

## **Análisis del confort térmico en la ciudad de Santiago de Guayaquil a través de la caracterización de árboles**

### **Analysis of thermal comfort in the city of Santiago de Guayaquil through the characterization of trees**

DOI: 10.53499/sfjeasv3n2-005

Received in: Jan 5nd, 2023

Accepted in: Mar 31th, 2023

#### **Carlos Alberto Nieto Cañarte**

Docente - Investigador de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
cnieto@uteq.edu.ec

#### **Orlando Adolfo Hermida Iturralde**

Magíster en Tecnologías Urbanas Sostenibles  
orlandohermida@yahoo.com

#### **Angelita Leonor Bosquez Mestanza**

Docente - Investigadora de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
abosquezm@uteq.edu.ec

#### **Carlos Vinicio Sanabria Yépez**

Técnico del Ministerio de Agricultura y Ganadería  
csanabria@mag.gob.ec

#### **RESUMEN**

La reducción de la temperatura bajo los árboles por efecto de la evapotranspiración y la cobertura del dosel, ampliamente estudiada según su especie y valorada por índices, no ha sido objeto de estudio dentro de Guayaquil, ciudad que además de caracterizarse por sus altas temperaturas durante el año, presenta manifestaciones del fenómeno Isla de Calor Urbano (ICU). El presente estudio analiza la influencia directa en la reducción de la temperatura de 19 especies de árboles que se encuentran dentro de la zona urbana a través del índice de temperatura fisiológica equivalente (TFE), obtenido del modelo RayMan Pro y detalla las características predominantes del paisaje en la ciudad ejemplificadas en 2 zonas. residencial, con el fin de discernir el ajuste de 5 especies eficientes para mitigar el efecto UCI. Los resultados muestran las especies introducidas como las más óptimas, pero no así los potenciales conflictos con la infraestructura urbana ya concebida, se pudo determinar la ubicación de especies medianamente eficientes sin seguir un patrón específico en ambas áreas de estudio.

**Palabras clave:** Isla de calor urbana, temperatura fisiológica equivalente, árboles.

## ABSTRACT

The reduction of temperature under trees due to the effect of evapotranspiration and canopy cover, widely studied according to its species and valued by indices, has not been the object of study within Guayaquil, a city that, in addition to being characterized by its high temperatures during the year, presents manifestations of the Urban Heat Island (UHI) phenomenon. The present study analyzes the direct influence on the temperature reduction of 19 tree species found within the urban zone through the equivalent physiological temperature index (PET), obtained from the RayMan Pro model and details the predominant landscape characteristics in the city exemplified in 2 zones. residential, in order to discern the adjustment of 5 efficient species to mitigate the UHI effect. The results show the introduced species as the most optimal, but potential conflicts with urban infrastructure already conceived, not so, it was possible to determine the location of moderately efficient species without following a specific pattern in both study areas.

**Keywords:** Urban heat island, equivalent physiological temperature, trees.

## 1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Santiago de Guayaquil, la más poblada en Ecuador (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos [INEC], 2010) y con una flota vehicular que se ha incrementado hasta ser la más grande del país después de la ciudad de Quito (INEC, 2016) se desarrolló de manera irregular en gran parte de su componente urbano, el cual está marcado por asentamientos sobre antiguos ramales de esteros que reemplazó la extensa cobertura de manglar propia de estos por relleno de cascajo y pavimento (Estrada, 2000) propagándose así la sustitución de cobertura vegetal por suelos impermeables, pasando de una superficie que favorecía al flujo de calor latente que reducía el calor sensible gracias a la acción fisiológica del manglar (evapotranspiración) a una superficie que gana calor sensible ante la ausencia de esta evapotranspiración, modificando el balance de energía y por consiguiente, la temperatura local (Jackson et al., 2010).

