/08/2000
	LT50190502000200XXX02	18/07/2000
	LT50190502000168XXX06	16/06/2000
Landsat8 Época seca (2000)	LT50190502000008XXX02	08/01/2000
	LT50190502000024AAA02	24/01/2000
	LT50190502000040AAA02	09/02/2000
	LT50190502000072XXX02	12/03/2000

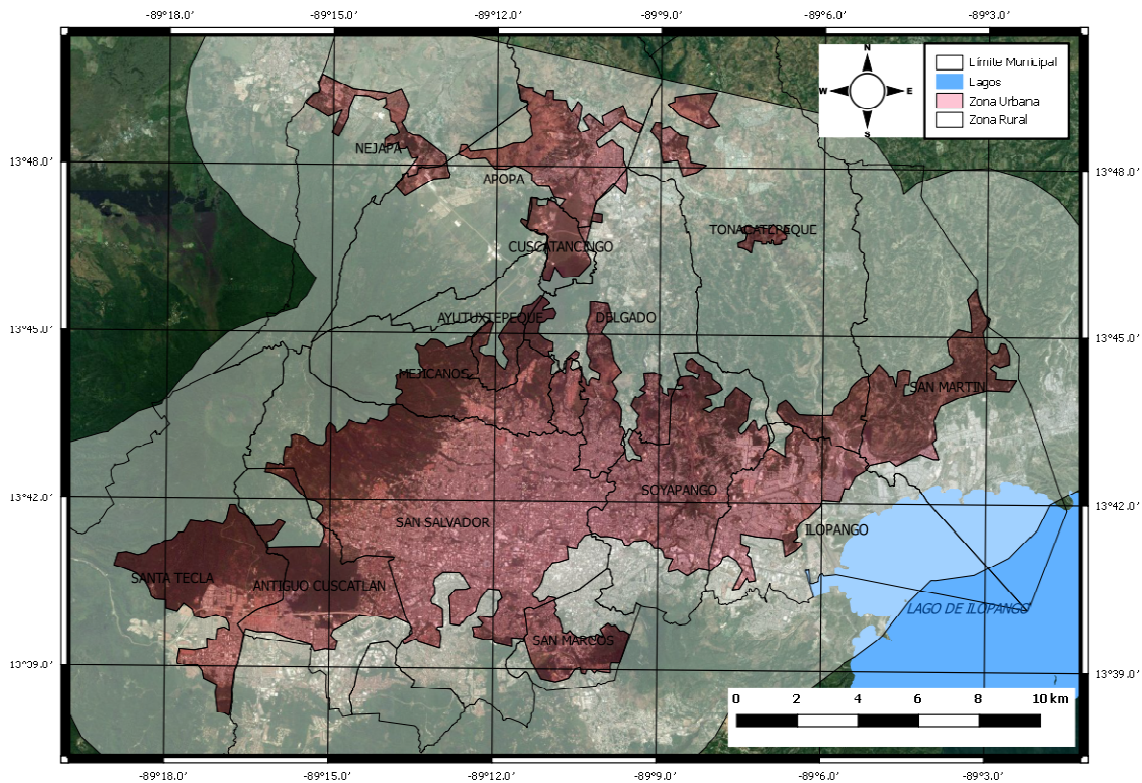


Figura 4. Zona urbana y zona rural considerada para la estimación de la isla de calor superficial de AMSS

## 3.2. Mapa de Clima Urbano

### 3.2.1. Descripción general

El Mapa de Clima Urbano (MCU) tiene dos componentes que son igualmente importantes. Por una parte se ha elaborado un Mapa de Análisis del Clima Urbano (MCU-An) para representar gráficamente las características climáticas principales de AMSS. Esta ha sido la base para el desarrollo del Mapa de Recomendaciones para Clima Urbano (MCU-Re) que incluye una zonificación de niveles de sensibilidad climática, así como recomendaciones generales para la planificación y desarrollo urbano de AMSS.

Anterior al desarrollo del MCU se han analizado dos aspectos que condicionan el clima urbano:

1. Las tipologías de usos del suelo desde una perspectiva de carga térmica. Para ello se ha seguido la clasificación propuesta por Stewart and Oke (2012)
2. Las propiedades de ventilación para considerar la capacidad de intercambio de aire y la eliminación del calor urbano

Para el desarrollo del MCU-An se ha utilizado una metodología basada en cálculos realizados con diferentes capas de información geográfica (SIG), mediciones climáticas y conocimiento experto de climatología urbana. Las capas SIG han incluido información de:

1. La carga térmica, que representa el calor acumulado en el área urbana y depende de la tipología de los desarrollos urbanos (que varían espacialmente).
2. El potencial dinámico que incluye información sobre las características de ventilación y el nivel de intercambio con aire más frío del exterior del área urbana.

Así pues se han combinado diferentes capas SIG para representar en el MCU-An áreas con características climáticas relativamente homogéneas que tienen un impacto similar en el confort térmico. Dicha combinación se ha realizado a través de unos pesos seleccionados adecuadamente a partir del conocimiento experto en climatología urbana y las mediciones y casuística del clima urbano en AMSS.

Finalmente, una vez disponible el MCU-An se ha definido recomendaciones y criterios climáticos generales para el desarrollo urbano de AMSS. Estos se presentan en el MCU-Re con el objetivo de garantizar una planificación urbana adecuada del conjunto del AMSS en un contexto de necesidad de adaptación al cambio climático. La información provista tiene la finalidad de ser usada por urbanistas durante el proceso de planificación del área urbana.

La Figura 5 representa gráficamente la relación entre la información de partida y la obtención del Mapa de Clima Urbano

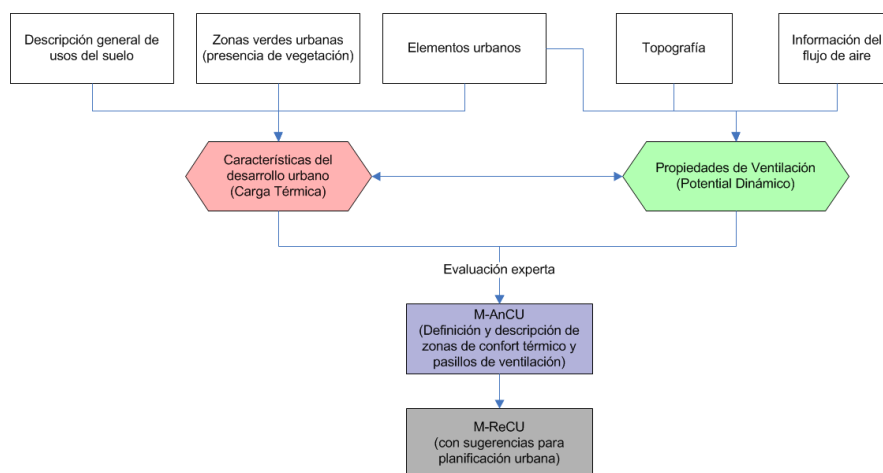


Figura 5. Metodología general para la obtención del MCU

Considerando que la finalidad del MCU es proveer recomendaciones climáticas dentro de la planificación general del AMSS, se ha definido un dominio de 33.4 x 23.8 kilómetros con una resolución de 100 metros. El punto abajo izquierda de la malla del dominio se localiza en (248025, 1507225) expresado en la proyección WGS 84 / UTM zona 16 N (EPSG: 32616).

Se ha partido de la siguiente información facilitada por MARN:

- Las alturas de los elementos urbanos (extraída de un vuelo lidar)
- Modelo digital del elevaciones (MDE) del terreno
- Definición de los usos de suelo general del AMSS (Figura 2)

Así mismo, se ha usado el índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para la evaluación de la presencia de vegetación calculado de datos de satélites (ver sección 3.2.2.1). Sin embargo, no se pudo contar con información precisa de los edificios del AMSS (localización, perímetro y altura).

A partir de esta información/datos de partida se han definido las 5 capas SIG que incluyen aspectos relevantes que afectan el clima de AMSS y así derivar el MCU.

### 3.2.2. Descripción de las capas SIG para el mapa de clima urbano

En función de la información cartográfica suministrada por MARN se han considerado 5 capas SIG para la elaboración del MCU-An donde se describen las características climáticas principales del AMSS y se zonifica el área en función de su afección al confort térmico. Estas capas incluyen información sobre la acumulación de calor urbano y las propiedades de ventilación en AMSS y son el resultado de la proyección de información correspondiente sobre la malla de cálculo (resolución 100 metros) del MCU-An. Las capas SIG y la su influencia/efecto en el clima urbano se describen a continuación:

1. Superficie cubierta por elementos urbanos: describe el efecto de la acumulación de calor, así como la ventilación debido a la permeabilidad al viento. Se ha medido a partir de la fracción de superficie cubierta por elementos urbanos
2. Presencia de vegetación: incluye el efecto de la vegetación en disminuir la carga térmica urbana, reduciendo la temperatura del aire en el entorno, especialmente durante el día. Se ha medido en términos de potencial de enfriamiento en relación con la presencia de áreas verdes
3. Altura topográfica: incluye el efecto del enfriamiento del aire con la altura. Se ha medido según rangos de altura sobre el nivel del mar.
4. Pendiente del terreno: describe el efecto de mejora de la ventilación y eliminación de calor acumulado. Mayores pendientes, aumentan la permeabilidad urbana al viento. Se ha medido en rangos de porcentaje de inclinación de la superficie terrestre
5. Pasillos/zonas ventiladas: incluye la influencia de aire frío internándose en el área urbana. Se han considerado dos tipos de pasillos de ventilación: asociados a vientos regionales y los asociados a vientos fríos de ladera (catabáticos). Se han categorizado según su potencial de ventilación y consecuentemente de enfriamiento en cada zona de AMSS

La categorización de las capas SIG y los pesos asignados a cada una de ellas se ha realizado en función de la casuística particular del AMSS, la influencia de la climatología regional, las mediciones climáticas (ver sección 3.1.1) y el conocimiento experto en climatología urbana.



Tabla 4. Imágenes/Escenas de Landsat consideradas para el cálculo de la

Capa SIG	Nº de Categorías	Peso
1 – Superficie cubierta por elementos urbanos	5	6
2 – Presencia de vegetación	4	-6
3 – Altura topográfica	6	-6
4 – Pendiente del terrero	3	-3
5 – Pasillos/zonas de ventiladas	3	-4

Así pues la zonificación en función del impacto en confort térmico presentada en el MCU-An es el resultado de la siguiente ecuación:

$$\sum_{L=1}^5 \frac{C_L}{N_L} * P_L$$

Donde  $C_L$  es la categoría asignada a cada SIG;  $N_L$  es el número total de categorías de cada capa y  $P_L$  es el peso asignado a la capa

### 3.2.2.1. Evaluación de la vegetación urbana a través del índice NDVI

La presencia de vegetación urbana es muy importante en el nivel de acumulación de calor y carga térmica del AMSS. Por lo que su cuantificación es relevante para el MCU.

Un método sencillo para su cuantificación es el uso del índice NDVI derivado de mediciones de satélite que permite hacer una comparación de la presencia de vegetación entre diferentes zonas en el mismo momento.

Los valores de NDVI se han obtenido del satélite Landsat 8 con una resolución de 30 metros utilizando datos del año 2015. Para ello se tomaron 4 imágenes/escenas en la época seca y otras 4 en la época de lluvias. De cada grupo de 4 imágenes Landsat se obtuvo una imagen promedio de la presencia de vegetación, es decir, un valor de NDVI medio para cada época del año en 2015. Las imágenes/escenas que se han usado fueron las mismas que para el cálculo de la temperatura superficial terrestre (TST) (ver sección 3.1.2).

Los valores de NDVI se obtuvieron con el servicio de *US Geological Survey* (USGS) en el Centro de *Earth Resources and Observation* (EROS) sobre productos científicos de alto nivel de la reflectancia superficial de Landsat ([http://landsat.usgs.gov/CDR\\_LSR.php](http://landsat.usgs.gov/CDR_LSR.php)).

Para valorar la presencia de vegetación en el AMSS y configurar una capa SIG para los cálculos del MCU-An se ha tomado los valores promedio de NDVI en la época de lluvias ya que en esta época del año es de esperar que la presencia de vegetación sea mayor y consecuentemente se pueda diferenciar mejor que en la época seca las zonas de mayor o menor presencia de vegetación.

Así pues, los valores promedio de NDVI (con resolución 30 metros) se han proyectado a la malla de MCU (con resolución de 100 metros). Finalmente los valores de NDVI se

han categorizado en niveles de potencial de enfriamiento de la vegetación siguiendo la siguiente clasificación para las áreas urbanas:

- $NDVI < 0,2 \Rightarrow$  Sin potencial de enfriamiento
- $0,2 \leq NDVI < 0,5 \Rightarrow$  Potencial de enfriamiento bajo
- $0,5 \leq NDVI < 0,7 \Rightarrow$  Potencial de enfriamiento medio
- $NDVI \geq 0,7 \Rightarrow$  Potencial de enfriamiento alto

### 3.2.2.2. Cálculo de pasillos/zonas de ventiladas

Considerando la topografía que rodea el AMSS y las características principales del flujo de aire se han considerado dos tipos de pasillos/zonas de ventilación:

- Pasillos/zonas que están expuestas al flujo de aire regional canalizado a través de la topografía
- Pasillos/zonas que están expuestas a vientos fríos de ladera (catabáticos) que desde zonas rurales entran/influyen en el área urbana

Estos se han definido en función de la información general de usos de suelos, cálculos de parámetros de rugosidad superficial y análisis del clima regional.

