

# Caracterización del régimen bioclimático humano en el Área Metropolitana de Guadalajara, México

Alejandro Ramón López García \*

Bertha Márquez Azúa \*\*

*Recibido el 18 de julio de 2017; aceptado el 31 de mayo de 2018*

## Abstract

Human bioclimatology helps to know the perception of meteorological variables in the human organism through the application of indexes. In this paper, two indices have been applied for the Guadalajara metropolitan area: Effective Temperature (ET) of Seifert (1958), and Missenard (1937). The purpose of this research is to characterize the human bioclimatic regime in the presence of two daily situations that is the effect caused by the effect of wind on the *ET*, both in the interior and exterior environment and to be able to relate it to the scale of thermal sensation proposed by the ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). The meteorological data were provided by the SIMAJ (System of Atmospheric Monitoring of Jalisco State) from which the variables of air temperature, relative humidity and wind speed were taken. The comfort range was from 19.7 to 22.9 °C, and the sensations found were cool, cool, light fresh, comfortable and light warm, shown in diagrams and bioclimatic maps. Additionally, the linear regression equations (predictive models) in which *ET* can be known and the corresponding thermal sensation of the interior or exterior environment.

Key words: *Effective temperature, thermal sensations, bioclimatic diagram, bioclimatic map, predictive models.*

## Resumen

La bioclimatología humana ayuda a conocer la percepción de variables meteorológicas en el organismo humano a través de la aplicación de índices. En el presente trabajo, se han empleado para el área metropolitana de Guadalajara

\* Doctorado en Geografía y Ordenación Territorial (DGOT), Universidad de Guadalajara, correo electrónico: alejandrorlg@yahoo.com.mx

\*\* Centro de Estudios Estratégicos para el Desarrollo (CEED), Universidad de Guadalajara, correo electrónico: bmarquez@cencar.udg.mx

(AMG) dos índices: Temperatura Efectiva (TE) de Seifert (1958), y el de Missenard (1937). El propósito de esta investigación es caracterizar el régimen bioclimático humano ante dos situaciones cotidianas que es el efecto que ocasiona el viento específicamente sobre la *TE*, tanto en ambiente interior, como exterior y poder relacionarlo con la escala de sensación térmica propuesta por la ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Los datos meteorológicos fueron proporcionados por el SIMAJ (Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Jalisco) del cual se tomaron las variables de temperatura del aire, humedad relativa y rapidez del viento. El rango de confort fue de 19.7 a 22.9° C, y las sensaciones encontradas fueron *frío*, *fresco*, *fresco ligero*, *confortable* y *cálido ligero*, mostradas en diagramas y mapas bioclimáticos. Adicionalmente se incluyen las ecuaciones de regresión lineal (modelos predictivos) en la que se puede conocer la *TE* y la correspondiente sensación térmica de ambiente interior o exterior.

Palabras clave: *temperatura efectiva, sensaciones térmicas, diagrama bioclimático, mapa bioclimático, modelos predictivos.*

## Introducción

El ser humano desde sus inicios se ha adaptado a la variación de las condiciones climáticas, por lo tanto, a las diferentes sensaciones térmicas que esto genera en su organismo, controlando y buscando en todo momento un estado de confort mediante el uso de la vestimenta y la vivienda. Tal confort se refiere a las condiciones de la mente, que expresan satisfacción con el ambiente térmico manteniendo el equilibrio energético entre el cuerpo humano y su medio (Fernández, 1994). El organismo humano en todo momento debe de mantenerse dentro de un rango térmico estrecho, siendo este apenas de 1° C (36.5 a 37.5° C) y sin importar las variaciones de la temperatura exterior, que cuando está fuera de éste, se generan lesiones graves de circulación sanguínea, coma o colapso (Hajek y Espinosa, 1982).

Para encontrar ese estado de confort, el humano debe de poner en práctica diversos mecanismos de adaptación que están a su alcance o que son controlables para preservar su salud, entre los que se encuentran la ventilación, la cantidad y tipo de vestimenta y la actividad física. También es necesario determinar los límites térmicos (umbral), basados en las características específicas de clima local, con el propósito de determinar las condiciones óptimas a las cuales están habituadas las personas y para no aplicar estándares obtenidos para otros climas y situaciones (Marincic *et al.*, 2012).

Entre las variables climáticas que inciden sobre el confort térmico, se encuentran la temperatura del aire (T), la humedad relativa (HR), la rapidez del viento (V) y la radiación solar. La *T* es la variable de mayor peso sobre el bienestar

que incurre de forma directa, la *HR* regula la sudoración que es uno de los mecanismos de enfriamiento del organismo y la *V* disipa la energía por sudoración. Cabe mencionar que existen umbrales para cada una de las variables para preservar el estado de *confort*, para la *T* se sugiere que esta sea de 22 a 28° C para zonas tropicales; para *HR* entre 30 y 70%; y para *V* entre 0.1 a 0.3 m/s (Mesa *et al.*, 2009). Para poder entender mejor la percepción de las variables climáticas en los seres humanos, surge la *bioclimatología*, la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992) la define como la ciencia que estudia la influencia del clima sobre los seres vivos.

En tiempos actuales el ser humano pasa alrededor de 20 horas al día dentro de espacios interiores o artificiales (casa, oficina, escuela, fábrica, etc.), siendo la ventilación una de las variables que pueden ser controladas para alcanzar el confort de los ocupantes. El movimiento del aire (viento) en horas de intensificación de la *T*, produce una sensación refrescante, favoreciendo la pérdida de calor a través de la piel por convección y evaporación. La circulación del aire mejora enormemente situaciones de incomodidad térmica (desconfort térmico) en que la *T* y *HR* serían más costosas y complicadas de controlar, siendo la ventilación la petición más común ante esta situación (en aviones, autobuses, automóviles, edificios, etc.), siendo *V* favorable de 1 a 4 m/s al exterior y muy variable en interiores (Mesa *et al.*, 2009).

La medida del confort bioclimático se logra mediante la aplicación de índices, que son capaces de medir la *TE* de la superficie del cuerpo humano (de la piel), que es la sensación térmica real que percibe el organismo humano (Torneró *et al.*, 2006). Los distintos índices bioclimáticos, utilizan dos o más variables meteorológicas, además de que son efectivos y de validez universal por estar sustentados por la Primera Ley de la Termodinámica (Cervantes y Barradas, 2010). Para Givoni (1974) un índice bioclimático es un método que permite la estimación combinada de variables atmosféricas sobre el organismo humano; para Hajek y Espinosa (1982) son modelos que describen a partir de observaciones experimentales o empíricas cómo el ambiente atmosférico actúa en el humano.

En base a las distintas sensaciones térmicas experimentadas a lo largo del tiempo y producto de la oscilación de las variables climatológicas, se han diseñado escalas psicofísicas en siete niveles: *frío*, *fresco*, *fresco ligero* (fríos); *confortable* (neutro); y *cálido ligero*, *cálido* y *muy cálido* (cálidos) (ASHRAE, 1966). En el campo de la bioclimatología humana, el objetivo principal es cuantificar las sensaciones térmicas, aplicándolas a escalas que determinen la percepción de las personas ante condiciones climáticas específicas (Fernández, 1994). Tal percepción es variable para cada persona, y está en función de la edad, sexo, alimentación, estado de salud, características corporales, vestimenta, nivel de actividad física, metabolismo y entorno (Musari *et al.*, 2014).

Es posible la mejora térmica de espacios interiores, mediante la aplicación de técnicas como los “muros verdes”, que generan un bloqueo de la radiación solar en muros y fachadas mediante la aplicación la inserción de especies vegetales trepadoras en ellas, que evitan la transmisión de calor al interior de estos espacios, volviéndolos más confortables y con menor necesidad de enfriamiento artificial (Muñoz y Torres, 2013). De forma similar la implementación de arbolado en el espacio público urbano podría ayudar a la mejora de la sensación térmica y disminución de contaminantes (Guillén-Mena y Orellana, 2016).

El objetivo de este trabajo es caracterizar el *régimen bioclimático humano* en el área metropolitana de Guadalajara (AMG), mediante la aplicación de dos índices: el índice *TE* de Seifert (1958) y el de Missenard (1937). Ambos consideran la *T* y *HR*, pero el primero toma en cuenta la acción del viento, permitiendo caracterizar la *TE* en ambiente exterior y el segundo en ambiente interior, como dos situaciones cotidianas de actividad de cualquier persona. En este trabajo la distribución espacial y temporal de la *TE* podrá ser relacionada a una sensación térmica específica producto de la interrelación de las variables meteorológicas.

### Área de estudio

El área de estudio corresponde al AMG se localiza en la porción centro-occidente de México y en la parte central del estado de Jalisco (Figura 1). La AMG es la segunda ciudad con mayor extensión y más poblada de México, después de la Ciudad de México (INEGI, 2010). Es un espacio totalmente urbanizado integrado por una conurbación de seis municipios denominados centrales, es decir, que cuentan con una conurbación continua. Su altitud media es de 1 594 msnm con 4 796,603 habitantes distribuidos en una extensión aproximada de 511 km<sup>2</sup>, con relieve que comprende una planicie con ligeras pendientes y elevaciones de baja altura.

### Datos y método

Se utilizaron datos de series de tiempo meteorológicos provenientes de nueve estaciones climáticas que integran una red perteneciente al Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco (SIMAJ). Dicha red genera información desde 1996 hasta la actualidad, cuya finalidad principal es monitorear los contaminantes suspendidos en la atmósfera de la ciudad, tales como CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM10 y SO<sub>2</sub>. El SIMAJ también registra variables meteorológicas como *T*, *HR* y *V*. Las series de tiempo contienen datos horarios (cada hora), los cuales han sido depurados de modo que no existan registros nulos e inconsistentes creando una base de datos para su posterior análisis e incorporación al índice *TE*. La localización de las estaciones se muestra en la Figura 2.