Mientras continúa la reducción de la cobertura vegetal a favor de las palmeras, la acumulación del calor radiativo en el hormigón y la suma gases de efecto invernadero por incremento del parque automotor, hace que la ciudad sea cada vez más susceptible al efecto Isla de Calor Urbano (ICU), fenómeno ya reportado por el Instituto Nacional de Energías Renovables y Eficiencia Energética [INER] (2016), en cuyo informe menciona la presencia en distintos puntos de la urbe, sujeto a los materiales de construcción y que se acentúa en aquellas zonas carentes de vegetación, a la vez que advierte el incremento de la demanda energética que provocará este fenómeno, retroalimentando el ciclo como se menciona textualmente en el resumen publicado en su revista científica: “*cuanto más caliente el medio ambiente, mayor la demanda de refrigeración que necesitarán las*

*edificaciones, mayor consumo de electricidad y cuanto mayor sea el calor liberado en estas zonas urbanas, se contribuye a un ambiente más cálido sucesivamente” (INER, 2017).*

Aunque el efecto ICU en la ciudad fue recientemente investigado, la falta de árboles en el área urbana han generado manifestaciones del colectivo ecologista Árboles Sin Fronteras (2018) y de El Selectivo (2018) que demandan incrementar la cobertura arbórea para obtener beneficios ecosistémicos, mientras otras como Fundación La Iguana (2018) ejecuta acciones de reforestación con especies nativas dentro de la urbe argumentando una *“solución inmediata para contrarrestar los efectos del cambio climático”*, aunque si bien esta propuesta es loable, engloba a todas las especies nativas como eficientes sin realizar una evaluación para su selección de acuerdo al lugar y al objetivo planteado, por lo que sus acciones de siembra podrían no llegar a ser de provecho en el objetivo a alcanzar o asegurar su supervivencia en un medio urbano.

El efecto Isla de Calor Urbano (ICU) definido como *“el incremento de la temperatura ambiente de la ciudad y de las superficies comparada con la de las zonas rurales”* (Santamouris et al., 2016) fue estudiado por Oke (1982) quien reveló los principios físicos de este efecto: los materiales de construcción con su capacidad de absorción de radiación (infrarrojo cercano) y emisión de calor (infrarrojo lejano), la morfología urbana capaz de modificar la dirección de los vientos y las actividades antrópicas como el uso de vehículos o sistemas térmicos. Basados en los dos primeros principios, INER ejecutó un estudio del componente edilicio y morfológico de la ciudad de Guayaquil a fin de verificar su existencia, detectando incrementos de entre 3°C a 4°C durante las tardes y noches, con mayor incidencia en las zonas desprovistas de vegetación. (INER, 2016) El componente energético fue estudiado por Palme et al. (2017) quienes concluyeron que la demanda energética por uso de aire acondicionado en Guayaquil puede variar entre un 17% a 206% cuando es afectada por el efecto ICU, superando a ciudades costeras como Lima o Antofagasta y agregando que *“las funciones edilicias están conectadas con el entorno urbano, porque al incrementar la temperatura exterior, crece la demanda energética y esto a su vez aumenta el calor de la ciudad”*

El efecto del fenómeno ICU aún no tiene una influencia definitivamente vinculada con el ya confirmado cambio climático (IPCC, 2014) existen publicaciones basados en simulaciones donde revela que este, efectivamente se retroalimenta debido a la demanda energética, mientras otros no aseveran relación alguna (Santamouris et al., 2016) Si bien se presenta cierta incertidumbre acerca de los efectos del calentamiento global sobre las

ICU, años atrás el Banco Mundial, (2011) ya recomendaba la inclusión de “*infraestructura verde y vegetación para lograr una refrigeración natural*” como una de las respuestas para la adaptación al cambio climático en ciudades, esta es la misma estrategia utilizada para aplacar el fenómeno ICU (Rosenfeld, et al., 1995) (Taha, 1997) puesto que la vegetación reduce la temperatura del aire por la evapotranspiración de las especies empleadas (Kornarska et al., 2015) y la sombra generada del dosel (Andreou, 2014) por lo que el cumplimiento de esta recomendación no solo que muy probablemente contribuiría al afrontamiento del cambio climático de las próximas décadas, sino que también aportaría a la atenuación de las Islas de Calor.