En concreto se ha usado el modelo UMEP para calcular la fracción de superficie cubierta por elementos urbanos y otros parámetros superficiales ( $z_0$  y  $z_d$ ) que han permitido ayudar en la definición de los pasillos/zonas ventiladas. Sin embargo, el conocimiento experto en climatología urbana y del clima de AMSS ha sido determinante para su valoración en el contexto del MCU

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Valores climáticos en AMSS

#### 4.1.1. Temperatura

##### Variaciones temporales

Como se puede apreciar en la Figura 6, las diferencias de temperatura a lo largo del año apenas varían en AMSS. La temperatura media siempre se encuentra por encima de los 20°C, aunque existe diferencia entre ubicaciones influenciadas por el desarrollo urbano, la altura topográfica y la dinámica de vientos. Así, la temperatura media de la estación de ‘Santa Tecla’ es entre 1.3 y 1.9 °C menor que en ‘Aeropuerto Ilopango’ dependiendo del mes.

La temperatura media tiende a incrementar entre los meses de Abril y Julio. Por el contrario las temperaturas mínimas (<18°C) se dan los últimos y primeros meses del año (Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero) por la influencia de vientos del Norte fríos. Las temperaturas máximas alcanzan los mayores valores en Marzo para ‘Aeropuerto Ilopango’ (33.4°C) y en Marzo y Julio para ‘Santa Tecla’ (27.9°C). Los valores altos de Marzo se justifican por la presencia en El Salvador de sistemas de altas presiones que disminuyen la nubosidad y aumenta la radiación solar, además de disminuir mezcla vertical y la intensidad del viento

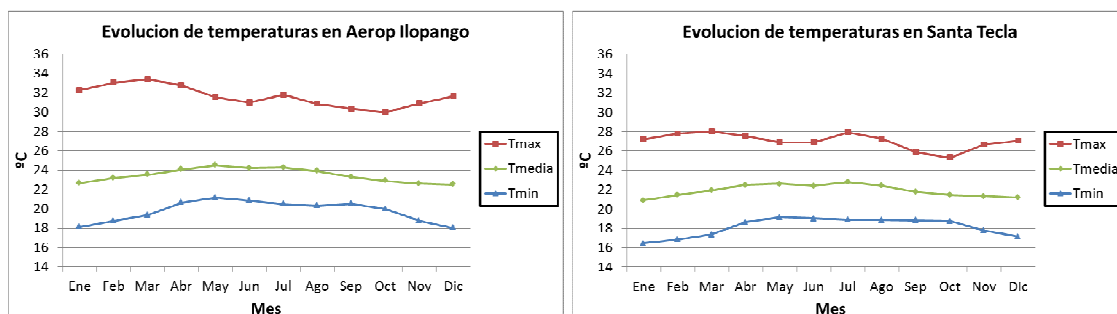


Figura 6. Evolución mensual de temperaturas en dos ubicaciones de AMSS

En relación con la variación de temperatura a lo largo del día se puede observar que esta es menor durante la época de lluvias (Figura 7). Los valores en dicha época van de 7.7°C en ‘UES-Universidad’ y ‘Santa Tecla’ hasta 8.6°C en ‘Aeropuerto Ilopango’. Sin embargo, en la época seca estos valores varían entre 8.5°C en ‘Centro de Gobierno’ y 10.3°C en ‘Aeropuerto de Ilopango’. Entre ambas épocas del año existe un diferencia de entre 0.6°C y 1.7°C dependiendo de la estación de medición pero siempre mayor amplitud térmica en la época seca donde la presencia de cielos despejados y la mayor radiación solar incrementa la acumulación de calor en la superficie aumentando la temperatura máxima. Otro factor que contribuye a esta diferencia entre las dos épocas es la presencia de vegetación. En la época seca, el potencial vegetativo se reduce por la escasez de agua y consecuentemente el enfriamiento radiativo por la noche aumenta y la temperatura mínima disminuye.



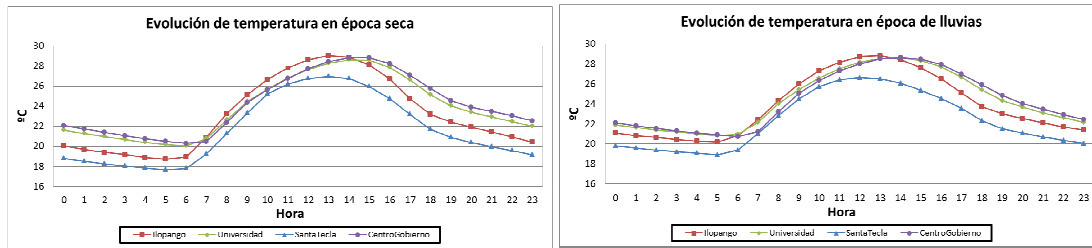


Figura 7. Evolución a lo largo del día de temperaturas en las dos épocas climáticas de AMSS

### Variaciones espaciales

Como ya se ha presentado en la sección anterior, las características topográficas y de climatología regional en el AMSS ocasionan variaciones espaciales de los niveles medios de temperatura. En la Figura 8 se puede apreciar la casuística de la temperatura. Claramente ‘Santa Tecla’ es la ubicación que menor temperatura registra. A lo largo del periodo 2011 a 2015, alcanza 1.6°C menos que el promedio de todas las estaciones de medida consideradas en el AMSS. Estos resultados están asociados a la altura topográfica a la que se encuentra la estación (965 m.) y a la influencia de los vientos que descienden por el volcán de San Salvador. Por otro lado, ‘Centro de Gobierno’ muestra los mayores valores de temperatura (1°C más que el promedio de todas las estaciones) en relación con su ubicación en una zona central de la zona urbana de AMSS a una cota de 670 m. apuntando un mayor efecto de la isla de calor el cual no es tan pronunciado en la estación de ‘UES-Universidad’ por su entorno vegetal donde se reduce la acumulación de calor urbano. Por su parte, ‘Aeropuerto Ilopango’ es la estación que representa bien el promedio de temperatura de todas las estaciones de medida consideradas.

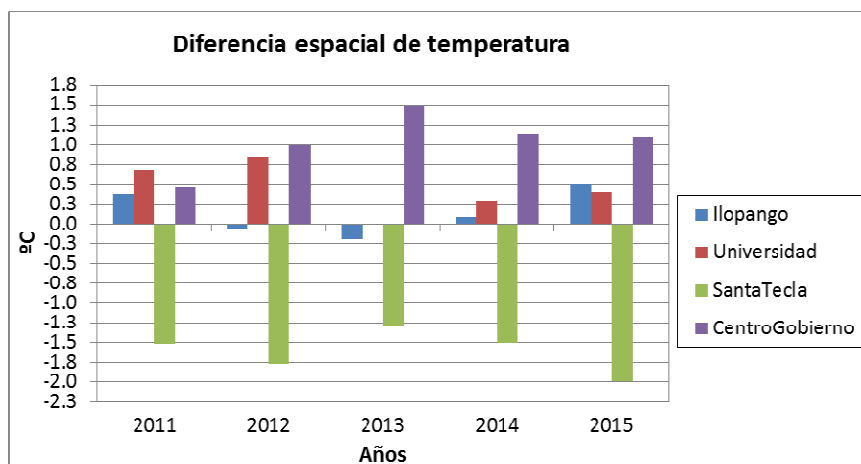


Figura 8. Diferencia de temperaturas en cada estación con respecto al promedio del conjunto de estaciones de AMSS

### 4.1.2. Vapor de agua

#### Variaciones temporales y espaciales

Como se puede apreciar en la Figura 9, las diferencias de vapor de agua en aire ambiente varían significativamente a lo largo del año. En concreto, los niveles en la

época de lluvias (mayo a octubre) son más elevados que durante la época seca. Sin embargo, como es de esperar, el nivel vegetativo en cada ubicación condiciona la presencia de vapor de agua. En concreto, ‘Centro de Gobierno’ se encuentra en una zona altamente artificializada si lo comparamos con ‘Aeropuerto Ilopango’. Esto justifica que durante la época seca la presión de vapor en ‘Centro de Gobierno’ sea menor que en ‘Aeropuerto Ilopango’.

Por otra parte es importante destacar que ‘Santa Tecla’ presenta las menores variaciones entre ambos periodos del año. Mientras ‘Aeropuerto Ilopango’ muestra una variación de 27.7% en los niveles de presión de vapor, ‘Santa Tecla’ solo muestra variaciones del 17.7% influida por la alta presencia de vegetación arbórea en su entorno.

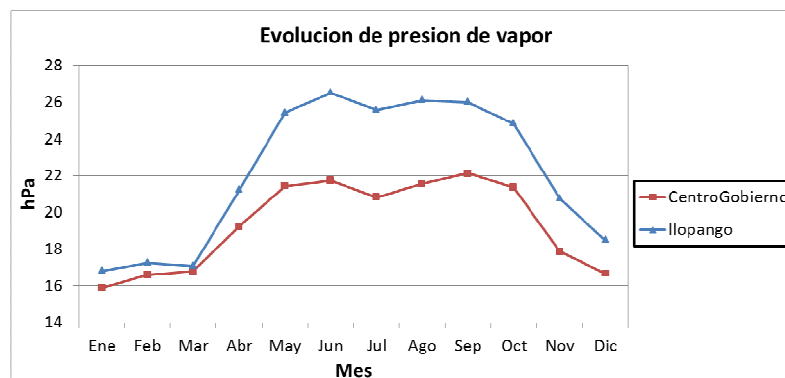


Figura 9. Evolución mensual de la presión de vapor en estaciones de AMSS

En general todas las estaciones presentan un mínimo de presión de vapor alrededor del mediodía (Figura 10). Sin embargo, la intensidad de este mínimo varía según la época del año. Durante la época seca cuando predominan las situaciones de mayor estabilidad atmosférica se desarrollan vientos descendentes hacia el océano que reducen la humedad cerca de superficie. Lo mismo ocurre durante la época de lluvia pero debido al movimiento ascendente del aire.

El máximo de presión de vapor agua se da, en general, por la tarde-noche, especialmente en la época seca. Esto se puede relacionar con la presencia de masas de aire con alto contenido en agua que durante la tarde entran en AMSS desde el mar por el Sur (brisas). Este efecto se aprecia en ‘Aeropuerto Ilopango’ y ‘Centro de Gobierno’. Así mismo el viento del Este desde el Caribe que provoca precipitaciones durante la época de lluvias también contribuye a este aumento de vapor de agua superficial durante la tarde-noche. En este caso, ‘Centro de Gobierno’ registra de forma más clara este aumento debido a la menor presencia de vegetación (y consecuentemente evapotranspiración) por lo que el aporte de humedad y lluvias queda más marcado.

La Tabla 5 muestra la amplitud de los valores de presión de vapor a lo largo del día en cada una de las estaciones de medición. La menor presencia de vegetación en ‘Centro de Gobierno’ junto con las características climáticas regionales y su ubicación en la zona central de la ‘isla de calor’ de AMSS, son las razones de que la amplitud diaria de la presión de vapor sea mayor en la época seca que en la lluviosa. En el resto de estaciones su entorno vegetado (especialmente ‘Aeropuerto Ilopango’ y ‘Santa Tecla’) ocasionan mayor variación de vapor de agua a lo largo del día en la época lluviosa.

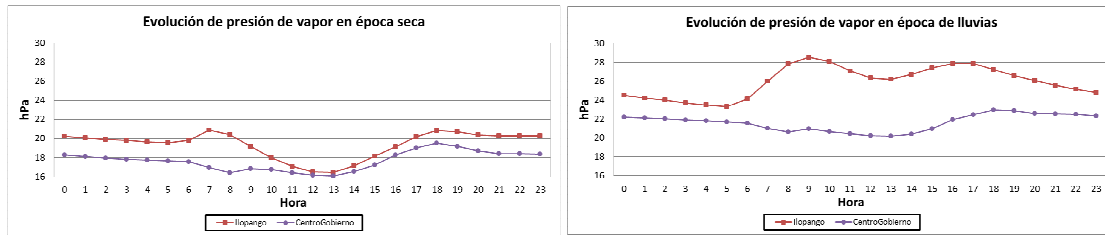


Figura 10. Evolución a lo largo del día de la presión de vapor en estaciones de AMSS

Tabla 5. Amplitud diaria de presión de vapor en estaciones de AMSS

Estaciones	Amplitud diaria de presión de vapor (hPa)		
	Epoca seca	Epoca de lluvias	Diferencia entre épocas
<b>Aeropuerto Ilopango</b>	4.41	5.19	-0.78
<b>Universidad</b>	1.99	2.17	-0.18
<b>Centro de Gobierno</b>	3.43	2.75	0.68
<b>Santa Tecla</b>	2.68	3.64	-0.95

#### 4.1.3. Viento

La topografía circundante en el AMSS (ver sección 2.1) tiene una afección significativa en las características superficiales del viento, variando de una zona a otra. Así mismo las diferentes condiciones meteorológicas reinantes a lo largo del año causan también variaciones temporales.