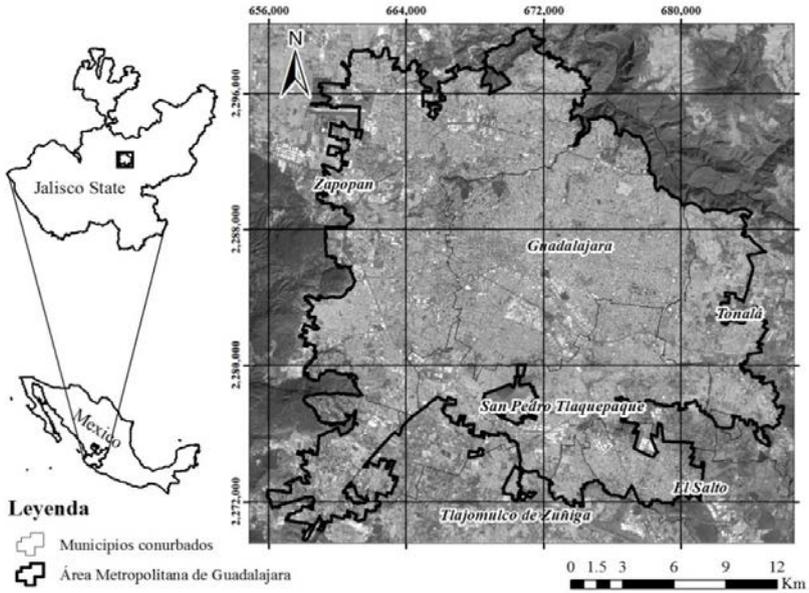


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

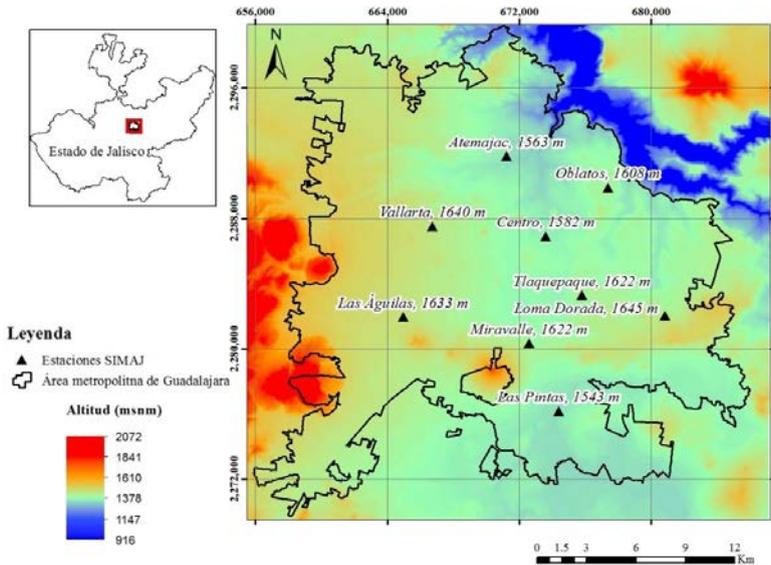


Figura 2. Mapa de localización de las estaciones SIMAJ. Junto al nombre de cada estación se muestra su altitud.

Para cada una de las variables es necesario crear las estadísticas históricas que consisten en mínimas, medias y máximas mensuales horarias para cada estación y en su conjunto para la AMG que posteriormente alimentarán a ambos índices de *TE*. En base a Méndez (2004) que afirma que en zonas tropicales la *TE* ha sido uno de los índices más utilizados, se ha elegido el índice de *TE* de Seifert (1958) (Ecuación 1) y el Missenard (1937) (Ecuación 2):

$$TE=37-(37-T)/(0.68-0.0014+ 1/(1.76+1.4V^{0.75})) - 0.29T(1-HR/100) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

$$TE=T-0.4(T-10)(1-HR/100) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

donde *TE* es la temperatura efectiva ( $^\circ\text{C}$ ); *T* es la temperatura del aire ( $^\circ\text{C}$ ), *HR* es la humedad relativa del aire (%) y *V*, es la velocidad del viento (m/s). En los estudios bioclimáticos es necesario construir la temperatura de *confort*, neutra, central o *termopreferendum*, que indica la temperatura preferente (*T<sub>p</sub>*) a la cual cualquier persona está aclimatada a su sitio de residencia. Auliciems y de Dear (1986) la propusieron y se muestra a continuación:

$$T_p = 0.31 T_m + 17.6 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

donde *T<sub>p</sub>* es la temperatura preferente ( $^\circ\text{C}$ ) y *T<sub>m</sub>* es la temperatura media mensual ( $^\circ\text{C}$ ). Wakely (1978) afirma que existe un intervalo o rango térmico en el cual el individuo percibe la misma sensación térmica que está definido por el límite superior e inferior, que depende de la oscilación térmica media anual de la *T*. El intervalo de confort debe relacionarse con una escala de sensación térmica establecida, la cual será la propuesta por la ASHRAE. Para que una persona se adapte térmicamente al sitio donde se desenvuelve, le toma  $\pm 1.75^\circ\text{C}$  para un periodo mensual; y  $\pm 2^\circ\text{C}$  para un periodo anual. Esta última consideración se toma en cuenta cuando la persona ya es residente por varios años y por tal, está aclimatada al lugar. Aplicando tal valor a la Ecuación 2, esta queda:

$$T_{p_{\text{sup}}} = 0.31 T_m + 19.6 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4)$$

$$T_{p_{\text{sup}}} = 0.31 T_m + 15.6 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5)$$

Una vez fijado el intervalo de *confort* solo considerando a la *T<sub>p</sub>* y tomando en cuenta la *T<sub>m</sub>* como la *T media anual* que debe relacionarse con la *TE* para fijar el resto de las sensaciones térmicas incluyendo el *confort*, por lo que se sustituyó en la

Ecuación 2 el valor de  $T$  por  $T_p$  y considerando a la  $HR$  del 50% de acuerdo a la norma ANSI/ASHRAE 55 (2004), quedando:

$$TE_{sup} = T_{p_{sup}} - 0.4(T_{p_{sup}} - 10) (0.5) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

$$TE_{inf} = T_{p_{inf}} - 0.4(T_{p_{inf}} - 10) (0.5) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

Los resultados se presentan para situaciones *con* y *sin* efecto de viento (Ecuaciones 1 y 2), tratando de aproximar a una situación de ambiente exterior (trayecto a pie, evento al aire libre, esparcimiento, etc.) e interior (casa, escuela, trabajo, etc.). Se muestran diversos productos gráficos, como el comportamiento medio mensual de las variables, la *TE mensual horaria*, la *TE histórica diaria mínima, media y máxima* relacionada a la sensación térmica, *diagramas bioclimáticos*, estimación de las *frecuencias mensuales horarias* para ejemplificar meses y horas a determinada sensación térmica, un análisis y de regresión lineal, cuyas ecuaciones de este último, a modo de modelos predictivos, para encontrar la *TE* en situaciones anómalas específicas de la variables, y por último, los mapas bioclimáticos, para conocer la distribución espacial y temporal de la *TE* con la respectiva sensación térmica.

Con la estimación de la  $T_p$ , se podrá aplicar en el diseño o adecuación de los espacios públicos (abiertos) e interiores (cerrados), o bien en ciudades con un tipo de clima igual o similar al analizado (Guzmán y Ochoa, 2014). Cabe mencionar que es posible la mejora térmica de espacios interiores, mediante la aplicación de técnicas como los “muros verdes”.

## Resultados y discusión

### *Climatología*

Es importante presentar las tres variables meteorológicas mostradas como *medias mensuales* y *medias horarias*, debido a que marcarán el comportamiento general de la *TE* para el AMG en su conjunto. Para la  $V$  se aprecia que los meses con mayor intensidad es abril, marzo y mayo, y con menor intensidad diciembre, noviembre y septiembre (Figura 3), y siendo mínima al amanecer (ocho horas) incrementándose paulatinamente hasta su mayor intensidad entre las 18 y 21 horas (Figura 4). Se debe notar que el comportamiento *medio horario* de la  $V$  sigue un patrón muy similar al de la  $T$  de la Figura 5, pudiendo establecer cierto grado de asociación entre ambas variables.

Para la  $T$  se observa que mayo, abril y junio presentan los valores máximos; y mínimos en noviembre, diciembre y enero (Figura 6). Cabe mencionar que la  $T$  máxima se alcanza en época de estiaje que corresponde a días con cielo con baja nubosidad; y a pesar de meses de mayor radiación (verano) que corresponde a la época lluviosa y de mayor nubosidad, tal variable se ve disminuida (junio-agosto).

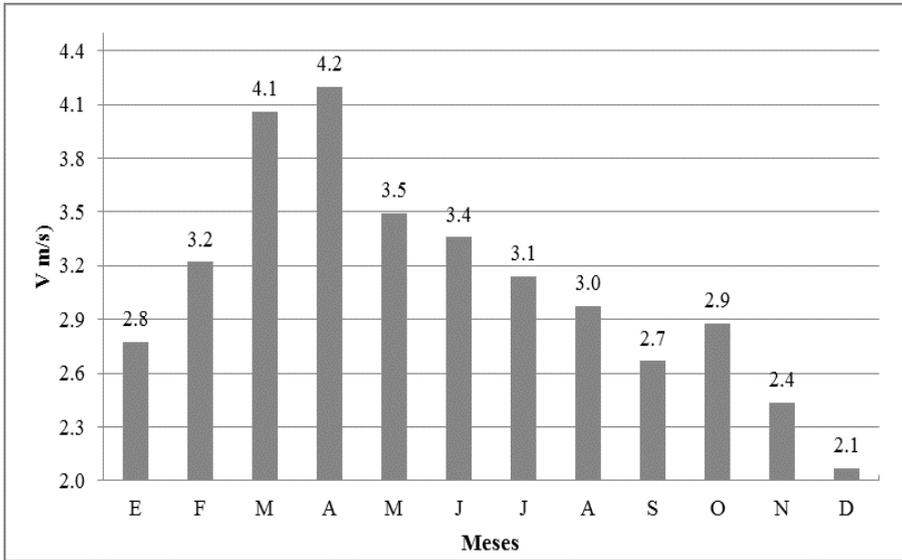


Figura 3. Gráfica del comportamiento *medio mensual* de la variable V.