El potencial del árbol como regulador térmico está sujeto a sus características específicas como tamaño, densidad del dosel, forma, color y tamaño de la hoja, orientación, edad y crecimiento; influyendo en la radiación interceptada, temperatura y humedad. (The Nature Conservancy, 2016) lo que ha dado la búsqueda de resultados correlativos entre el confort térmico y las características propias de las distintas especies, como el estudio ejecutado en Tapie, Taiwan por Lin & Lin (2010) que después de tomar mediciones de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar debajo de 12 especies arbóreas, encontraron que el enfriamiento superficial bajo el árbol va supeditado a la densidad foliar, grosor, textura y color de la hoja en este orden, siendo más eficiente las hojas más gruesas ante las finas, las rugosas más que las lisas y las verde claro sobre las verde oscuras. Abreu-Harbich, Labaki, & Matzarakis (2015) analizaron el comportamiento bioclimático bajo 10 especies de forma individual y 6 de manera agrupada en Campiñas, Brasil y mediante el índice de Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) vinculado al Factor de Vista al Cielo (SVF), establecieron que el efecto de enfriamiento está influido por la permeabilidad del dosel, disminuyendo de 0°C a 2.8°C en forma individual y entre 0.3°C a 15°C de grados PET en doseles conglomerados con variación sujeta al tipo de especie. Kong, et al., (2017) estudiaron el comportamiento de la Temperatura Radiante Media ( $T_{mrt}$ ) y PET en 12 especies entre árboles y palmeras en Hong Kong, correlacionando con el SVF debajo de cada árbol, concluyendo que la  $T_{mrt}$  tiene menor repercusión a nivel peatonal cuando interfieren especies de troncos pequeños y amplio dosel, llegándose a reducir hasta en un 78% la radiación de onda corta que llega al suelo, decreciendo así la reflexión como onda larga y un descenso entre 1.6°C y 2.5°C en grados PET, muy significativo al comparar con un 5.2% de radiación de onda corta que intercepta un escaso dosel como el de una palmera con su incremento de PET hasta en 2.2°C y Konarska, et al. (2015) afirmaron el efecto de evapotranspiración de

árboles urbanos en el enfriamiento diurno estudiando 9 especies más comunes de Gotemburgo, Suecia.

Mientras citados estudios correlacionan las características del árbol y el confort térmico que se experimenta bajo este, un factor ajeno a la naturaleza del árbol como la ubicación fue estudiado por Sanusi et al. (2016) concluyendo que la orientación influye a determinadas horas del día, siendo más eficientes aquellos árboles emplazados con dirección Este-Oeste por seguir la dirección del cenit solar a diferencia que la orientación Norte-Sur. Investigaciones como el de Georgi & Zafiriadis (2006) y Jiménez (2008) proponen la jerarquización arbórea para el confort térmico, con diferentes metodologías basándose en los mismos parámetros, han gestado un inventario de especies aptas para la ciudad de origen u otras publicaciones relacionadas al confort térmico urbano que incorporan comparaciones entre dos o más especies (Fahmy et al., 2010), también Feyisa et al. (2014) demuestran la viabilidad de análisis de especies con características propias como estrategia puntual al enfrentamiento del fenómeno Isla de Calor Urbano.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 PRINCIPIOS DE REDUCCIÓN DE TEMPERATURA**