##### Variaciones temporales

En la Figura 11 se presenta la evolución mensual de la rosa de vientos en la estación de ‘Aeropuerto Ilopango’. Se puede apreciar que las direcciones predominantes son del Norte y Sur variando la frecuencia según la época del año. Entre octubre y marzo (mayormente la época seca) predominan los vientos de componente norte con intensidades medias-altas (excepto en octubre que se puede considerar un mes de transición entre la época seca y la húmeda). Estas masas de aire seco y frío provienen de Norteamérica. Entre Noviembre y Enero, la componente del viento es predominantemente del Norte excepto por las tardes cuando incursiona ligeramente la brisa de mar del Sur. En Marzo y sobretodo en Abril, el establecimiento de situaciones anticiclónicas sobre AMSS, reduce significativamente la intensidad del viento durante la noche, aumentando durante las tardes con viento de componente Sur (brisas de mar).

Sin embargo, entre Abril y Septiembre (mayormente la época de lluvias), son más frecuentes los vientos de componente Sur con intensidades menores a las del resto del año. Estos vientos están asociados a la brisa del mar (más intensa en esta época del año) que alcanza el AMSS a través del lago de Ilopango y la cordillera del Bálsamo.

En Julio y Agosto, durante la canícula, igualmente que en Marzo y Abril, destacan por la mañana vientos flojos del norte o asociados brisas de ladera.

La brisa del mar del Sur se percibe en AMSS generalmente después del mediodía. En la Figura 11 se puede apreciar la distribución de velocidades y direcciones en diferentes periodos del día. Así pues la componente Sur se registra casi todos los días entre las 12:00 y las 16:00 hora local (UTC-6). Durante la mañana y la noche son más comunes los vientos de componente Norte.

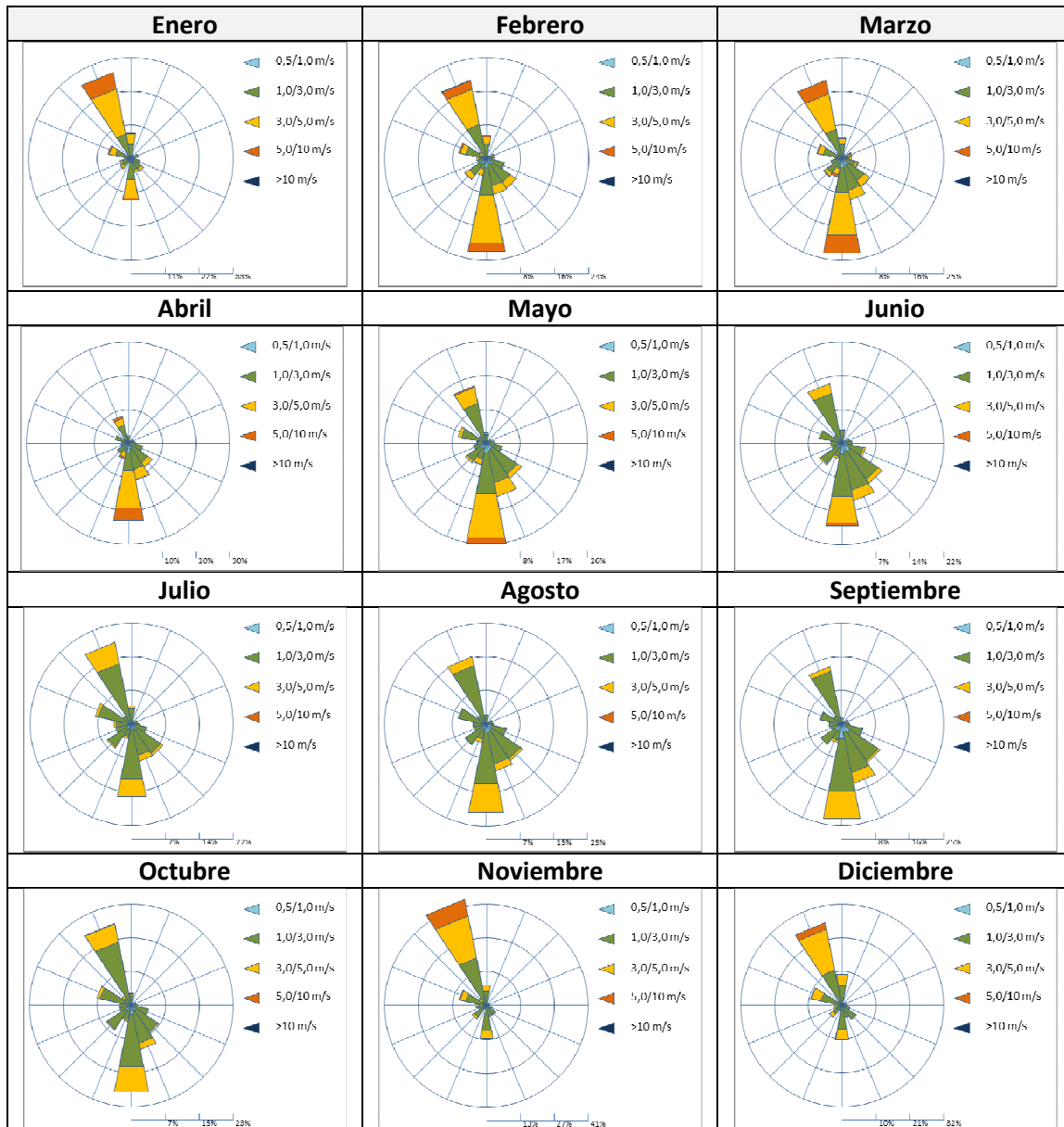


Figura 11. Evolución mensual de los patrones de viento en 'Aeropuerto Ilopango'

### Variaciones espaciales

Aunque el régimen general de direcciones de viento es el presentado en la sección anterior, existen circulaciones de carácter local como son las brisas de ladera que aportan viento desde el volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo (Figura 1). Estos vientos quedan representados el MCU (ver sección 4.3.2). Estas circulaciones local-regionales se dan más frecuentemente en situaciones de estabilidad anticiclónica cuando los vientos a nivel mesoescalar reducen su intensidad (p.ej. en Marzo-Abril o

durante la época de lluvias con baja intensidad de vientos alisios del NE). Las intensidades de estos vientos suele ser medio-baja (entorno a los 3 m/s)

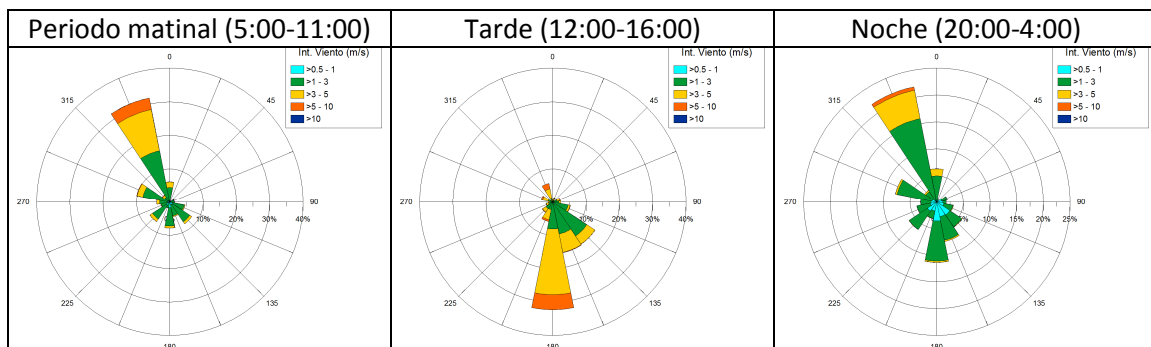


Figura 12. Evolución mensual de los patrones de viento en 'Aeropuerto Ilopango'

## 4.2. Análisis de la isla de calor de AMSS

### 4.2.1. Mediciones superficiales

La anomalía media de temperatura del aire ( $\Delta T_{u-r}$ ) entre 'Aeropuerto Ilopango' (zona urbana del AMSS) y Sensuntepeque (zona rural) en el periodo 2011 a 2015 es de  $1.97 \pm 1.33^\circ\text{C}$  en el caso de la temperatura mínima diaria ( $T_{\min}$ ) y de  $-0.66 \pm 1.28^\circ\text{C}$  en el caso de la temperatura máxima diaria ( $T_{\max}$ ). La anomalía negativa ( $T_u < T_r$ ) durante las primeras horas de la tarde ( $T_{\max}$ ) se podría justificar por la influencia de la entrada de la brisa del mar que alcanza AMSS por el Sur con mayor influencia (y mayor potencial de enfriamiento) que en la zona rural de Sensuntepeque ubicada a unos 40 kilómetros en dirección Noreste.

En la Figura 13 se presentan los valores anuales de  $\Delta T_{u-r}$  donde se puede apreciar diferencias entre años tanto para  $T_{\max}$  como para  $T_{\min}$ . Este hecho podría estar influenciado por los efectos del evento el Niño/Oscilación del Sur (ENOS). En concreto, los años 2014 y 2015 se han clasificado como un ENOS muy fuerte que como es sabido desarrolla temporadas de fuertes sequías en la región y consecuentemente menor potencial vegetativo. En estas condiciones  $T_{\max}$  en la zona rural puede aumentar con respecto a la zona urbana. De la misma forma la anomalía de  $T_{\min}$  (entre zona urbana y rural) aumenta. La escasez de vegetación con lleva una mayor pérdida de calor por la noche en la zona rural disminuyendo  $T_{\min}$  y aumentando su diferencia con la zona urbana.

A lo largo del año la anomalía de temperatura ( $\Delta T_{u-r}$ ) también varía de forma apreciable (Figura 14). Los resultados muestran que en los meses de mayor temperatura de aire y sequedad (Abril), ocurre que la temperatura  $T_{\max}$  en la zona rural es bastante mayor que en la urbana. Esto está en consonancia con los resultados mostrados para los años más secos y cálidos de fuerte ENOS. Además, en esta época los vientos Norte fríos cesan y las brisas de mar del Sur (después del mediodía) llegan con más facilidad a AMSS con mayor poder de enfriamiento que en la zona rural de Sensuntepeque. Por el contrario, la anomalía nocturna (para  $T_{\min}$ ) es significativamente mayor en la época seca (Noviembre a Marzo) cuando se produce la mayor acumulación de calor en el área urbana. Los resultados en el periodo nocturno

son consistentes con el efecto ‘isla de calor’ de otras ciudades. Una mayor presencia de vegetación en la época de lluvias implica que la liberación por la noche del calor acumulado en zona urbana sea menos intensa.

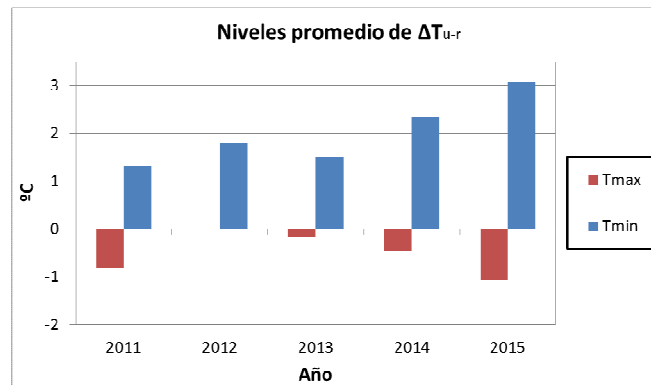


Figura 13. Evolución anual de las anomalías  $\Delta T_{u-r}$  entre la estación urbana de ‘Aeropuerto Ilopango’ y la rural de ‘Sensuntepeque’

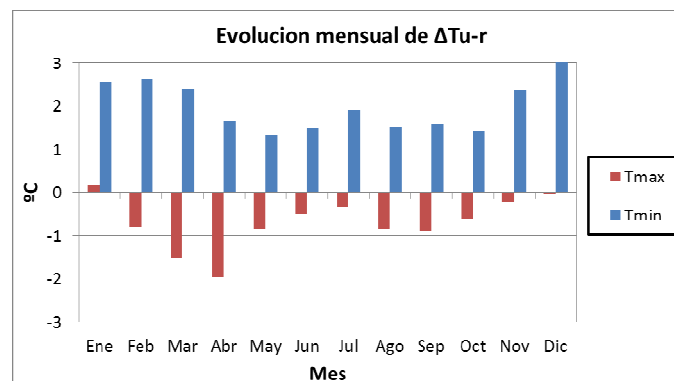


Figura 14. Evolución mensual de las anomalías  $\Delta T_{u-r}$  entre la estación urbana de ‘Aeropuerto Ilopango’ y la rural de ‘Sensuntepeque’

Si analizamos los resultados de la intensidad de la isla de calor ( $\Delta T_{u-r}$ ) a primera hora de la mañana (Tmin) por dirección de viento (Tabla podemos observar que los valores más altos se dan en direcciones de viento del N-NNW las cuales son las más frecuentes en ‘Aeropuerto Ilopango’ en ese momento del día (49.84%). Por el contrario, las direcciones S-SSE-SE registran intensidad de isla de calor cerca de 1 °C más bajas que con vientos del Norte. En ambos casos, al aumentar la velocidad de viento también aumenta la intensidad de la isla de calor lo cual hay que interpretar como la llegada de aire caliente a ‘Aeropuerto Ilopango’ eliminando la situación de estabilidad nocturna y acumulación de frío superficial (el entorno de ‘Aeropuerto Ilopango’ está muy vegetado). En este sentido, también se puede justificar que en épocas más secas cuando hay menos potencial vegetativo y los vientos del norte son más intensos, la intensidad de la isla de calor es mayor que en la época de lluvias con vientos del Sur (más típicos en esta época). Por otra parte, no hay que olvidar la ubicación de la estación de medida ya que los vientos fuertes del Norte pueden arrastrar el calor acumulado de la zona más urbanizada de AMSS hacia ‘Aeropuerto Ilopango’.