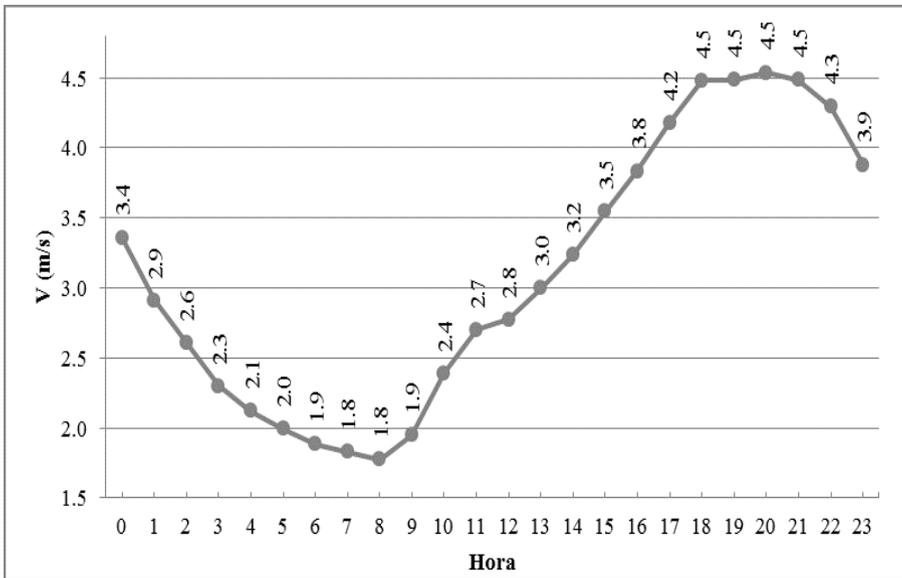


Figura 4. Gráfica del comportamiento *medio horario* de la variable V.

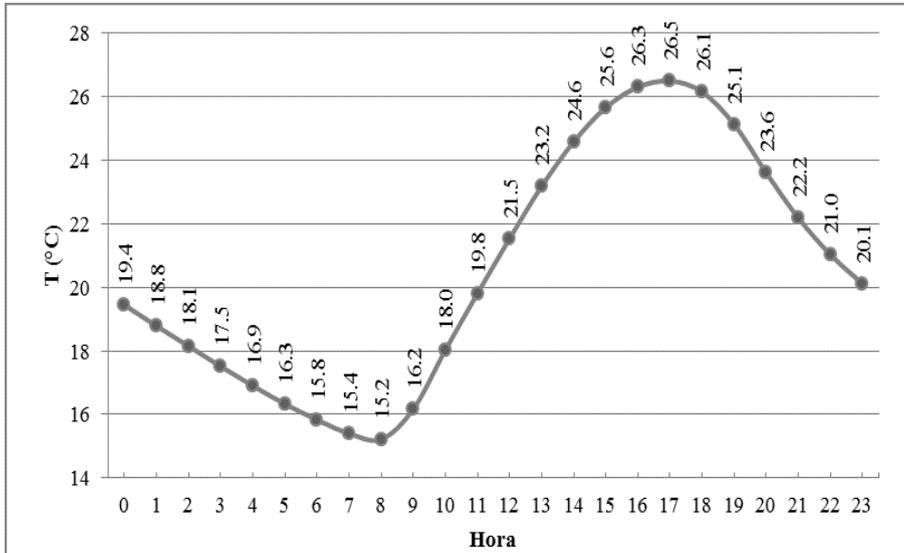


Figura 5. Gráfica del comportamiento *medio horario* de la variable T.

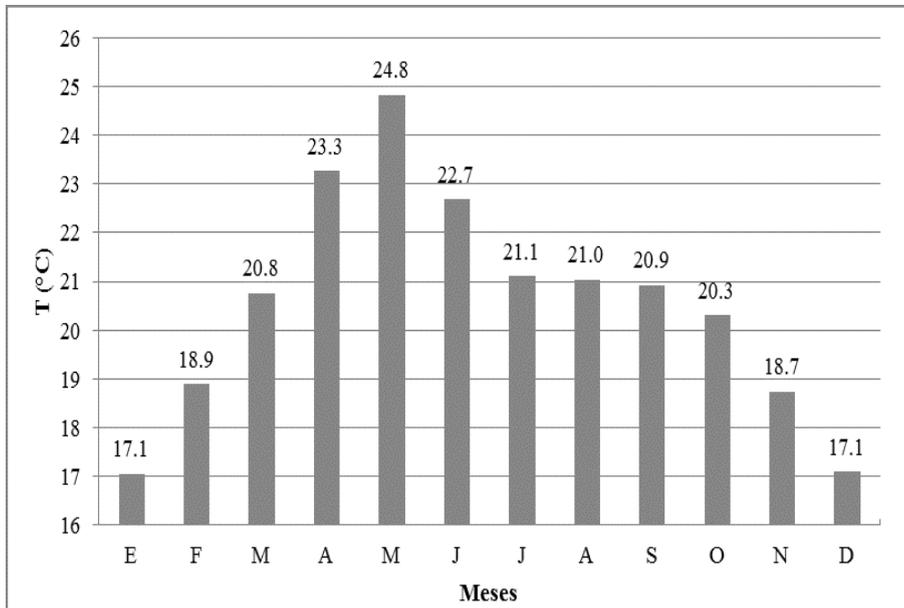


Figura 6. Gráfica del comportamiento *medio mensual* de la variable T.

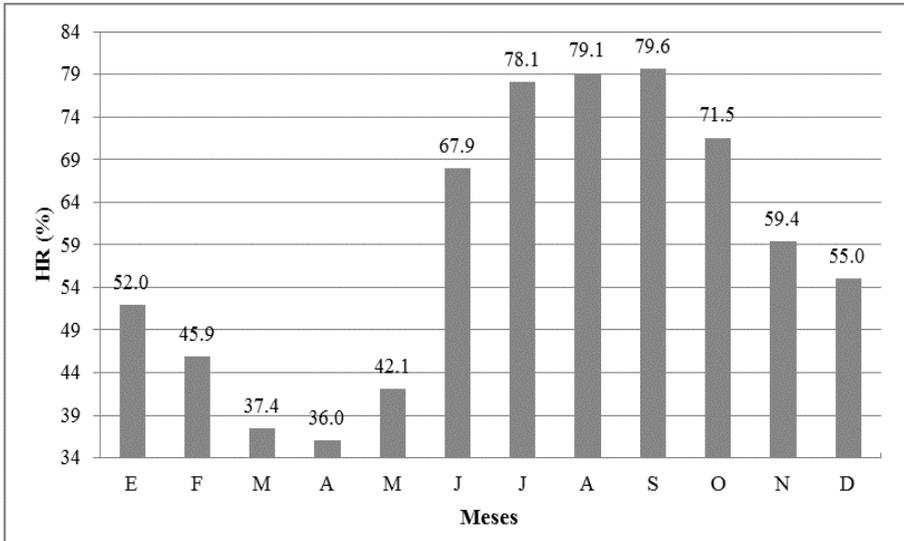


Figura 7. Gráfica del comportamiento medio mensual de la variable HR.

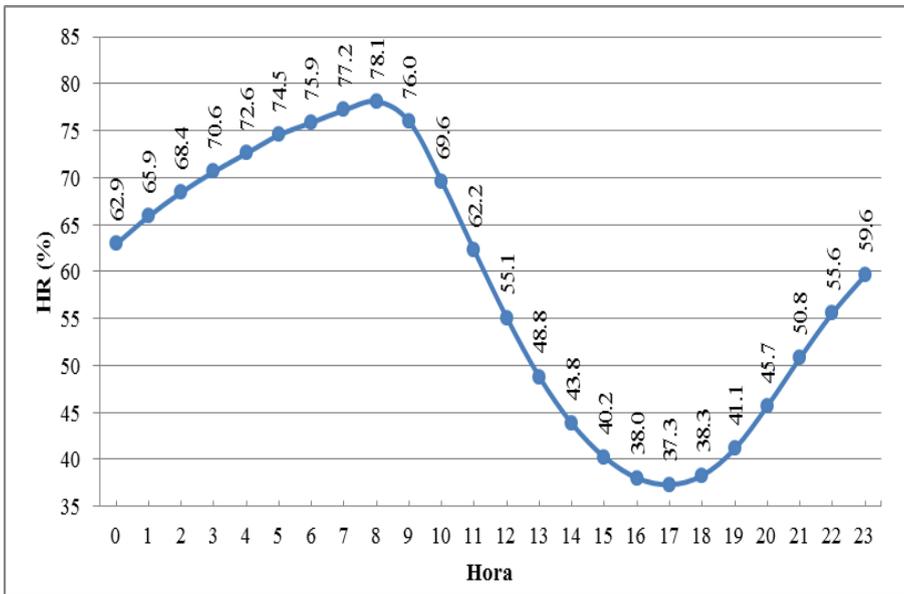


Figura 8. Gráfica del comportamiento medio horario de la variable HR.

La variable *HR* es mínima en meses de marzo a mayo y está asociada a la época de estiaje (primavera), los meses de mayor intensidad son julio a agosto asociado a la época lluviosa (Figura 7). El comportamiento de la *HR media horaria* es inverso a *T* (Figura 8), siendo máximos por las mañanas (ocho horas) y mínimo por las tardes (17 horas).

***Bioclimatología***

La *T* media anual para la AMG es de 21.1° C y los límites para el rango de confort de 19.7 a 22.9° C, siendo de 3.2° C el rango de oscilación calculado para las siete sensaciones térmicas. En la Tabla 1, es mostrada la escala ASHRAE a la que se asociada la *TE*.

**Tabla 1**  
**Escalas de la *TE* estandariza a la escala**  
**ASHRAE a través del *Tp* y el rango de oscilación**

<i>Sensación térmica</i>	<i>Intervalos de TE (°C)</i>	
Muy caluroso	> 29.3	
Caluroso	26.1	29.3
Cálido ligero	22.9	26.1
Confortable	19.7	22.9
Fresco ligero	16.5	19.7
Fresco	13.3	16.5
Frio	<13.3	

***Comportamiento de la TE mensual horaria***

Para caracterizar el régimen bioclimático en el AMG se presenta el comportamiento de la *TE mensual horaria* sin considerar el efecto del viento, encontrando un patrón muy similar al de la *T*. Es mínima al amanecer y máxima al final de la tarde siendo mayo el mes con la máxima intensidad y enero con la mínima, cuya oscilación para dichos meses es de 10.7 a 25.1° C (Figura 9). De igual forma el patrón persiste cuando se considera el efecto del viento pero con menor intensidad en todos los meses siendo de 8.4 a 23.9° C el rango de oscilación para los mismos meses y horarios (Figura 10). Para el resto de los meses existen valores relativamente más bajos en aquellos meses y horarios en que se intensifica la *V*, especialmente en marzo y abril en horas de la tarde.