#### **2.1.1 Evapotranspiración**

La evapotranspiración, ligada a la capacidad de carga hídrica del sistema árbol-suelo, está conformada por la suma de sus partes que son la evaporación, la cual toma lugar en la superficie de la estructura foliar y la transpiración, que se manifiesta a través de los estomas de la hoja por acción de la fotosíntesis (Fahmy et al., 2010) y que es afectado por estrés hídrico como consecuencia de las temperaturas elevadas y falta de agua, obligando a la planta a cerrar sus estomas para conservarse hidratada (Alvarado et al., 2014). La evapotranspiración, consume más del 50% de la radiación solar absorbida por la superficie (Trenberth et al., 2009) y tiene un efecto en el principio de balance radiativo, el cual sostiene que mediante la evapotranspiración, el árbol transforma en humedad a la molécula de agua que toma del suelo, y para cumplir este proceso utiliza energía, a este requerimiento energético para un cambio de estado se le denomina flujo de calor latente, como resultado, baja la temperatura del aire ambiente circundante percibido por las personas o dicho de otro modo, reduce el flujo de calor sensible, obteniendo un resultado favorable al equilibrar balance de energía radiativa, Este ha sido uno de los principios en investigaciones de aspectos climáticos atribuible a bosques

(Jackson et al., 2010) y a urbes, donde experiencias aplicadas en esta última sostienen que la limitada cantidad de áreas verdes de una ciudad a causa de la sustitución de vegetación por concreto o asfalto, provoca una reducción de flujo de calor latente, induciendo al almacenamiento de energía radiativa en dichos materiales y que posteriormente será liberada como flujo de calor sensible, aumentando la temperatura del aire, por consiguiente la arborización se convierte en uno de los principios que sustenta al equilibrio del balance de energía, causante directo del efecto ICU, empero, no todas las especies tienen el mismo efecto ya que varía de acuerdo a la especie y las condiciones ambientales (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003) (Fahmy, et al, 2010) (Ballinas & Barradas, 2015).

### **2.1.2 Sombra del dosel**

Por otra parte, la sombra propia de un amplio dosel no solo protege de la radiación solar (onda corta) a nivel peatonal, sino que es capaz de brindar un efecto de enfriamiento del aire que puede extenderse hasta cien metros de distancia (Shashua-Bar & Hoffman, 2000) mientras más amplio sea el canopeo o dosel, la temperatura del aire será menor y existirá notorio confort térmico, con mayor percepción al medio día y en las primeras horas de la tarde, (Spangenberg et al., 2008) este enfriamiento también está supeditado por la estructura foliar como el grosor, textura, brillo y densidad; mismas características que también influyen en el decrecimiento de temperatura superficial bajo el dosel de acuerdo a la diversidad de sus rasgos, de esta manera la sombra de las diferentes arboles llevan marcadas particularidades que logran hacerlas eficientes en el decrecimiento de la temperatura del aire en unas especies y del suelo en otras (Lin & Lin, 2010) esta última cualidad minimiza la inercia térmica en los materiales propios de la ciudad, disminuyendo la manifestación del calor (onda larga) durante las noches (The Nature Conservancy, 2016) además de un descenso de la temperatura del aire ambiente llevada por flujos convectivos al entrar en contacto con superficies más frías (Taha, 1997).

### **2.2 FACTOR DE VISTA AL CIELO (SVF)**

El Factor de Vista al Cielo o SVF (Sky View Factor) definido por Oke, (1995) como “*la fracción visible del cielo vista desde un punto determinado*” es adimensional y su rango es entre 0 y 1, donde 0 es un cielo cubierto por el terreno u obstáculos mientras 1 es para un cielo descubierto (Matzarakis, 2017) la determinación del SVF es mediante

fotografías hemisféricas circulares llamadas ojo de pez o “fisheye” de una cámara fotográfica digital profesional sobre un trípode a una altura determinada y posteriormente, de forma manual, se discierne aquellos espacios abiertos de los cerrados en softwares específicos como Rayman Pro (Osmond, 2010) los resultados se distinguen entre los pixeles blancos como espacios abiertos y los pixeles negros como cerrados.