Tabla 6. Anomalías de temperatura ( $\Delta T_{u-r}$ ) con respecto a  $T_{min}$  para diferentes sectores de viento y rangos de velocidades de viento en ‘Aeropuerto Ilopango’

Sector de viento	Categorías de velocidades de viento (m/s)					Todas las velocidades	Ocurrencia del sector de viento (%)
	<1.0	1.0-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	≥ 3.5		
N	1.8	1.7	2.5	2.8	3.5	2.7	12.64
NNE	1.6	0.7	-	6.1	-	1.6	0.39
NE	1.4	1.6	-	-	-	1.4	0.33
ENE	1.1	1.4	2.5	-	-	1.6	1.48
E	1.4	1.3	-	-	-	1.4	0.89
ESE	1.3	1.3	1.8	1.5	-	1.4	2.07
SE	1.3	1.3	1.9	-	-	1.4	3.85
SSE	1.3	1.1	0.6	-0.1	2.2	1.2	3.32
S	1.5	1.7	2.0	2.4	-	1.7	8.26
SSW	1.5	1.3	2.9	4.7	-	1.7	1.32
SW	1.4	1.0	2.0	2.8	3.4	1.6	7.70
WSW	1.2	1.3	2.6	3.1	1.8	1.8	3.65
W	1.7	1.6	1.7	4.7	-	1.7	3.03
WNW	1.7	1.4	2.0	2.8	2.7	1.9	11.26
NW	0.8	1.1	1.3	1.2	1.9	1.1	2.60
NNW	2.0	1.5	1.8	2.3	2.2	2.0	37.20

Otras ubicaciones más urbanizadas dentro del AMSS como es ‘Centro de Gobierno’ presentan unas características de climáticas diferentes. Mientras en ‘Aeropuerto Ilopango’ a primera hora de la mañana el aire frío puede ser desplazado por la llegada de aire más cálido y  $T_{min}$  aumentar al incrementarse la velocidad de viento, en el caso de ‘Centro de Gobierno’ una mayor intensidad de viento implica mayor poder de eliminación del calor urbano acumulado en el entorno fuertemente urbanizado (Figura 15). Este último resultado es acorde con la influencia del viento en la isla de calor: a mayor intensidad de viento, menor intensidad de la isla de calor.

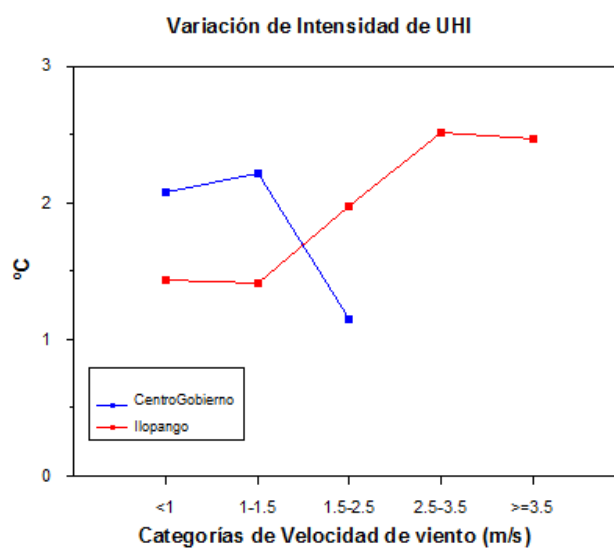


Figura 15. Variación de la intensidad de la isla de calor ( $\Delta T_{u-r}$ ) con la intensidad de viento para las estaciones urbanas de ‘Aeropuerto Ilopango’ y ‘Centro de Gobierno’



#### 4.2.2. Mediciones remotas

Los resultados del análisis de la temperatura superficial terrestre (TST) de AMSS medidos por Landsat han permitido una caracterización de esta variable como indicador del efecto de la isla de calor y el sobrecalentamiento urbano.

##### Variaciones espaciales y estacionales en el área urbana

En la Figura 16 se presenta el histograma de las anomalías de TST con respecto al promedio del área urbana del AMSS para el año 2015. Los resultados indican que existe una amplitud térmica de 16°C entre diferentes zonas del área urbana debido principalmente a los diferentes usos de suelos. Las mayores anomalías positivas corresponden a zonas más calientes y artificializadas, mientras que las mayores anomalías negativas están asociadas a zonas más frías y con alta presencia de vegetación arbórea.

Durante la época de lluvias la distribución de anomalías es más amplia que en la época seca. Es decir, en la época seca la diferencia espacial de TST es menor. En concreto, el 63.5% del área urbana del AMSS difiere en la época seca menos de 2°C respecto al promedio del total de TST, mientras que en la época de lluvias es el 50.3% del área urbana. Estos resultados son acordes con el mayor potencial vegetativo durante la época de lluvias provocando mayor diferencia de TST entre zonas artificializadas/urbanizadas y zonas más naturales y vegetadas.

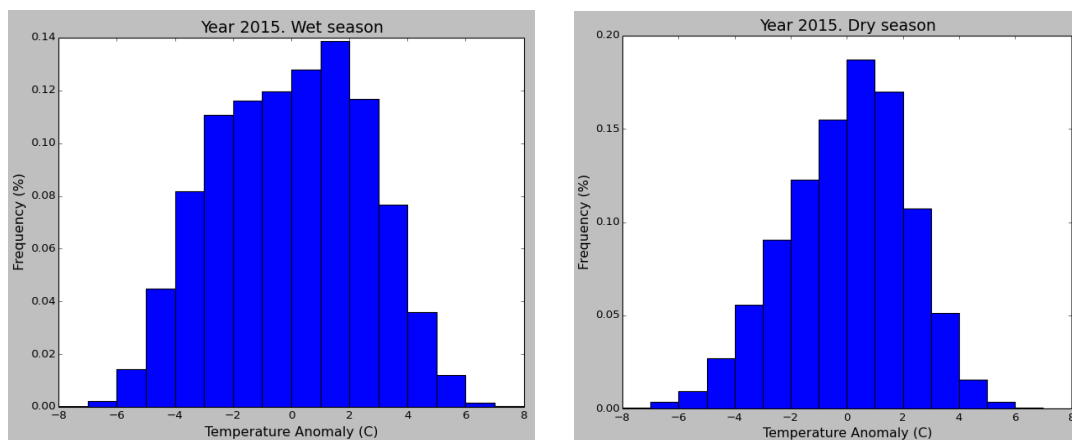


Figura 16. Histograma de las anomalías de TST con respecto al promedio en el área urbana del AMSS en las épocas seca y de lluvias para 2015

Es interesante también analizar las zonas más calientes y frías durante las dos estaciones climáticas del año. Para el año 2015, las zonas más calientes se han clasificado como las que la anomalía de TST está por encima del 3º cuartil (percentil 75) siendo 1.95°C para la época de lluvias y 1.54°C para la época seca. Por su parte las zonas frías son las que están por debajo del 1º cuartil (percentil 25) siendo -2.03°C para la época de lluvias y -1.45°C para la época seca. Así pues, en la época de lluvias las zonas calientes y frías tienen TST más extremas con respecto al promedio del AMSS que en la época seca.



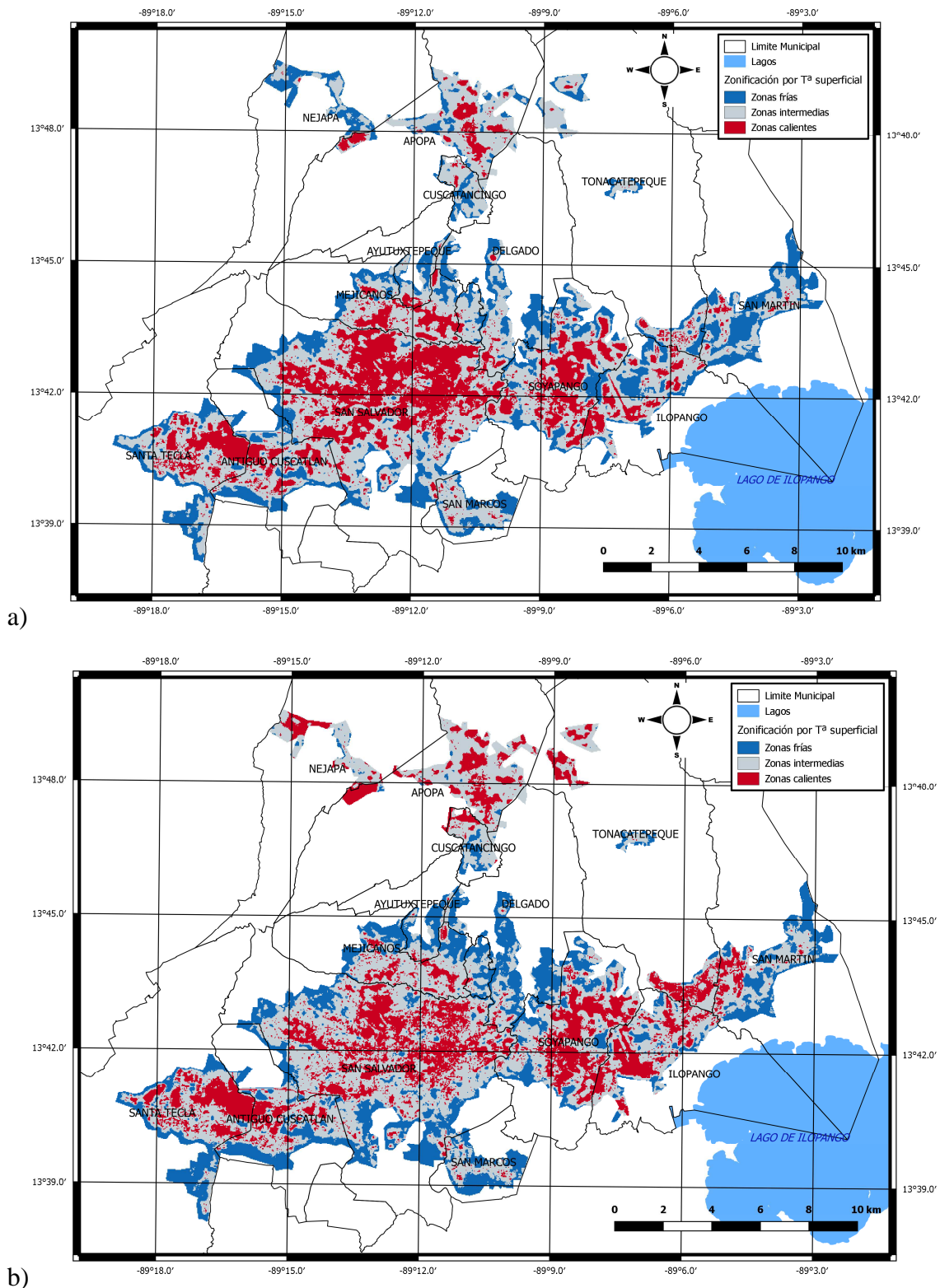


Figura 17. Distribución espacial de zonas frías y calientes en AMSS en el año 2015 para las épocas de lluvias (a) y seca (b)

La distribución espacial de las zonas más calientes y frías en el año 2015 para la estación seca y lluviosa se observa en la Figura 17. En la época de lluvias las zonas calientes se concentran en las zonas más urbanizadas y con menor presencia de

vegetación. Sin embargo, en la época seca existen otras zonas que debido al bajo potencial vegetativo aumentan su TST pudiendo calificarse como zonas calientes. Un ejemplo son ciertas zonas urbanas de Nejapa que durante la época de lluvias se califican como zonas frías y durante la época seca, como calientes. Otras zonas de Apopa, Ilopango y San Martín y el sur de Tonacatepeque también aumentan de forma relevante el porcentaje de zonas calientes durante la época seca. De igual forma, la mancha de zonas calientes en el municipio de San Salvador es más intensa durante la época de lluvias debido a que en este municipio la presencia de vegetación es menor que en otros municipios más vegetados y consecuentemente su TST es mayor.