***Comportamiento de la TE histórica (normal) y sensación térmica***

Sin considerar el efecto del viento (Figura 11), las siguientes sensaciones son percibidas preferentemente alrededor de las 17 horas siendo representadas por la *TE diaria máxima*, en que *calido ligero*, se presenta de abril a mediados de octubre; *confortable*, de noviembre a marzo. Con la *TE diaria mínima* se perciben la sensación de *fresco*

*ligero* de mayo a mediados de octubre; *fresco*, de mediados de marzo a abril y en la segunda mitad de octubre; y *frío*, de noviembre a febrero. La *TE diaria media* (promedio de sensación diaria) se representa por la sensación de *confortable*, que ocurre a mediados de abril y hasta mediados de octubre; *fresco ligero*, de mediados de octubre a noviembre, y de febrero a marzo; y *fresco*, de diciembre a enero.

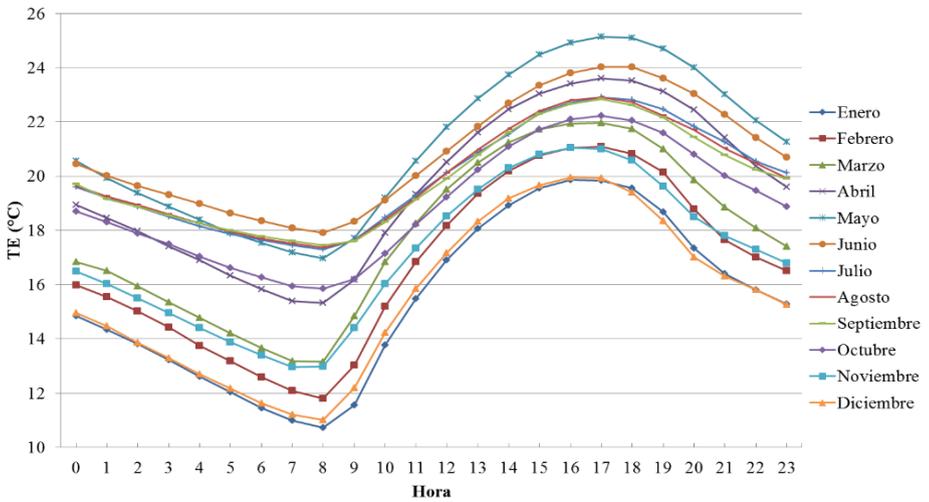
Considerando el efecto del viento (Figura 12) las tres líneas se tornan “ruidosas” y con menor intensidad. La *TE diaria máxima* es representada por la sensación de *cálido ligero* de mediados de abril a junio; sensación mezclada de *confortable* con *cálido ligero*; de julio a octubre; *confortable*, de octubre a noviembre y de febrero a marzo; *fresco ligero*, en diciembre y enero. La *TE diaria mínima* es representada por el *fresco* de mayo a octubre; y *frío* de noviembre a marzo. Para la *TE diaria media*, son *fresco ligero* días de abril hasta octubre; *fresco*, días de noviembre a inicios de diciembre y de febrero a marzo; y *frío*, de inicios de diciembre mediados de abril.

### **Diagrama bioclimático mensual horario**

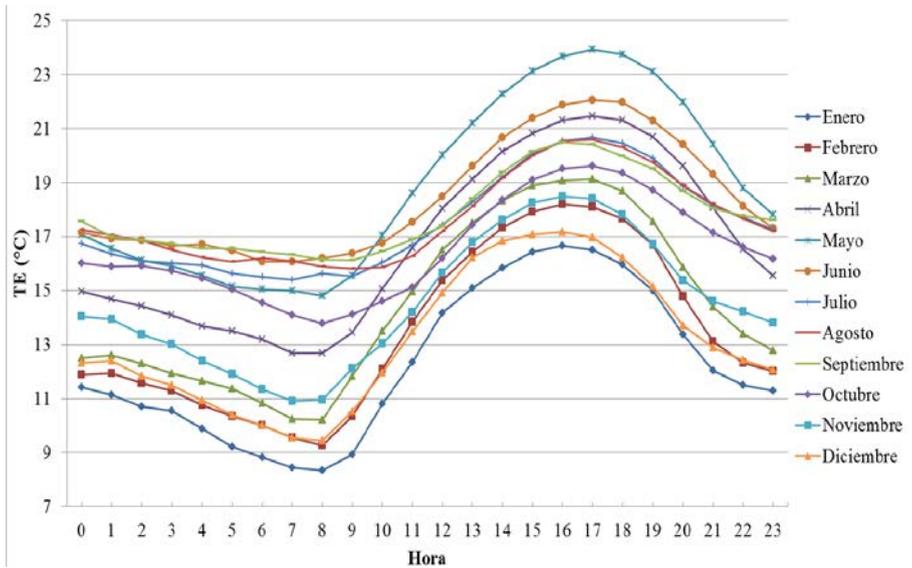
Es preciso mostrar la *sensación térmica mensual horaria* para identificar de forma más exacta qué sensación se presenta durante cada mes y hora del día, y que es mejor representada a través de diagramas. En las Figuras 13 y 14 se presentan los *diagramas bioclimáticos mensuales horarios* sin considerar y considerando el efecto del viento respectivamente, en cuales se aprecia un patrón de agrupamiento “anidado” o “concéntrico” en torno a la sensación de *frío* o *cálido ligero*. En la Figura 13 el *cálido ikiligero* se distribuye en horas de la tarde en los meses de abril a junio, mientras que el *frío* en horas de madrugada y mañana de noviembre a marzo, como la máxima y mínima sensaciones. Por su parte, en la Figura 14, el diagrama muestra una distribución más amplia del *frío* y una disminución del *cálido ligero*, tanto en horas como en meses respectivamente, quedando esta última solo para el mes de mayo de 15 a 19 horas, y el *frío* desde las 21 horas hasta la mañana siguiente, por lo que una vez más se demuestra que el efecto del viento es un factor para determinar la sensación térmica.

### **Frecuencias mensuales horarias**

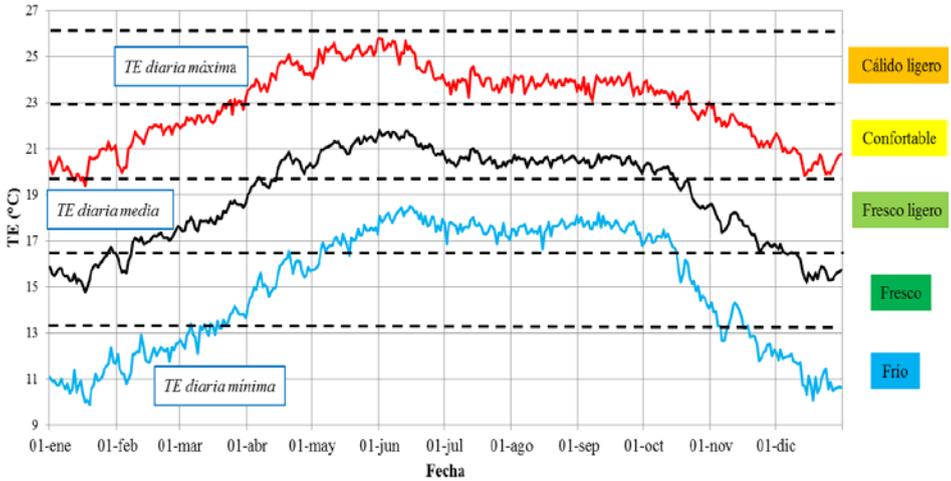
Es necesario cuantificar el número de horas en que cada sensación se presenta por mes, para determinar el mes o meses que mejor ejemplifican cada una de las cinco sensaciones térmicas identificadas para la AMG, para ello, se ha creado la gráfica de *frecuencias mensuales horarias* y es mostrada en las Figuras 15 y 16. En la Figura 15 no se considera la acción del viento, y tomando los meses con las mayores frecuencias, indica que el mes del *frío* es enero; *fresco*, noviembre; *fresco ligero*, octubre; *confortable*, julio; y *cálido ligero* es mayo. De la misma forma, pero considerando el efecto del viento, se tiene que el mes del *frío* sigue siendo enero; *fresco*, cambió a abril; *fresco ligero*, se trasladó a septiembre; *confortable*, continuó siendo julio; y *cálido ligero*, persistió en mayo.



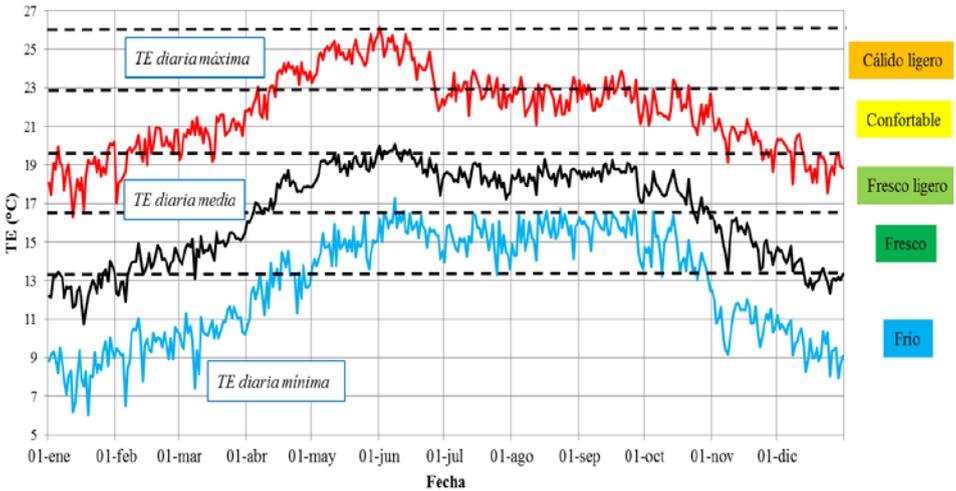
**Figura 9.** Gráfica del comportamiento (oscilación) de la *TE mensual horaria* sin considerar el efecto de *V*.



**Figura 10.** Gráfica del comportamiento (oscilación) de la *TE mensual horaria* considerando el efecto de *V*.



**Figura 11.** Gráfica del comportamiento (oscilación) de la *TE* histórica considerando el efecto del viento que es representada como *TE diaria máxima*, *TE diaria media* y *TE diaria mínima*; con línea roja, negra y azul respectivamente.



**Figura 12.** Gráfica del comportamiento (oscilación) de la *TE* histórica sin considerar el efecto del viento que es representada como *TE diaria máxima*, *TE diaria media* y *TE diaria mínima*; con línea roja, negra y azul respectivamente.



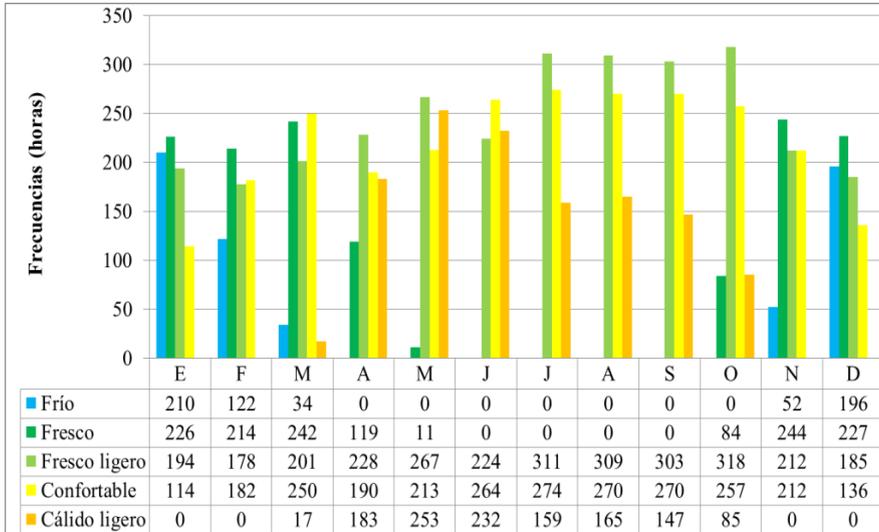


Figura 15. Gráfica de frecuencias mensuales horarias sin considerar el efecto del viento.

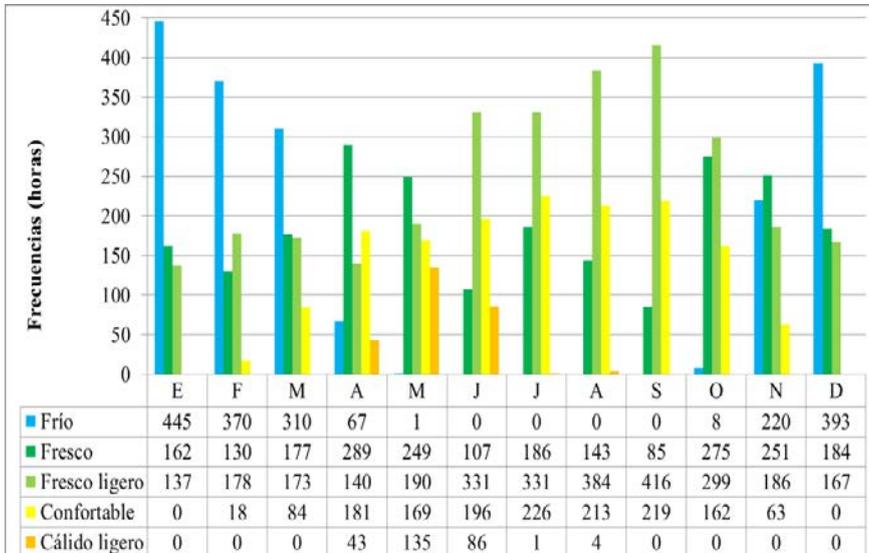


Figura 16. Gráfica de frecuencias mensuales horarias considerando el efecto del viento.

### **Análisis de regresión lineal**

Se presenta la regresión lineal entre la *TE* con las tres variables involucradas sin considerar el efecto del viento (Tablas 2 y 3) y considerando el efecto del viento (Tablas 4, 5 y 6) para los tres momentos del día (*TE* diaria mínima, media y máxima). El comportamiento que guardan las variables con la *TE*, se muestra en el análisis de coeficiente de correlación de Pearson (*R*) por par de variables, que mide la fuerza de la relación lineal entre ellas, cuyos valores van de -1 a 1, para un nivel de confianza del 95%. Se muestra también el valor del coeficiente de determinación en porcentaje ( $R^2$  %) que indica la proporción de la variabilidad de los datos y cuyo objetivo es predecir futuros resultados de acuerdo al modelo de regresión lineal a través de su ecuación.

En la Tabla 2 se muestra la relación *TE* con *T*, en la cual se aprecia que el *R* es positivo y los relaciona fuertemente siendo perfecta en algunos meses y momentos. Resalta el caso de mayo, que a pesar de ser el mes de mayor intensidad de la *TE*, la *T* de las mañanas y su promedio diario influyen en menor medida; y junio, que las mínimas influyen también en menor grado. De la relación de *TE* con *HR* (Tabla 3) se aprecia relación inversa de enero a abril y en días de junio y julio en sus máximas; por el contrario, en mayo, y de septiembre a diciembre la relación es positiva. Destaca el mes de mayo debido a que la *HR* es la variable de mayor peso en la determinación de la *TE* y al *cálido ligero*.

Considerando ahora el efecto del viento, se presenta la Tabla 4 para la relación de la *TE* y *T*, en ella se observa *R* positiva para todos los meses y los tres momentos, que curiosamente resalta el mes de mayo para las máxima y media, y junio para la mínima cuyo valor es el más bajo en meses de mayor *TE* por lo que apunta a una influencia de las otras dos variables. Para la Tabla 5 se muestra la relación de *TE* y *HR* en que presenta de enero a abril y en junio y julio *R* negativa; y positiva, en mayo y de septiembre a diciembre, siendo mayo junto con octubre los de mayor valor, lo que explica en gran parte la situación anterior. En la Tabla 6 se aprecia *R* negativa en todos los meses y momentos (excepto en junio por la tarde), siendo más baja la influencia en las máximas y mayor en las mínimas; es decir, por la tardes y por la mañanas respectivamente, siendo las mañanas de julio a septiembre las mayor afectadas en la *TE* por la acción del viento, y en los mismos meses para los valores medios.

**Tabla 2**  
Regresión lineal de la TE y la T sin considerar el efecto del viento

Meses	R			R <sup>2</sup> (%)			Ecuaciones de regresión		
	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima
Enero	0.69	0.59	0.91	48.3	35.2	83.2	TE = 0.8897*T - 2.9585	TE = 0.707*T + 2.3694	TE = 1.0344*T - 5.5121
Febrero	0.69	0.47	0.91	47.5	22.1	82.6	TE = 0.6228*T + 1.6223	TE = 0.449*T + 5.2497	TE = 0.9077*T - 2.5659
Marzo	0.65	0.42	0.89	42.7	18.0	78.6	TE = 0.5453*T - 0.0557	TE = 0.5453*T + 3.7451	TE = 0.904*T - 2.9344
Abril	0.93	0.76	0.96	87.3	58.1	93.1	TE = 1.0295*T - 7.493	TE = 0.6577*T + 2.3931	TE = 1.0429*T - 7.0522
Mayo	0.57	0.48	0.51	32.7	23.0	25.6	TE = 0.7916*T - 0.9359	TE = 0.6345*T + 3.0908	TE = 0.6676*T + 5.7048
Junio	0.77	0.48	0.98	59.7	22.9	95.1	TE = 0.5605*T + 5.9327	TE = 0.8537*T - 0.0008	TE = 0.8476*T + 1.4188
Julio	0.64	0.56	0.93	41.5	31.0	86.9	TE = 1.0036*T - 3.6802	TE = 1.4047*T - 9.0014	TE = 1.1783*T - 7.5923
Agosto	0.32	0.40	0.95	10.6	15.8	89.9	TE = 0.6441*T + 4.2739	TE = 0.956*T - 0.837	TE = 1.267*T - 9.8964
Septiembre	0.46	0.62	0.89	20.8	38.5	79.5	TE = 0.996*T - 3.1247	TE = 1.0067*T - 1.5774	TE = 0.3073*T + 15.587
Octubre	0.72	0.66	0.80	51.8	43.4	63.7	TE = 1.0175*T - 4.1887	TE = 0.6158*T + 4.4993	TE = 1.0793*T - 5.2621
Noviembre	0.79	0.58	0.91	62.6	33.6	82.1	TE = 1.0109*T - 4.5063	TE = 0.4316*T + 6.34	TE = 1.2789*T - 10.977
Diciembre	0.87	0.80	0.92	76.5	63.6	85.1	TE = 1.0774*T - 5.4382	TE = 0.6986*T + 3.1767	TE = 1.2314*T - 9.734