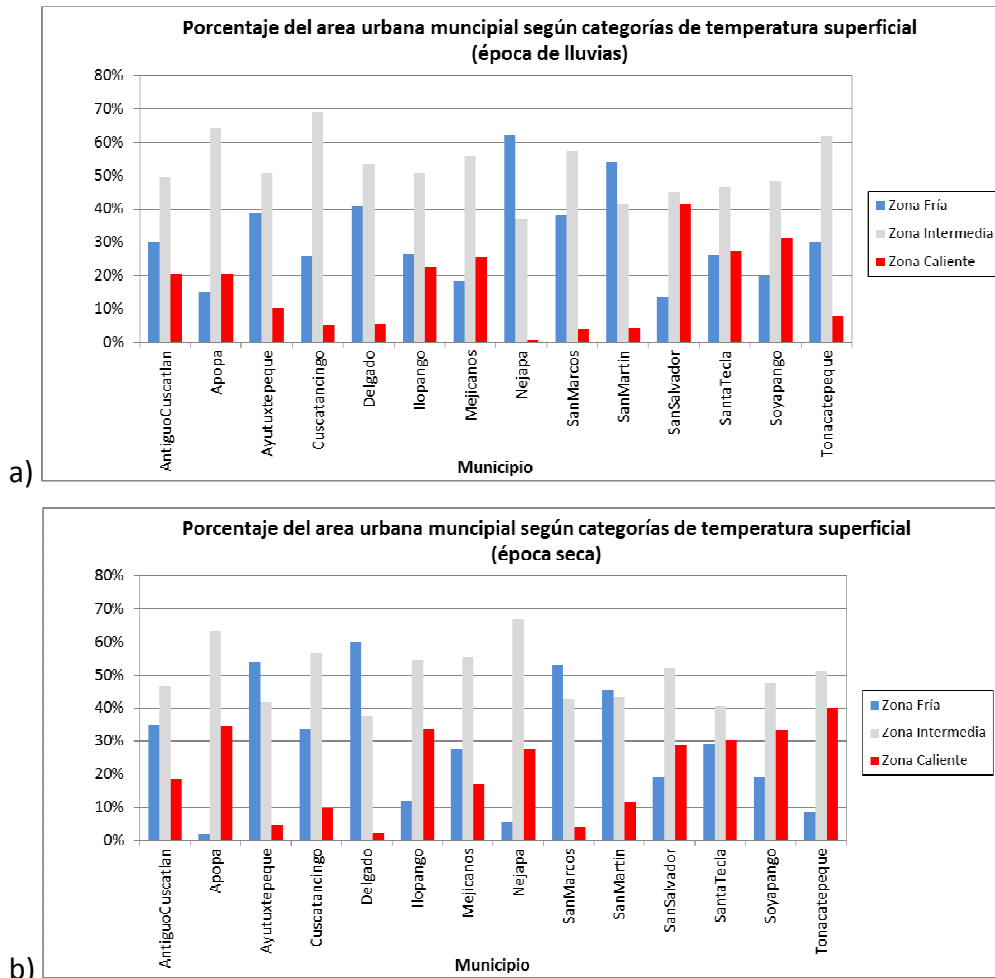


Figura 18. Porcentaje del área urbana de cada municipio con calificación de zonas caliente, fría e intermedia para el año 2015 en la época de lluvias (a) y seca (b)

Los resultados mostrados en el párrafo anterior se pueden visualizar en la Figura 18. En la época seca los municipios con mayor porcentaje (>25%) de zonas calientes son Apopa, Ilopango, Nejapa, San Salvador, Santa Tecla, Soyapango y Tonacatepeque, mientras que en la época de lluvias son Mejicanos, San Salvador (hasta 41%), Santa Tecla y Soyapango. Los municipios con mayor porcentaje (>25%) de zonas frías en su área urbana son Antiguo Cuscatlan, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Ciudad Delgado, Mejicanos, San Marcos, San Martín y Santa Tecla para la época seca y Antiguo

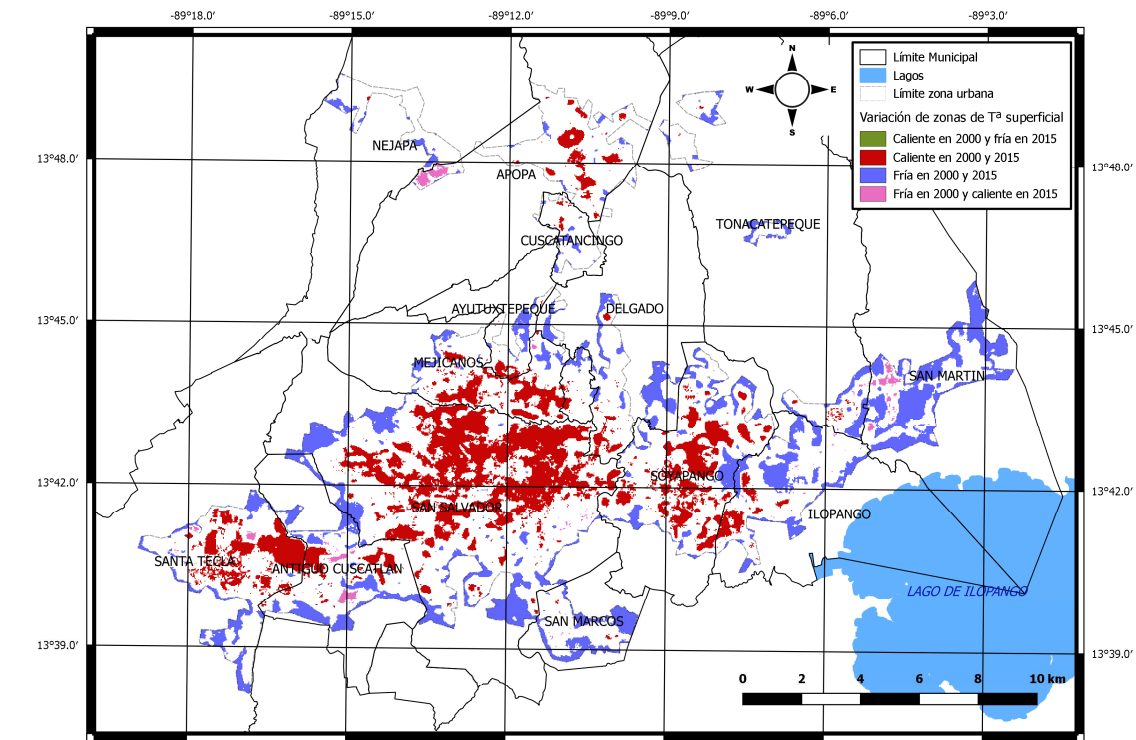
Cuscatlan, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Ciudad Delgado, Ilopango, Nejapa, San Marcos, San Martín, Santa Tecla y Tonacatepeque para la época de lluvias.

Los resultados son acordes con el desarrollo urbano de cada uno de los municipios y la presencia de vegetación. Por ello, áreas urbanas de municipios como San Salvador o Soyapango presentan elevada presencia de zonas calientes, mientras que otros como Antiguo Cuscatlan, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Ciudad Delgado, San Marcos y San Martín presentan mayor presencia de zonas clasificadas como frías en AMSS. En cualquier caso, como se ha mostrado anteriormente, la diferencia de potencial vegetativo entre épocas del año, varía la categorización de las zonas. Finalmente, merece la pena mencionar el caso de Santa Tecla que posee un porcentaje alto tanto de zonas calientes como frías. Básicamente, la razón es la ubicación del municipio, a una cota topográfica alta donde coexisten zonas altamente vegetadas con desarrollos urbanos intensos que derivan en TST bajas y altas respectivamente.

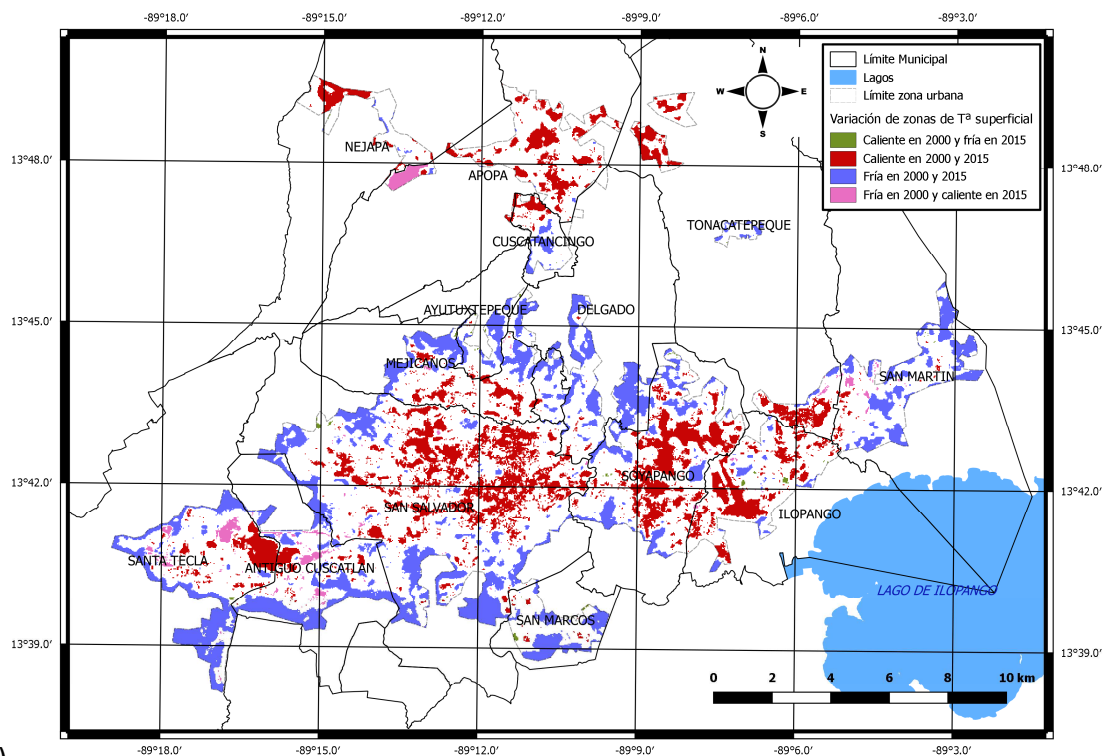
### **Variaciones temporales a largo plazo en el área urbana**

La evolución de TST en lo que actualmente se considera el área urbana (Figura 4) ha evolucionado de forma significativa en los últimos años. Evidentemente, uno de los factores que ha influido de manera decisiva ha sido la sustitución de zonas naturales con fuerte presencia de vegetación por zonas urbanizadas con alta presencia de materiales artificiales cuyas características térmicas conllevan una acumulación de calor proveniente de la radiación solar y consecuentemente un aumento de la temperatura superficial.

En la Figura 19 se puede apreciar la evolución de las zonas calientes y frías entre los años 2000 y 2015. Se puede distinguir perfectamente como zonas que en el año 2000 se clasificaban como frías han pasado a ser clasificadas como calientes en 2015. Sin embargo, apenas hay zonas calientes en el año 2000 que hayan pasado a ser frías en 2015. Este resultado era de esperar ya que las zonas urbanas y artificializadas raramente recuperan las características naturales originales. Estos resultados se pueden observar tanto en la época seca como en la lluviosa (Tabla 7). En concreto el 16.3% del área de AMSS se mantiene como zona caliente entre 2000 y 2015, un 1.1% (en época seca) pasa de zona fría en 2000 a zona caliente en 2015, un 7.5% (en época seca) pasa de zona intermedia en 2000 a zona caliente en 2015. Destacan los municipios de Antiguo Cuscatlan, Apopa y Santa Tecla por ser en los que mayor área urbana ha pasado de ser clasificada en el año 2000 como zona fría a zona caliente en el año 2015 (para la época seca), concretamente, el 4.20%, 4.64% y 3.73% respectivamente. Así mismo, para el mismo periodo del año (época seca) los municipios que mayor área urbana ha pasado de zona intermedia en 2000 a zona caliente en 2015 son Antiguo Cuscatlan (8.87%), Apopa (6.13%), Ilopango (7.60%), San Martín (7.72%), San Salvador (8.71%), Santa Tecla (15.25%), Soyapango (7.56%) y Tonacatepeque (7.01%). Estos resultados están relacionados con el desarrollo urbano y artificialización del suelo que estos municipios han experimentado durante los últimos quince años.



a)



b)

Figura 19. Distribución espacial de la variación de zonas frías y calientes en AMSS entre los años 2000 y 2015 para las épocas de lluvias (a) y seca (b)

Tabla 7. Variación de clasificaciones de zonas (calientes/intermedias/frías) entre los años 2000 y 2015

Descripción del área urbana de AMSS	Epoca seca	Epoca lluvia
Caliente en 2000 y 2015	16.3%	18.3%
Caliente en 2000; Fría en 2015	0.1%	0.0%
Caliente en 2000; Intermedia en 2015	8.5%	6.7%
Fría en 2000 y 2015	18.6%	17.1%
Fría en 2000; Caliente en 2015	1.1%	0.7%
Fría en 2000; Intermedia en 2015	5.3%	7.2%
Intermedia en 2000 y 2015	36.2%	36.1%
Intermedia en 2000; Caliente en 2015	7.5%	6.0%
Intermedia en 2000; Fría en 2015	6.3%	7.9%

### **Anomalías urbano & rural**

Los resultados estadísticos de la cuantificación de la anomalía de TST en el área urbana de AMSS respecto a la temperatura rural ( $TST_{RURAL}$ ), también conocida isla de calor superficial (ICS), se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Evaluación estadística de la ICS en los años 2000 y 2015

Valores estadísticos de ICSs	Año 2000		Año 2015	
	Epoca lluvias	Epoca seca	Epoca lluvias	Epoca seca
<b>Promedio</b>	3.95	2.68	4.50	3.23
<b>Desv. Stand.</b>	2.50	2.14	2.56	2.16
<b>Percentil 10</b>	0.66	-0.27	1.05	0.26
<b>Percentil 25</b>	2.09	1.21	2.48	1.77
<b>Percentil 50</b>	3.91	2.91	4.59	3.43
<b>Percentil 75</b>	5.92	4.23	6.46	4.76
<b>Percentil 90</b>	7.25	5.27	7.81	5.90

El promedio de ICS aumenta del año 2000 al 2015 alrededor de medio grado tanto en la época de lluvias como en la seca, siendo los valores más altos en la época de lluvias. La razón de que los valores de ICS sean menores en la época seca viene condicionada por el menor potencial vegetativo y un calentamiento más rápido de la superficie rural en el periodo matinal (cuando se realiza la medición). Ese aumento de TST en la época seca en el entorno rural disminuye la diferencia de temperatura entre la zona urbana y la rural.