**Tabla 3**  
Regresión lineal de la TE y la HR sin considerar el efecto del viento

Meses	R			R <sup>2</sup> (%)			Ecuaciones de regresión		
	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima
Enero	-0.42	-0.20	-0.03	17.7	3.9	0.1	TE = -0.0835*HR + 20.301	TE = -0.0295*HR + 11.616	TE = -0.0071*HR + 23.335
Febrero	-0.66	-0.45	-0.28	43.2	19.8	7.6	TE = -0.0793*HR + 20.662	TE = -0.0379*HR + 12.493	TE = -0.0539*HR + 27.838
Marzo	-0.40	-0.24	-0.12	16.4	6.0	1.5	TE = -0.0737*HR + 20.972	TE = -0.0571*HR + 13.659	TE = -0.0172*HR + 26.403
Abril	-0.35	-0.03	-0.18	12.2	0.1	3.1	TE = -0.0753*HR + 22.904	TE = -0.0065*HR + 14.534	TE = -0.0385*HR + 29.305
Mayo	0.75	0.84	0.73	56.8	70.0	53.0	TE = 0.0487*HR + 19.26	TE = 0.0965*HR + 13.531	TE = 0.0664*HR + 24.585
Junio	-0.81	0.17	-0.80	65.7	2.8	63.7	TE = -0.0459*HR + 24.582	TE = 0.0049*HR + 16.29	TE = -0.1265*HR + 39.162
Julio	-0.71	0.00	-0.06	50.4	0.0	0.4	TE = -0.1006*HR + 28.369	TE = -0.0002*HR + 16.247	TE = -0.024*HR + 28.763
Agosto	-0.42	0.64	0.14	17.3	41.3	1.9	TE = -0.0316*HR + 23.075	TE = 0.0688*HR + 12.478	TE = 0.0375*HR + 22.84
Septiembre	0.10	0.72	0.01	0.9	52.3	0.0	TE = 0.008*HR + 19.923	TE = 0.0622*HR + 12.93	TE = 0.0022*HR + 23.929
Octubre	0.89	0.95	0.27	79.1	90.4	7.4	TE = 0.1195*HR + 11.207	TE = 0.1556*HR + 7.6089	TE = 0.0366*HR + 23.575
Noviembre	0.59	0.67	0.42	35.2	45.4	18.0	TE = 0.1088*HR + 11.371	TE = 0.1393*HR + 7.5712	TE = 0.0919*HR + 17.332
Diciembre	0.64	0.55	0.62	41.2	30.1	38.3	TE = 0.1177*HR + 9.7418	TE = 0.1033*HR + 7.6534	TE = 0.1264*HR + 13.457

**Tabla 4**  
**Regresión lineal de la TE y la T considerando el efecto del viento**

Meses	R			R <sup>2</sup> (%)			Ecuaciones de regresión		
	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima
	Enero	0.69	0.59	0.91	48.3	35.2	83.2	$TE = 0.8897 * T - 2.9585$	$TE = 0.707 * T + 2.3694$
Febrero	0.69	0.47	0.91	47.5	22.1	82.0	$TE = 0.6228 * T + 1.6223$	$TE = 0.449 * T + 5.2497$	$TE = 0.9077 * T - 2.5639$
Marzo	0.65	0.42	0.89	42.7	18.0	78.6	$TE = 0.691 * T - 0.0557$	$TE = 0.5453 * T + 3.7451$	$TE = 0.904 * T - 2.9344$
Abril	0.93	0.76	0.96	87.3	58.1	93.1	$TE = 1.0295 * T - 7.493$	$TE = 0.6577 * T + 2.3931$	$TE = 1.0429 * T - 7.0522$
Mayo	0.57	0.48	0.51	32.7	23.0	25.6	$TE = 0.7916 * T - 0.9339$	$TE = 0.6345 * T + 3.0908$	$TE = 0.6676 * T + 5.7048$
Junio	0.77	0.48	0.98	59.7	22.9	95.1	$TE = 0.5605 * T + 5.9327$	$TE = 0.8537 * T - 0.008$	$TE = 0.8476 * T + 1.4188$
Julio	0.64	0.56	0.93	41.5	31.0	86.9	$TE = 1.0036 * T - 3.6802$	$TE = 1.4047 * T - 9.0014$	$TE = 1.1783 * T - 7.5923$
Agosto	0.32	0.40	0.95	10.6	15.8	89.9	$TE = 0.6441 * T + 4.2739$	$TE = 0.956 * T - 0.837$	$TE = 1.267 * T - 9.8964$
Septiembre	0.46	0.62	0.89	20.8	38.5	79.5	$TE = 0.996 * T - 3.1247$	$TE = 1.0067 * T - 1.5774$	$TE = 0.3073 * T + 15.587$
Octubre	0.72	0.66	0.80	51.8	43.4	63.7	$TE = 1.0175 * T - 4.1887$	$TE = 0.6158 * T + 4.4993$	$TE = 1.0793 * T - 5.2621$
Noviembre	0.79	0.58	0.91	62.6	33.6	82.1	$TE = 1.0109 * T - 4.5063$	$TE = 0.4316 * T + 6.34$	$TE = 1.2789 * T - 10.977$
Diciembre	0.87	0.80	0.92	76.5	63.6	85.1	$TE = 1.0774 * T - 5.4382$	$TE = 0.6936 * T + 3.1767$	$TE = 1.2314 * T - 9.734$

**Tabla 5**  
**Regresión lineal entre TE v la HR considerando el efecto del viento**

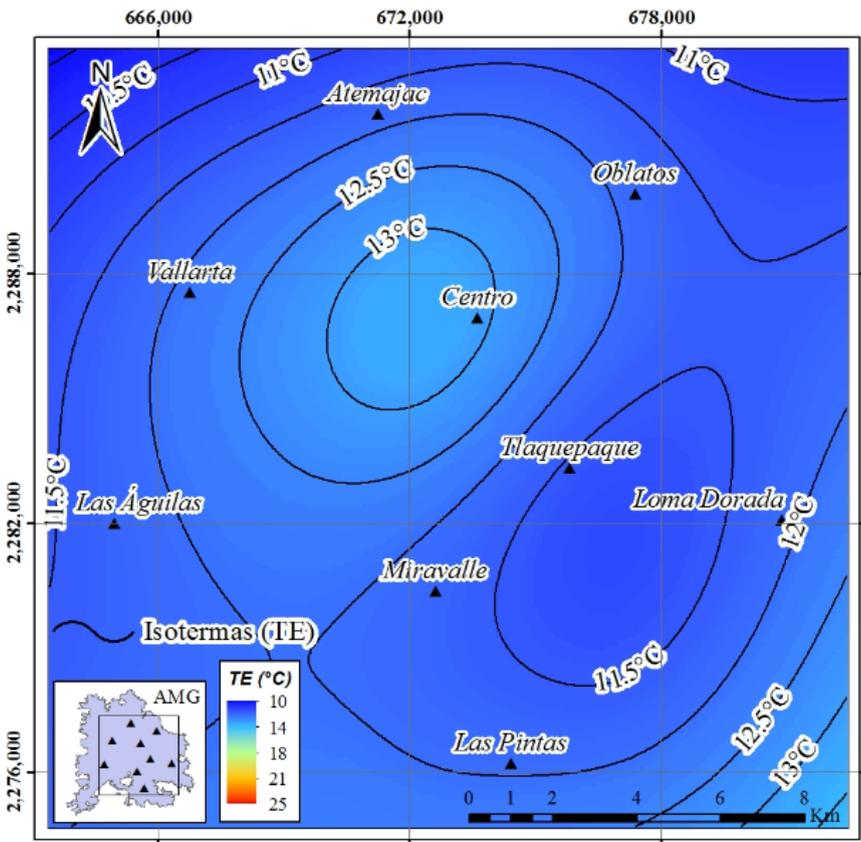
Meses	R			R <sup>2</sup> (%)			Ecuaciones de regresión		
	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima
	Enero	-0.40	-0.19	-0.14	15.8	3.5	2.0	$TE = -0.1371 * HR + 19.518$	$TE = -0.0468 * HR + 11.558$
Febrero	-0.38	-0.16	-0.20	14.7	2.4	4.2	$TE = -0.0645 * HR + 16.421$	$TE = -0.0208 * HR + 11.236$	$TE = -0.0522 * HR + 24.88$
Marzo	-0.22	-0.08	-0.19	4.8	0.6	3.7	$TE = -0.0634 * HR + 16.832$	$TE = -0.0359 * HR + 11.976$	$TE = -0.0392 * HR + 25.119$
Abril	-0.40	-0.03	-0.28	16.3	0.1	8.1	$TE = -0.1493 * HR + 22.157$	$TE = -0.0082 * HR + 13.446$	$TE = -0.0937 * HR + 30.435$
Mayo	0.53	0.27	0.61	28.2	7.4	37.7	$TE = 0.0424 * HR + 16.882$	$TE = 0.0479 * HR + 13.588$	$TE = 0.0625 * HR + 23.19$
Junio	-0.65	-0.14	-0.81	41.9	2.0	65.7	$TE = -0.057 * HR + 22.799$	$TE = -0.0134 * HR + 16.308$	$TE = -0.169 * HR + 40.885$
Julio	-0.36	0.18	-0.01	12.9	3.2	0.0	$TE = -0.1098 * HR + 26.35$	$TE = 0.0518 * HR + 12.936$	$TE = -0.0052 * HR + 24.594$
Agosto	-0.19	0.18	0.01	3.4	3.3	0.0	$TE = -0.0419 * HR + 21.482$	$TE = 0.0111 * HR + 15.356$	$TE = -0.0252 * HR + 26.436$
Septiembre	0.26	0.55	0.08	6.8	29.9	0.7	$TE = 0.057 * HR + 13.85$	$TE = 0.1399 * HR + 8.4579$	$TE = 0.0281 * HR + 21.104$
Octubre	0.76	0.68	0.21	57.7	46.5	4.6	$TE = 0.1199 * HR + 8.6307$	$TE = 0.1156 * HR + 9.1353$	$TE = 0.0406 * HR + 19.856$
Noviembre	0.56	0.38	0.45	31.9	14.4	20.5	$TE = 0.1581 * HR + 5.7843$	$TE = 0.0796 * HR + 9.3223$	$TE = 0.1375 * HR + 11.219$
Diciembre	0.57	0.54	0.57	32.9	29.1	32.6	$TE = 0.1428 * HR + 5.6654$	$TE = 0.12 * HR + 7.2434$	$TE = 0.1472 * HR + 9.1761$

**Tabla 6**  
**Regresión lineal entre TE y la V considerando el efecto del viento**

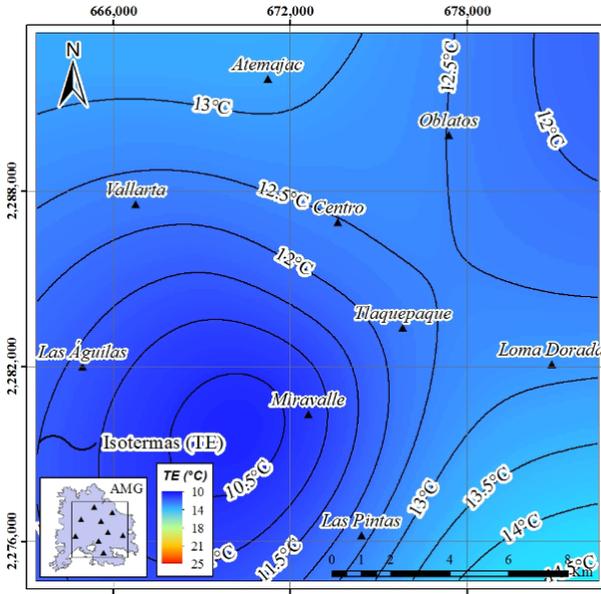
Meses	R			R <sup>2</sup> (%)			Ecuaciones de regresión			
	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Máxima
Enero	-0.74	-0.76	-0.31	54.2	58.1	9.4	TE = -0.8549*V + 14.902	TE = -3.5441*V + 12.139	TE = -0.1802*V + 20.804	
Febrero	-0.57	-0.80	-0.16	32.7	63.9	2.4	TE = -0.5895*V + 15.422	TE = -3.2914*V + 12.694	TE = -0.106*V + 22.112	
Marzo	-0.57	-0.85	-0.23	33.0	71.9	5.1	TE = -0.4108*V + 16.161	TE = -2.539*V + 13.161	TE = -0.0831*V + 23.559	
Abril	-0.65	-0.53	-0.45	41.9	28.3	20.0	TE = -0.7114*V + 19.879	TE = -2.2277*V + 14.851	TE = -0.2169*V + 27.385	
Mayo	-0.23	-0.68	0.10	5.1	45.9	0.9	TE = -0.188*V + 19.302	TE = -1.3584*V + 15.607	TE = -0.0769*V + 27.625	
Junio	-0.71	-0.92	0.17	50.8	84.5	2.8	TE = -0.6052*V + 21.057	TE = -2.0308*V + 17.396	TE = 0.1952*V + 24.837	
Julio	-0.86	-0.95	-0.34	73.3	89.9	11.9	TE = -0.6776*V + 20.241	TE = -2.7784*V + 17.922	TE = -0.2123*V + 25.518	
Agosto	-0.92	-0.88	-0.43	85.3	78.2	18.6	TE = -0.6243*V + 20.075	TE = -2.305*V + 17.701	TE = -0.2544*V + 25.393	
Septiembre	-0.92	-0.92	-0.31	85.4	85.1	9.3	TE = -0.7692*V + 20.427	TE = -3.0468*V + 18.339	TE = -0.1521*V + 24.684	
Octubre	-0.23	-0.29	-0.51	5.2	8.5	25.7	TE = -0.2251*V + 17.746	TE = -0.6939*V + 15.079	TE = -0.2431*V + 24.856	
Noviembre	-0.60	-0.39	-0.51	35.5	15.6	26.4	TE = -0.8284*V + 17.081	TE = -1.3518*V + 12.86	TE = -0.4495*V + 24.569	
Diciembre	-0.62	-0.79	-0.29	38.0	62.7	8.7	TE = -0.9933*V + 15.495	TE = -3.1403*V + 12.325	TE = -0.2575*V + 21.59	

**Mapas bioclimáticos**

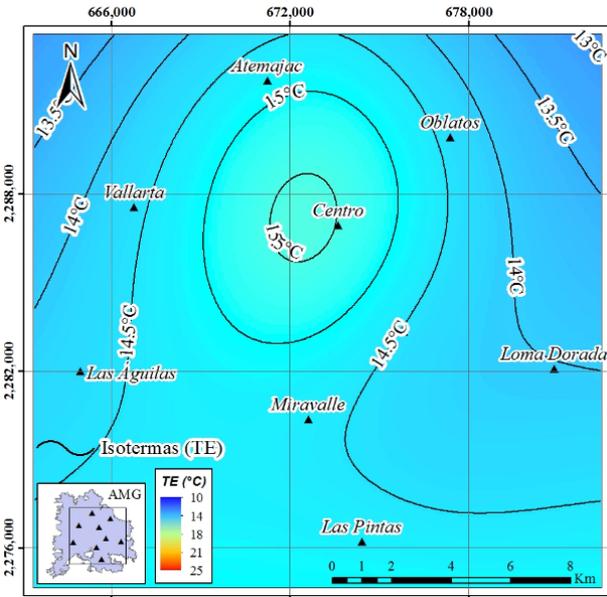
En base a las Figuras 15 y 16, se han detectado aquellos meses y horas en que cada sensación térmica es ejemplificada de mejor manera, es decir, aquellas con mayor número de frecuencias, cuya distribución espacial y temporal mostrada dependerá de la variación de los datos de cada una de las nueve estaciones. Utilizando la herramienta de interpolación espacial de *spline*, son mostradas las Figuras de la 17 a la 24 en los *mapas bioclimáticos* que son delimitados a una área de influencia a través de la aplicación de la herramienta de geoestadística de polígonos de *Thiessen* para cada una de las sensaciones térmicas con su respectivo valor de *TE*.



**Figura 17.** Mapa de *frío* sin considerar el efecto del viento, mes de enero de 3 a 9 horas (madrugada y mañana).



**Figura 18.** Mapa de *frío* considerando el efecto del viento, mes de enero de 0 a 10 horas (mañana y madrugada).



**Figura 19.** Mapa de *fresco* sin considerar el efecto del viento, mes de noviembre de 1 a 10 horas (mañana y madrugada).

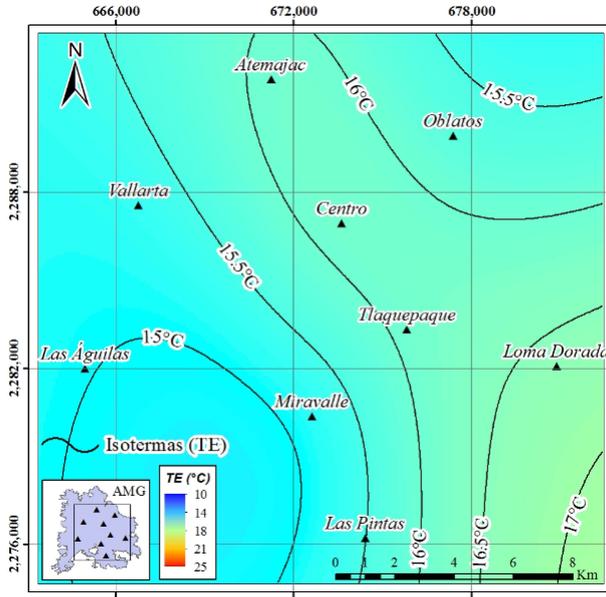


Figura 20. Mapa de fresco considerando el efecto del viento, mes de abril de 1 a 9 horas (mañana).

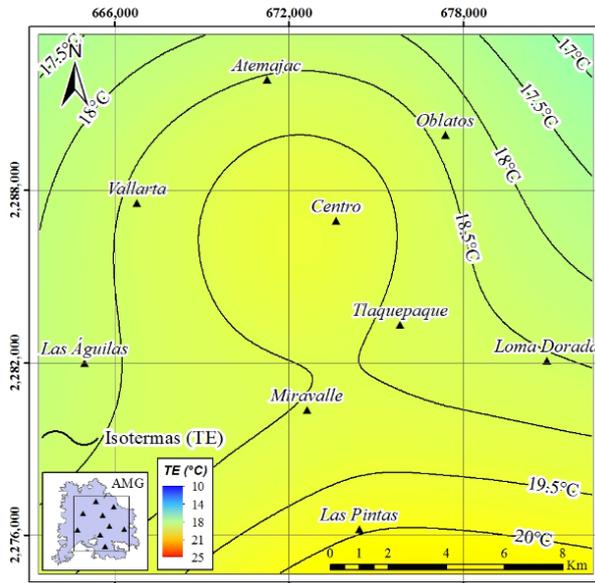
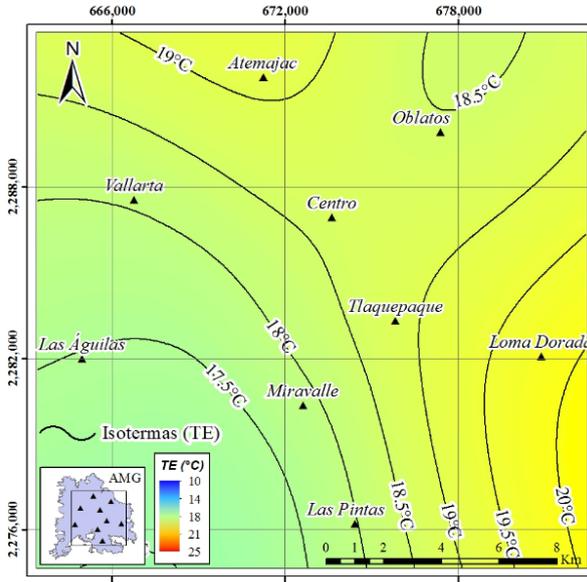
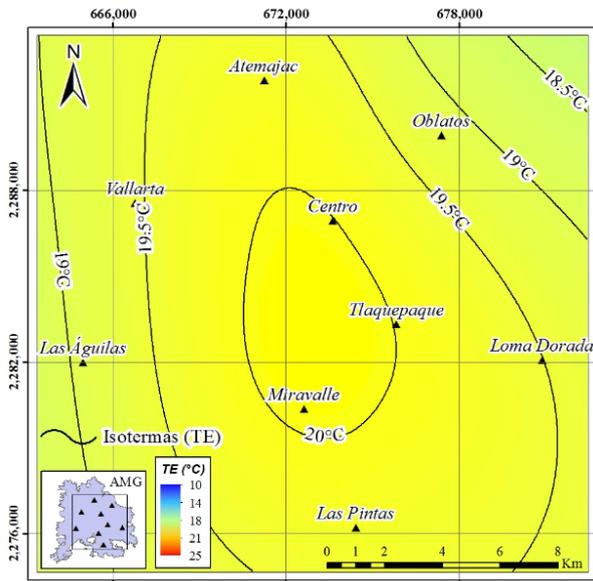


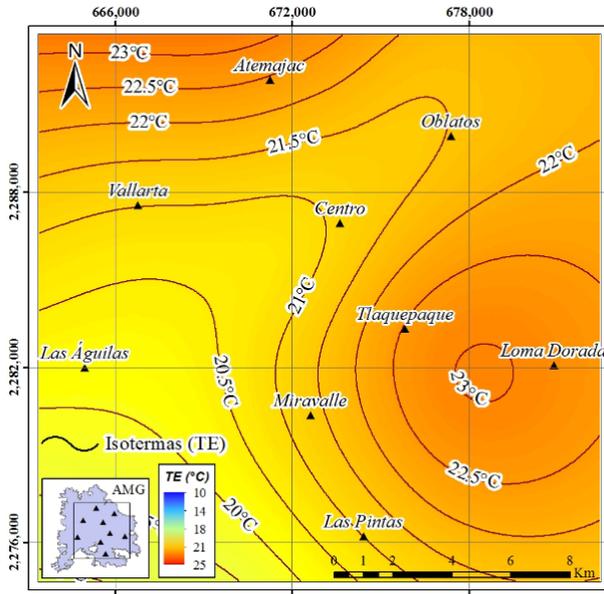
Figura 21. Mapa de fresco ligero sin considerar el efecto del viento, mes de junio de 3 a 10 horas (mañana).