La distribución espacial de los valores de ICS para el año 2015 se presenta en la Figura 20. Se puede observar como en la época de lluvias el área urbana de AMSS presenta valores positivos prácticamente en todo el territorio indicando la acumulación de calor y mayor aumento de la  $TST_{URBANA}$  con respecto al entorno rural ( $TST_{RURAL}$ ) con fuerte presencia de vegetación. En la época seca la presencia de valores negativos de ICS indica una mayor temperatura media rural asociada a la merma de la vegetación.



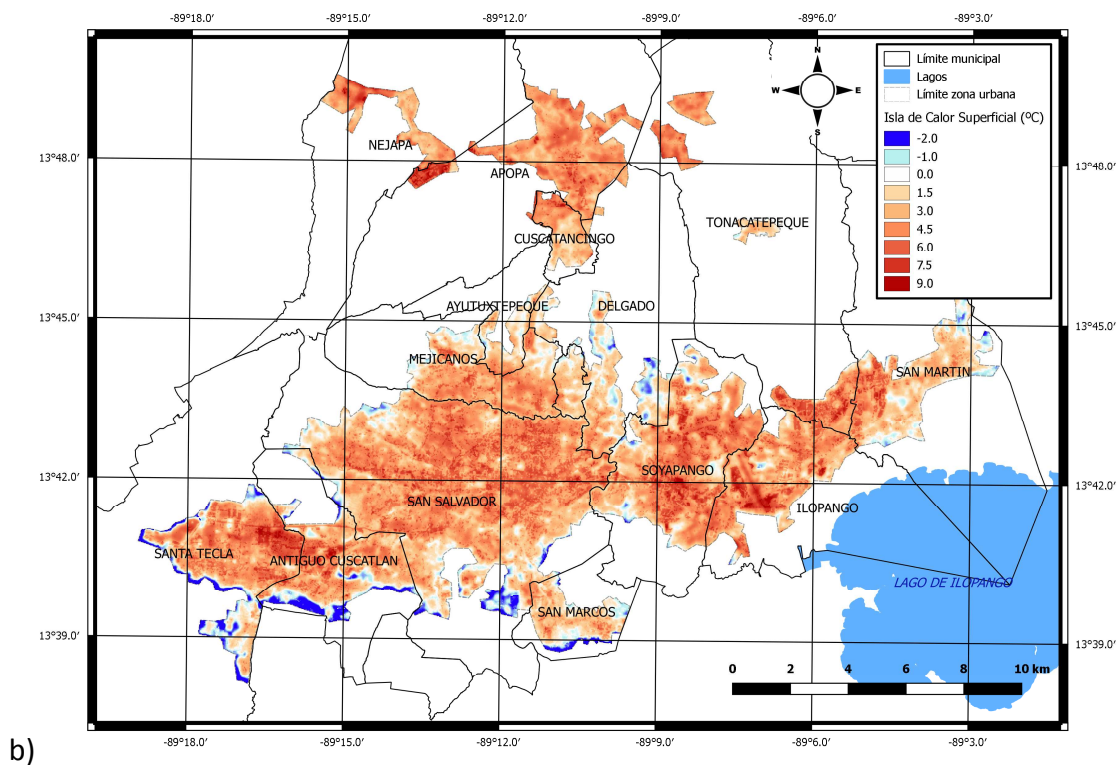
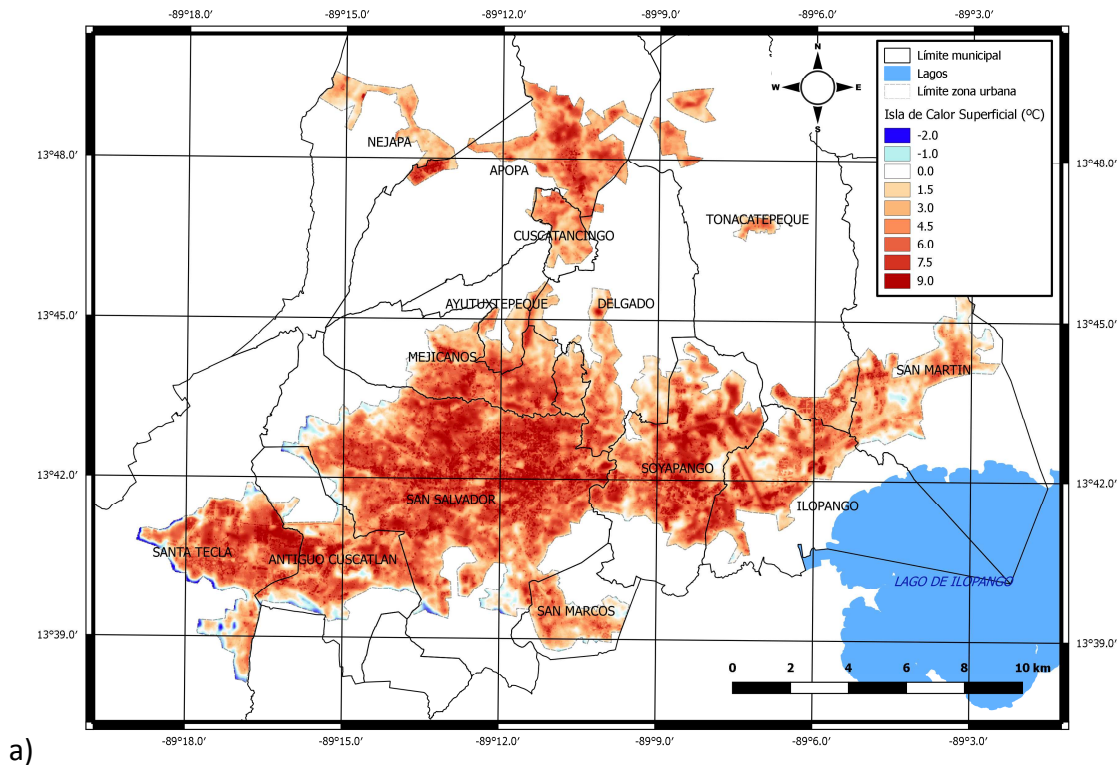


Figura 20. Distribución espacial de la isla de calor superficial (ISC) en AMSS para el año 2015 para las épocas de lluvias (a) y seca (b)

El análisis de ISC por municipios para el año 2015 se presenta en la Figura 21. En la época seca destacan por tener un valor promedio de ISC mayor de 3.5°C los siguientes municipios: Ilopango, Nejapa, San Salvador, Soyapango y Tonacatepeque. En este

periodo del año, Ayutuxtepeque, Ciudad Delgado y San Marcos presentan los menores valores de ICS (<2°C).

En la época de lluvias los municipios con mayores valores promedio de ISC (>4.0°C) son Antiguo Cuscatlan, Apopa, Ilopango, Mejicanos, San Salvador, Santa Tecla, Soyapango. Los menores valores los registran Ciudad Delgado, Nejapa, San Marcos y San Martín.

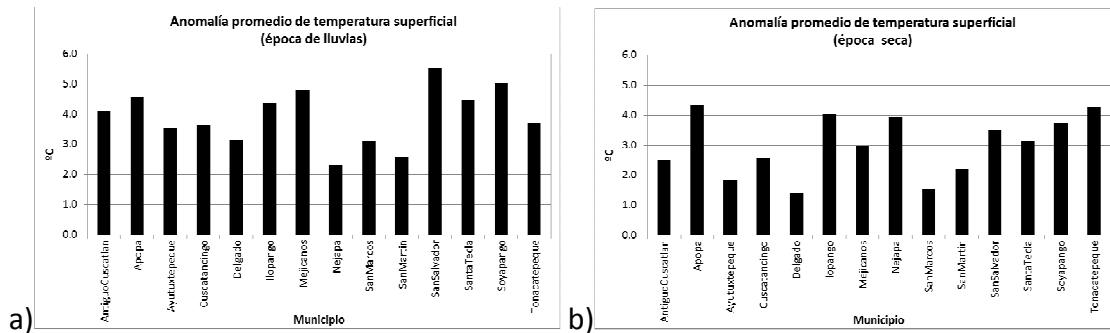


Figura 21. Anomalía promedio de  $TST_{urbana}$  respecto a  $TDT_{rural}$  del área urbana de cada municipio para el año 2015 en la época de lluvias (a) y seca (b)

### 4.3. Mapa de Clima Urbano

#### 4.3.1. Descripción de tipologías urbanas

El análisis del desarrollo urbano en AMSS ha permitido hacer una clasificación de usos de suelo en función de parámetros climáticos. A continuación se presentan los desarrollos urbanos más típicos dentro de AMSS seleccionados de la categorización de Stewart & Oke (2012).

#### Zonas abiertas de altura baja

Corresponden a edificios pequeños de 1-3 plantas que pueden estar juntos o separados y frecuentemente ordenados (en forma de malla). Desde la calle, la visión del cielo apenas queda limitada. Presencia de arbolado y en general bastante vegetación.



Figura 22. Ilustraciones ejemplo de desarrollos urbanos de zonas abiertas de altura baja

#### Zonas compactas de altura baja

Corresponden a edificios juntos o muy próximos de 1-3 plantas. Los edificios son pequeños y están compactados en calles estrechas, frecuentemente sin una

ordenación clara. Desde la calle, la visión del cielo queda bastante limitada. En general, la superficie está casi completamente pavimentada con pocos o escasos árboles.



Figura 23. Ilustraciones ejemplo de desarrollos urbanos de zonas de compactas de altura baja

### **Zonas degradadas**

Corresponden a edificios de una sola planta generalmente compactados o muy cerca unos de otros y sin una disposición ordenada. Los edificios están separados por calles estrechas. No existe una infraestructura básica consolidada. Los materiales de los edificios son poco consistentes. Puede existir presencia de vegetación (árboles dispersos) pero no es muy frecuente.



Figura 24. Ilustraciones ejemplo de desarrollos urbanos de zonas de degradadas

Hay que dejar claro que estos desarrollos urbanos no son los únicos que existen en AMSS. Sin embargo, si son lo que más predominan. También existen algunos edificios especialmente altos, pero aislados, y zonas industriales.

Así pues, en el desarrollo urbano de AMSS predomina el bajo volumen edificado por unidad de área, que en ciertas zonas está acompañado de abundante vegetación (Figura 25). Desde el punto de vista de la acumulación de calor urbano, estas características son positivas para minimizar la isla de calor que tendrá en general menor intensidad cuanto mayor sea presencia de vegetación urbana. Sin embargo, la superficie ocupada o artificializada en AMSS ocupa una gran extensión lo cual conlleva una fuerte alteración de las características superficiales que también repercute en las variables climáticas y de confort térmico.



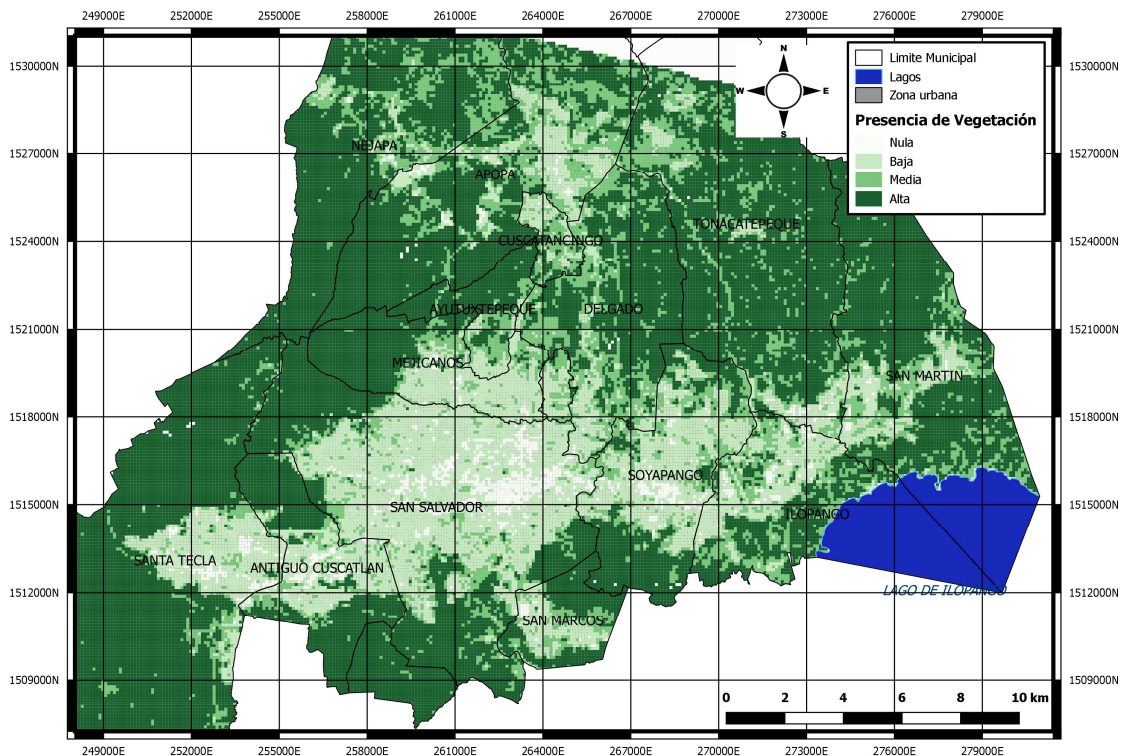


Figura 25. Presencia de vegetación en época de lluvias en 2015 en AMSS calculada a partir del índice NDVI de Landsat 8

#### 4.3.2. Mapa de Análisis del Clima Urbano

La Figura 26 muestra en Mapa de Análisis del Clima Urbano (MCU-An) incluyendo todos los aspectos climáticos relevantes para la planificación urbana. Es el resultado de aplicar diferentes pesos a las capas de información cartográfica disponibles (ver sección 3.2.2).

El MCU-An muestra la distribución espacial de seis categorías climáticas a lo largo del territorio del AMSS. Dichas categorías definen zonas con un impacto similar en el confort térmico. Así mismo se presenta información gráfica de los patrones de movimiento de aire (regional y local) que influyen en el área urbana. Las flechas representan la dirección del viento.

A continuación se presentan una descripción de cada categoría:

##### **Categoría 1: Áreas de producción de aire frío**

Estas corresponden a zonas rurales abiertas en las cotas topográficas más altas donde no existe desarrollo urbano. Se localizan principalmente en pendientes vegetadas y producen aire frío que puede llegar a la zona urbana de AMSS. Pueden ocurrir circulaciones térmicas (vientos catabáticos). Se caracterizan por un buen potencial dinámico y carga térmica negativa (es decir, producen aire frío).

## **Categoría 2: Áreas de producción de aire fresco**

Estas también son áreas abiertas pero que producen menos aire frío que las de la categoría 1 debido al tipo de flujo de aire que aportan a la zona urbana. Se pueden encontrar en cotas menos elevadas y/o con menos pendiente que las de la categoría 1. También en zonas afectadas por pasillos/áreas ventiladas cerca del área urbana. No son, en general, zonas urbanizadas y se caracterizan por buen potencial dinámico.

## **Categoría 3: Áreas de climas mixtos**

Estas áreas pueden generar aire frío en ausencia de radiación solar. Sin embargo, durante el periodo diurno pueden aumentar la temperatura con respecto a las categorías 1 y 2. Este tipo de áreas incluye zonas de edificaciones dispersas o zonas de desarrollo de baja densidad y con vegetación. También se incluye ciertas áreas urbanas situadas a cotas elevadas con buena ventilación (por ejemplo, Santa Tecla) y algunas zonas de transición entre la zona urbana y natural, así como ciertos parques urbanos. Consecuentemente, estas áreas se pueden considerar con baja carga térmica y potencial dinámico moderado.

## **Categoría 4: Áreas de calentamiento bajo**

Estas corresponden a zonas con un nivel de desarrollo urbano importante. Estas zonas pueden mitigar la acumulación de calor bien por el efecto de la vegetación o por la altura topográfica. Pueden estar próximas a pasillos/áreas ventiladas por lo que no tienen una carga térmica alta y pudieran tener una ventilación moderada.

## **Categoría 5: Áreas de calentamiento medio**

Estas zonas corresponden a las zonas más centrales de AMSS con menor capacidad de ventilación y situadas en cotas menores que las categorías 1 a 4, generalmente por debajo de los 750 metros. La presencia de vegetación, aunque variable, no se eleva. Así pues, en estas áreas la carga térmica es moderada y el potencial dinámico es bajo.

## **Categoría 6: Áreas de calentamiento alto**

Son zonas situadas en cotas bajas (por debajo de 650 metros) y la presencia de vegetación es escasa. Son, en general, desarrollos urbanos compactos donde se puede acumular el calor y la falta de ventilación puede empeorar el confort térmico significativamente (por ejemplo, en Apopa y Soyopango). Así pues en general, la carga térmica se puede considerar alta y el potencial dinámico, en general, bajo.

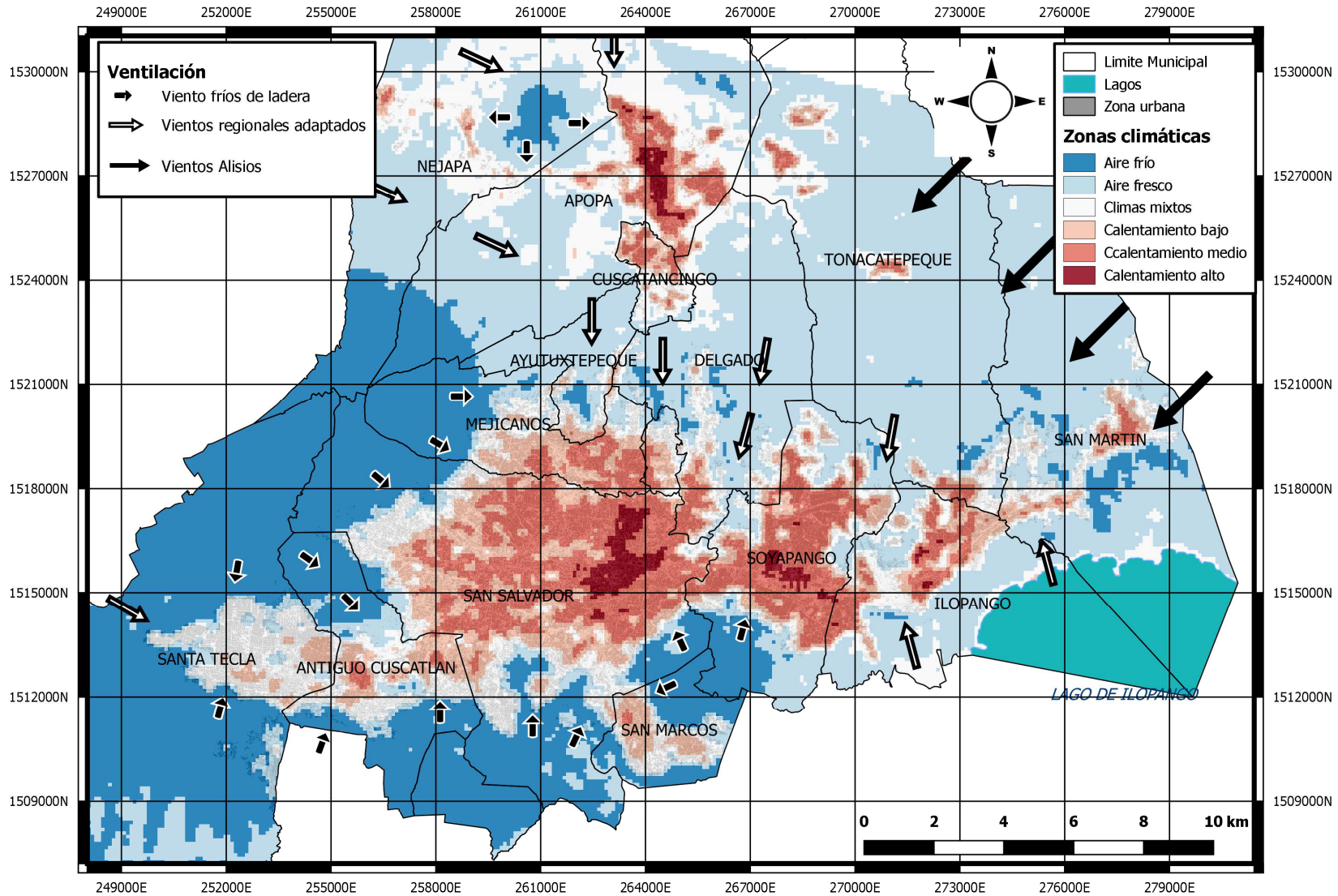


Figura 26. Mapa de Análisis del Clima Urbano (MCU-An) en AMSS

En el MCU-An se incluyen todos los aspectos climáticos esenciales para que los urbanistas tengan en cuenta y mejoren el clima de AMSS

El análisis del clima en AMSS ha mostrado por una parte la influencia de la topografía en los patrones de ventilación del área urbana canalizando los vientos regionales, y por otra, la existencia de circulaciones térmicas (vientos de ladera fríos) especialmente del volcán de San Salvador y de la cordillera del Bálsamo, que pueden ser aprovechadas a través de las quebradas que entran en el área urbana para reducir la carga térmica y consecuentemente mejorar el confort del peatón. Estos aspectos deben ser considerados cuidadosamente durante el proceso de planificación urbana.

Debe quedar claro que el Mapa de Clima Urbano (tanto el análisis climático como las recomendaciones (ver sección 4.3.3) se focaliza en el conjunto del AMSS, lo que se conoce como aspectos climáticos mesoescalares. Sin embargo, para entrar en mayor nivel de detalle en áreas más concretas y definidas (por ejemplo, comunidades específicas) este mapa no tiene validez y es necesario otros estudios específicos. Así pues, el MCU se considera una herramienta que garantiza el óptimo desarrollo (desde el punto de vista climático) del AMSS como un conjunto.

#### 4.3.3. Mapa de Recomendaciones para el Clima Urbano

Como se ha explicado en la sección anterior, los sistemas de ventilación pueden ser unos instrumentos clave para la mitigación del calor acumulado en el área urbana (es decir, la isla de calor). En este sentido, se podrían llevar a cabo actuaciones estratégicas en las zonas cercanas a pasillos/zonas ventiladas para extender la influencia y favorecer la entrada de aire fresco en el área urbana. Estos pasillos/zonas ventiladas deberían estar libres de obstáculos o ser de baja altura y estar dispuesto de forma que favorezcan el flujo de aire hacia el interior del área urbana. En las zonas montañosas tiene sentido el uso de las quebradas como pasillos de ventilación que pudieran facilitar la entrada de aire frío desde cotas más elevadas. Una zona que si duda se debería conservar es toda la zona natural en el norte del municipio de Antiguo Cuscatlan.

En cuanto al uso de la climatología regional, vimos en la sección 4.1.3 que los vientos regionales tienen direcciones predominantes del norte-sur. Así pues, en la zona de Soyapango e Ilopango podría tener sentido **abrir corredores o mantener y priorizar la ventilación y entrada de aire fresco a zonas interiores del área urbana**. Otra forma de mejorar la ventilación es considerar la orientación de las calles en la misma dirección que el viento predominante.

Así mismo, una posible reurbanización en el casco histórico de San Salvador y ciertas zonas de Soyapango (e igual en otros municipios) deberían **considerar entre sus prioridades el incremento de la superficie vegetada y la presencia de las especies arbóreas**. En la actualidad, como se puede apreciar en la Figura 25 hay zonas en las que el potencial vegetativo (y consecuentemente su potencial de enfriamiento) es bajo e incluso nulo. En la medida de lo posible, las zonas a reurbanizar deberían considerar otro tipo de diseño urbano con edificios de altura media (5-6 alturas) y en muchos casos calles más anchas favoreciendo una ventilación adecuada que junto con la



presencia de vegetación ubicada de forma estratégica puedan mitigar la acumulación de calor y mejorar el confort térmico del peatón.

Las recomendaciones en planificación se han focalizado en la casuística del clima en el AMSS y las zonas climáticas definidas en el MCU-An. En este sentido se han definido tres zonas de sensibilidad climática en el Mapa de Recomendaciones para el Clima Urbano (MCU-Re):

1. Áreas a preservar: son áreas frías y frescas con buena ventilación
2. Áreas a atender (o de precaución): son áreas con baja carga térmica donde el impacto de nuevos desarrollos debe ser evaluado.
3. Áreas a mejorar: áreas donde es necesario disminuir la carga de calor urbano. Actuaciones específicas de enfriamiento deberían llevarse a cabo junto con una mejora de la ventilación

La distribución espacial de estas zonas se presenta en la Figura 27.

Las recomendaciones en planificación urbana a escala del Mapa de Clima Urbano (conjunto de AMSS) se deben focalizar en controlar los siguientes parámetros:

- ✓ Volumen edificado
- ✓ Fracción superficial edificada (cubrición de suelo)
- ✓ Altura de edificios
- ✓ Localización y orientación de edificios y calles
- ✓ Zonas verdes
- ✓ Materiales superficiales
- ✓ Considerar pasillos de ventilación
- ✓ Altura topográfica (afección relevante en AMSS)

Es necesario recalcar que las recomendaciones planteadas en el Mapa de Clima Urbano de AMSS están planteadas para salvaguardar o mejorar el clima del AMSS en su conjunto. En otras escalas de planificación (por ejemplo, el diseño urbano local) es necesario llevar a cabo estudios en detalle que deriven en recomendaciones más precisas (materiales urbanos, localización específica de la vegetación, definición de pequeños corredores de aire...).

Las recomendaciones que se presentan a continuación (Tabla 9) se hacen de una forma sencilla y clara para que urbanistas sin conocimientos climáticos puedan entenderlas. Así mismo es necesario recalcar que no existe una única actuación posible para la mejora del confort térmico en áreas urbanas. Suelen ser la combinación de diferentes actuaciones u opciones las que se llevan a cabo en conjunto para mitigar la isla de calor. Por ello, se considera que la implementación real sobre el desarrollo urbano de las recomendaciones siempre se haga en colaboración entre urbanistas y climatólogos.