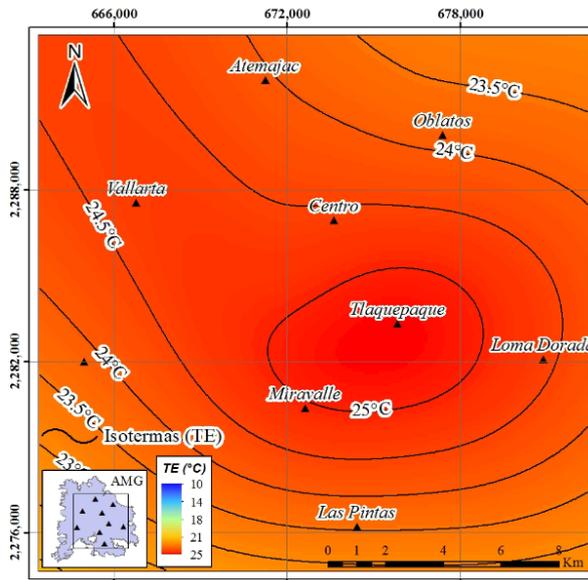
**Figura 22.** Mapa de *fresco ligero* considerando el efecto del viento, mes de septiembre de 22 a 10 horas (noche, madrugada y mañana).



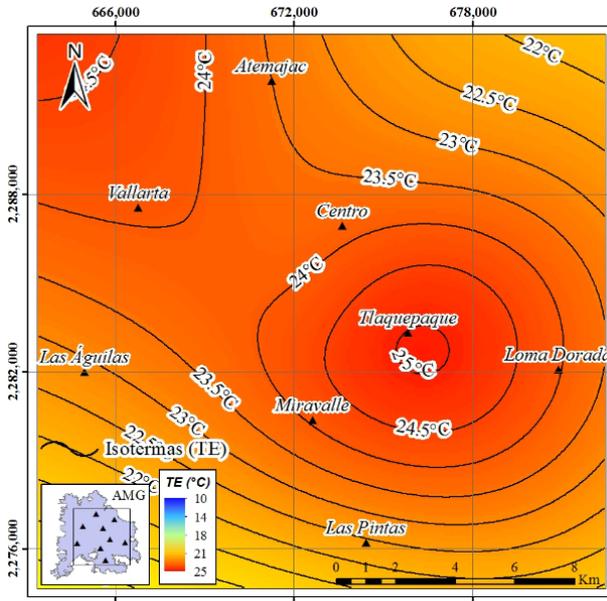
**Figura 23.** Mapa de *comfortable* sin considerar el efecto del viento, mes de julio de 20 a 14 horas (excepto por la tarde (de 14 a 20 horas)).



**Figura 24.** Mapa de *confortable* considerando el efecto del viento, mes de julio de 12 a 21 horas (tarde e inicio de la noche).



**Figura 25.** Mapa de *cálido ligero* sin considerar el efecto del viento, mes de mayo de 14 a 20 horas (tarde e inicio de la noche).



**Figura 26.** Mapa de *cálido ligero* considerando el efecto del viento, mes de mayo de 15 a 19 horas (solo por la tarde).

## Conclusión

Los límites del confort para el AMG quedaron establecidos de 19.7 a 22.9° C de *TE*, que se presenta en horas y meses específicos. Las sensaciones térmicas identificadas fueron frío, fresco, fresco ligero, confortable y *cálido ligero* vinculados a los meses de enero, noviembre, junio, julio y mayo (sin considerar el efecto del viento) y enero, abril, septiembre, julio y mayo respectivamente (considerando el efecto del viento). Al igual que la *T*, la *TE* mostró el mismo patrón, siendo sus mínimos y máximos a las ocho horas (*TE máxima*) y 17 horas (*TE mínima*) respectivamente, encontrando que el efecto del viento provoca disminución de la *TE* y consecuentemente de la sensación percibida. De acuerdo a los diagramas bioclimáticos, fue identificada una distribución concéntrica de las sensaciones térmicas en torno al frío y al *cálido ligero*. Para meses de abril a octubre no existen situaciones (frecuencias) de frío y de noviembre a febrero no existe el *cálido ligero* (sin considerar el efecto del viento), y de julio a septiembre y de septiembre a mayo para las mismas sensaciones (considerando al viento).

El análisis de regresión lineal por par de variables *TE* es la variable a explicar (dependiente), la cual mostró fuerte y positiva *R* para *T* en todos los meses y los tres momentos del día. La *R* en la relación con *HR* fue variada, destacando los meses de

mayo y junio como un fuerte modificador directo, siendo en las mínimas (al amanecer) de agosto a septiembre la mayor  $R$ , y para  $V$  mostró fuerte incidencia inversa general en la mínima y en la media mayormente en julio y agosto. Las ecuaciones de regresión lineal pueden ser aplicadas a situaciones en que se necesite conocer la  $TE$  tanto en ambiente interior como exterior con tan solo conocer una de las tres variables y aplicándola de acuerdo a la temporalidad que se deseé, cuyo resultado será más acertado entre mayor sea su  $R^2$ . Los mapas bioclimáticos dejaron ver que la distribución espacial y temporal no es uniforme, encontrando la misma sensación en los meses de enero, mayo y julio con diferencia en horas, y en los meses de abril, junio, septiembre y noviembre se presentan distintas sensaciones con ciertas horas coincidentes.

### Bibliografía

- Aulicemms A. y De Dear R., "Air-conditioning in Australia: human thermal factors", *Architectural Science Review*, no. 29, 1986, pp. 67-75.
- ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Standard, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, Georgia, 1966.
- ANSI/ASHRAE, "Thermal environmental conditions for human occupancy", Atlanta, Georgia, 2004.
- Cervantes, J. y Barradas, V., "Ajuste de escalas de sensación térmica para Xalapa, Veracruz, México", *Investigación y Ciencia*, vol. 48, Universidad de Aguascalientes, México, 2010, pp. 38-43.
- Fernández, F., "Clima y confortabilidad humana. Aspectos metodológicos", *Serie Geográfica*, vol. 4, Universidad Autónoma de Madrid, 1994, pp. 109-125.
- Givoni, B., "Biometeorological índices", *Progress in Biometeorology*, vol. 1, Holanda, 1974, pp. 138-145.
- Guillén-Mena V. y Orellana D., "La influencia de la vegetación arbórea urbana para disminuir el nivel de polución y alcanzar el confort climático", *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2016, pp. 67-75.
- Guzmán F. y Ochoa J., "Confort térmico en los espacios públicos urbanos: clima cálido y frío semiseco", *Revista Hábitat Sustentable*, vol. 4, pp. 52-63, 2014.
- Hajek, E. y Espinoza, G., "Biometeorología humana: algunos conceptos y proyecciones", Universidad católica de Chile, 1982, pp. 501-512.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), XII Censo de Población y Vivienda, México, 2010.
- Marincic I., Ochoa J., y Del Río J., "Confort térmico adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad", *Architecture, City and Environment*, vol. 7, núm. 20, pp. 27-46, 2012.

- Méndez, I., “Consideraciones bioclimáticas para el para el establecimiento de las tarifas eléctricas domésticas en los estados de Tabasco, Veracruz y Tamaulipas”, tesis de Maestría en Geografía, Facultades de Filosofía y Letras, UNAM, México, 2004.
- Mesa N., Arboit, M. y de Rosa C., “Modelos de cálculo de los rangos del confort térmico. Verificación de su aplicabilidad y la incidencia de las variables determinantes”, *Avances en energía renovable y medio ambiente*, núm. 13, 2009, pp. 61-68.
- Missernard, A., *L’Homme et le climat*, Eyrolles, Paris, 1937.
- Muñoz L. y Torres R., “Las fachadas verdes como herramienta pasiva de ahorro energético en el bloque administrativo de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería”, *Revista de Arquitectura de la Universidad de los Andes*, núm. 13, 2013, pp. 140-149.
- Musari A., Adewale A. & Olonade K., “Determination of heat stress in north-west Region of Nigeria”, *Research Journal Engineering and Applied Sciences*, no. 3, 2014, pp. 232-238.
- OMM, *Vocabulario meteorológico mundial*, Suiza, 1992, p. 276.
- Seifert, G., “Das klima der DDR- dargestellt durch Effektivtemperatrem”, *Zf Meteorologie*, no. 12, 1958, pp. 328-338.
- Tornero J., Pérez A., Gómez F., “Ciudad y confort ambiental: Estado de la cuestión y aportaciones recientes”, Universidad de Valencia, España, 2006, pp. 147-182.
- Wakely P., “Diseño y confort térmico en climas cálidos”, *Un texto de aprendizaje programado para arquitectos*, Universidad de los Andes, Mimeo, Bogotá, 1978.