Tabla 9. Recomendaciones generales asociadas al MCU-Re de AMSS

Zona climática	Actuación en planificación urbana	Recomendaciones de planificación
1- Areas de producción de aire frío	<b>Preservar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El suelo no se debería pavimentar y la conservación de las características debería ser prioritario, especialmente en pasillos/zonas ventiladas (como pudieran ser algunas quebradas),</li> <li>• Pequeños desarrollos se podrían permitir solo en áreas que no son pasillos/zonas ventiladas. En este caso será necesaria una planificación y diseño muy detallado para evitar alterar las funciones climáticas del área.</li> </ul>
2- Areas de producción de aire fresco		
3- Areas de climas mixtos	<b>Atender</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estas áreas son en principio bastante neutras en términos de carga de calor urbano por lo que es importante por lo menos mantener sus características climáticas</li> <li>• Desarrollo urbano es posible si se tiene en cuenta que habría que preservar o incrementar los espacios abiertos y las zonas verdes,</li> <li>• Las características de ventilación y los corredores de aire deberían evaluarse. Su preservación durante la planificación es fundamental. En este sentido, la disposición de edificios y su orientación deberían considerarse cuidadosamente</li> </ul>
4- Areas de calentamiento bajo		
5- Areas de calentamiento medio	<b>Mejorar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se espera un impacto significativo en el confort térmico urbano,</li> <li>• La carga de calor urbano debe mitigarse,</li> <li>• Solo se deberían permitir nuevos desarrollos si en ellos se incluyen acciones correctoras de enfriamiento urbano. Nuevos escenarios que empeoren la situación existente no deberían ser autorizados</li> <li>• Es altamente recomendable el aumento de la vegetación en espacios abiertos y calles. La plantación de arbolado debería considerarse con precaución para no reducir el potencial de ventilación,</li> <li>• El intercambio de aire y la ventilación son una prioridad. Por ello, los pasillos/zonas ventiladas deberían analizarse en profundidad antes de la toma de decisión. Aumentar la ventilación con espacios abiertos o calles más anchas podría ser relevante. Así mismo, se debería favorecer el diseño de calles orientadas a las direcciones de viento predominante en zona de AMSS.</li> </ul>
6- Areas de calentamiento alto		



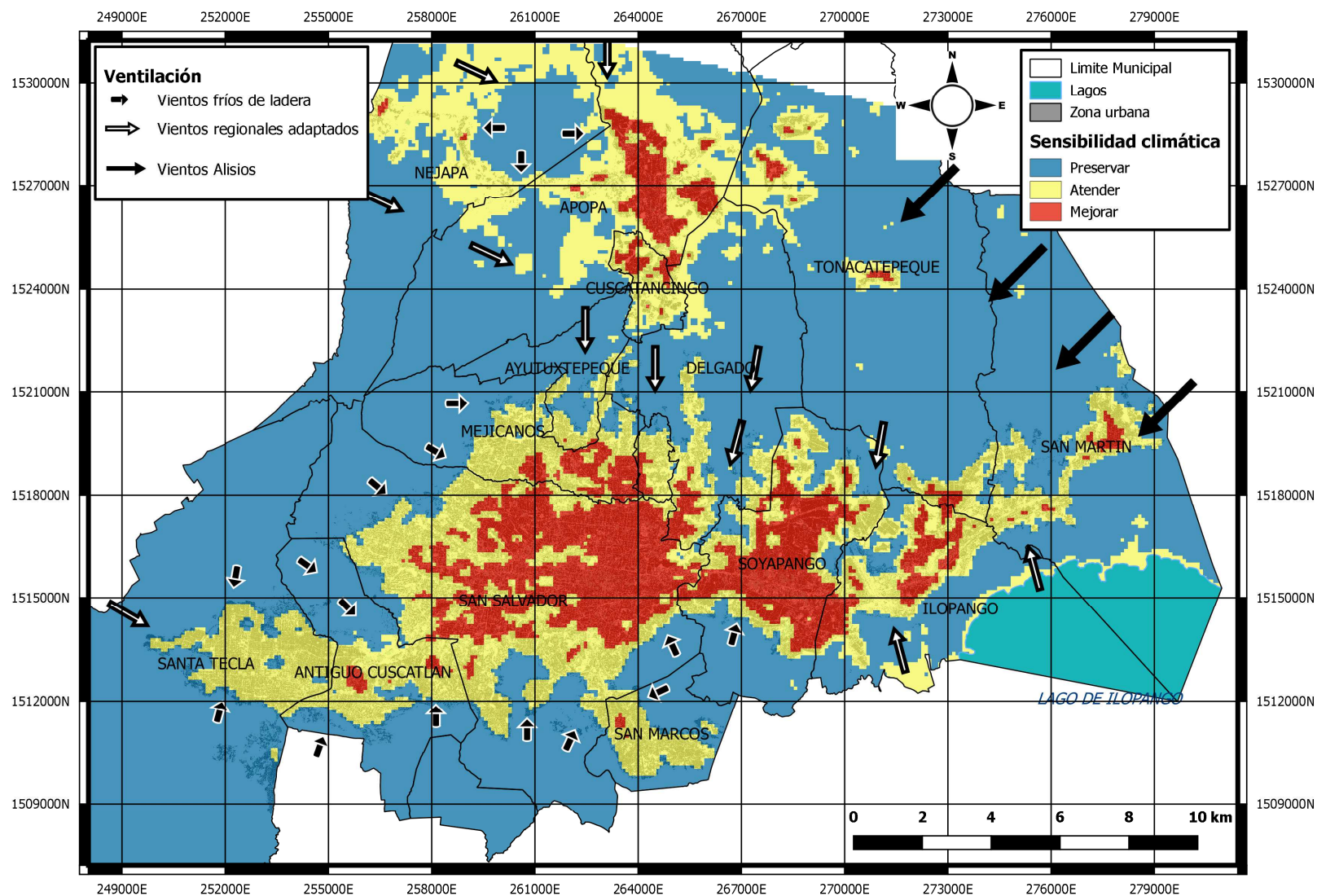


Figura 27. Mapa de Recomendaciones para Clima Urbano (MCU-Re) en AMSS

## 5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES EN AMSS

El estudio ha permitido conocer más a fondo las características de la isla de calor y la casuística del clima urbano del AMSS. El análisis de los datos existentes muestra una clara influencia de la topografía en los patrones de viento que afectan el área urbana. Las variables climáticas (y consecuentemente el confort térmico) varían espacialmente de forma relevante no solo por el desarrollo urbano sino por la fuerte variación de cotas topográficas en las que se encuentra el AMSS. En concreto se ha mostrado como municipios como Santa Tecla disponen de mejores condiciones climáticas (menor temperatura del aire) para afrontar el cambio climático. Además de espacialmente, también se han encontrado ciertas diferencias climáticas entre las dos épocas climáticas existentes (estación seca y lluviosa).

La isla de calor presenta mayor intensidad en la época seca y podría incrementarse en los meses de marzo y abril cuando los vientos del norte cesan y la acumulación de calor en el área urbana aumenta. Si bien la intensidad de la isla de calor en AMSS esta condicionada por una fuerte variación espacial de los parámetros climáticos, se podría decir que la anomalía media de temperatura del aire en AMSS con respecto al entorno rural se encuentra cerca de los 2°C. A lo largo de los años también se han observado diferencias en la intensidad de la isla de calor con el evento del Niño/Oscilación del Sur (ENOS) que está caracterizado por sequías y menor potencial vegetativo. En estas condiciones el balance de energía en la superficie terrestre queda alterado aumentando la diferencia de temperatura entre la zona urbana y rural.

Tanto en el análisis de la intensidad de la isla de calor como en el de la temperatura superficial del AMSS se han observado variaciones en los dos periodos climáticos (época seca y de lluvia) asociadas al diferente potencial vegetativo existente. En concreto, el umbral para considerar zona caliente en la época de lluvias es 0.4°C mayor que en la época seca, indicando que existen mayores diferencias de temperaturas superficiales dentro del área urbana durante la época de lluvias. Así mismo, zonas que durante la época de lluvias no se consideran calientes, pasan a serlo durante la época seca debido a que el bajo potencial vegetativo aumenta la temperatura superficial. Por ello, la importancia de la vegetación como regulador de la acumulación de calor en el área urbana.

En lo relativo al largo plazo se ha podido constatar que zonas que en el año 2000 se clasificaban como frías, en 2015 han pasado a ser consideradas calientes debido al cambio de usos del suelo que se ha producido en el AMSS pasando de zonas naturales con alta presencia de vegetación a zonas con importante desarrollo urbano. Así pues, la ocupación de suelo natural en AMSS durante la última década ha ocasionado una alternación de la acumulación de calor en la superficie terrestre aumentando la intensidad de la isla de calor urbana con efectos negativos en el confort térmico del peatón.

Finalmente, el conocimiento de los patrones climáticos regionales junto con las características urbanas y su posibilidad de almacenar calor, ha permitido elaborar un Mapa de Clima Urbano que desde la perspectiva de la planificación urbana refleja las características climáticas principales de AMSS y se establece unas recomendaciones

generales para que el desarrollo urbano considere adecuadamente aspectos de climatología urbana y consecuentemente permita una adaptación al cambio climático a través de la reducción de la isla de calor de AMSS. Los resultados señalan a los municipios de San Salvador, Soyapango y Apopa como los de mayor superficie urbana donde el sobrecalentamiento es mayor y las condiciones de confort térmico deberían mejorarse. El resto de los municipios también presentan amplias zonas donde la problemática debería atenderse de forma prioritaria aplicando las actuaciones oportunas según el nivel de vulnerabilidad de cada municipio (Informe “Análisis de vulnerabilidad socioeconómica frente al aumento de temperaturas en los municipios de AMSS”)

En base a los resultados obtenidos en el estudio climático, las recomendaciones a nivel general del AMSS se focalizan principalmente en:

- ✓ usar la vegetación como elemento que contrarreste la acumulación de calor en las áreas urbanas, y
- ✓ aprovechar los vientos regionales y locales condicionados por la presencia de la topografía para mejorar la ventilación del área urbana y permitir/favorecer la entrada de aire frío desde las zonas rurales.

Estas recomendaciones a nivel general se pueden concretar en diversos tipos de actuaciones locales. En lo relativo a vegetación se puede plantear un aumento de zonas verdes públicas, la instalación de parqueo público verde, así como el uso de tejados y/o fachadas verdes. En cada ámbito y/o tipología urbana de AMSS estas actuaciones pueden tener diferente beneficio en mitigar el calor urbano acumulado.

En el caso de la mejora de la ventilación urbana, una medida muy efectiva es desarrollar una configuración urbana que favorezca la eliminación del calor urbano acumulado teniendo en cuenta para ello el régimen de vientos en AMSS. En este sentido la disposición y orientación de los elementos urbanos es relevante. Así mismo, el uso óptimo y estratégico de ciertas quebradas podría ser clave para favorecer la ventilación y entrada de aire frío al interior del área urbana.

En general, se percibe la necesidad de una reorganización del AMSS en lo relativo al desarrollo urbano sostenible que incluya criterios climáticos para mejorar el confort del peatón y permita la adaptación urbana al cambio climático. En este sentido, no se puede perder la oportunidad de planificar una ciudad que considere las recomendaciones incluidas en el Mapa de Clima Urbano y descritas en este documento.

Lo que es importante recalcar es que no existe una única posibilidad de actuación para mejorar el clima urbano. Pueden ser varias que por sí mismas o en conjunto permitan adaptar el desarrollo urbano adecuadamente. Así pues, lo que se presenta en el Mapa de Clima Urbano no son ‘recetas mágicas’ sino líneas de actuación para preservar o mejorar en conjunto el clima en el AMSS. Así mismo, desarrollos específicos en zonas concretas requerirán una evaluación particular para detallar y precisar las actuaciones o recomendaciones generales ya descritas en el Mapa de Clima Urbano.

En cualquier caso interiorizar entre los urbanistas y responsables de la administración la idea de que es necesario desarrollar una ciudad sostenible adaptada al cambio

climático, es primordial. Y para ello el uso de herramientas como el Mapa de Clima Urbano donde se incluyen recomendaciones para mejorar la climatología y el confort térmico en el AMSS es esencial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Artis DA, Carnahan WH (1982) Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sens Environ* 12:313–329.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Final Draft IPCC WGII AR5.*
- Isaac M, van Vuuren DP (2009) Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy* 37:507–521. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.051
- Jimenez-Munoz JC, Sobrino JA, Skokovic D, et al (2014) Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geosci Remote Sens Lett* 11:1840–1843. doi: 10.1109/LGRS.2014.2312032
- Knowlton K, Rotkin-Ellman M, King G, et al (2009) The 2006 California heat wave: Impacts on hospitalizations and emergency department visits. *Environ Health Perspect* 117:61–67. doi: 10.1289/ehp.11594
- Koppe C, Kovats S, Jendritzky G, B M (2004) *Heat-waves: risks and responses.* Copenhagen
- Michelozzi P, Accetta G, De Sario M, et al (2009) High Temperature and Hospitalizations for Cardiovascular and Respiratory Causes in 12 European Cities. *Am J Respir Crit Care Med* 179:383–389. doi: 10.1164/rccm.200802-2170C
- Sobrino JA, Jiménez-Muñoz JC, Sòria G, et al (2008) Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 46:316–327. doi: 10.1109/TGRS.2007.904834
- Stewart ID, Oke TR (2012) Local climate zones for urban temperature studies. *Bull Am Meteorol Soc* 93:1879–1900. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- Stone B, Hess JJ, Frumkin H (2010) Urban Form and Extreme Heat Events: Are Sprawling Cities More Vulnerable to Climate Change Than Compact Cities? *Environ Health Perspect* 118:1425–1428. doi: 10.1289/ehp.0901879
- Wang F, Qin Z, Song C, et al (2015) An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sens* 7:4268–4289. doi: 10.3390/rs70404268
- Yu X, Guo X, Wu Z (2014) Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sens* 6:9829–9852. doi: 10.3390/rs6109829