### **2.2.1 Vinculación de la sombra con el SVF**

He et al. (2014) en sus estudios indican que un valor SVF menor a 0.3, experimenta condiciones menos calurosas en verano y consideran parte esencial en la investigación del microclima urbano y confort térmico exterior, ya que además de ser un indicador de la geometría del canon urbano, influye en la acumulación de energía en las superficies y la circulación del aire. De cierta forma (Osmond, 2010) coincide al mencionar que el impacto de la densidad, forma y altura edilicia sobre el flujo radiativo de onda larga, es una variable significativa en la cuantificación del efecto Isla de Calor Urbano.

La vinculación del SVF con el potencial de sombra de cada árbol, está relacionada con la apertura del dosel o CO (Canopy Openness) definido por Gonsamo et al. (2011) como *“la fracción del área del cielo que no es obstruida por el canopeo u otros elementos cuando se lo observa desde un punto determinado”*. El SVF se puede conocer haciendo uso de una cámara fotográfica con un campo de visualización de 180° ubicada sobre un trípode nivelado a una altura determinada y posteriormente mediante softwares, clasificar los pixeles de las fotografías que corresponden al espacio libre como nubes o cielo para separar del espacio correspondiente a elementos obstructores como ramas, hojas etc. (Gonsamo, et al, 2011) Al ser la misma metodología para obtener tanto el SVF como el CO, Abreu-Harbich et al. (2015) la emplearon con el fin de observar las aberturas en el canopeo que permitan el ingreso de radiación y utilizarla como SVF utilizando el software Rayman Pro como lo demuestran en su metodología, en tanto que Sanusi, et al., (2016) en estudios de confort térmico bajo el dosel arbóreo demostraron que el SVF es inversamente proporcional CO es decir que a mayor SVF, menor CO.

En los últimos años se ha dado el surgimiento aplicaciones para estudios relacionados a la obtención del CO con cámaras fotográficas de teléfonos inteligentes (smartphones), aunque con limitación de opciones como el caso de *Gap Light Analysis Mobile Application* o GLAMMA, (Tichý, 2015) CANOPEO, (Patrignania & Oschner, 2015) o HABITAPP. (McDonald & McDonald, 2016). Con estos antecedentes Bianchi,

Calahan, Hale, & Gibbons, (2017) compararon los resultados aplicando la metodología tradicional utilizando dos equipos fotográficos, una cámara Nikon Coolpix 990 y una Nikon Coolpix 4500 equipadas con un lente convertidor FC-E8 183° contra fotografías tomadas desde un smartphone marca Samsung Grand Prime anexada a una lente fisheye marca Aukey con un campo de visualización de 150° sin hacer uso de un tripode o un nivel para tomar dos muestras, una en dirección Norte-Sur y otra Este- Oeste y promediando los dos valores, los resultados obtenidos con ambas metodologías fueron similares, concluyendo que la opción de utilizar un smartphone es una alternativa rápida, barata y confiable.

### 2.3 TEMPERATURA RADIANTE MEDIA ( $T_{mrt}$ )

Matzarakis et al. 2010 indica que la influencia de las radiaciones de onda corta y onda larga sobre el componente bioclimático humano puede sintetizarse como la Temperatura Radiante Media o *Mean Radiant Temperature* (MRT o  $T_{mrt}$ ), definido por Fanger (1970) como “*La temperatura promedio de la radiación de onda corta proveniente del sol y onda larga reflejada en todas las direcciones desde superficies, objetos y entidades que rodean al cuerpo humano*”, Una de sus características es la susceptibilidad a su modificación por nubes, morfologías topográficas y estructurales y sobre todo, es el parámetro más importante en índices termofisiológicos basados en el Balance Energético Humano para estudios bioclimáticos con condiciones estivales como en el caso del índice PET. (Matzarakis et al., 2007) (Matzarakis et al., 2010) guardando afinidad al CO<sub>2</sub>, por ser equivalente a la sombra (Abreu-Harbach et al., 2015) y a la caducifoleidad de la especie (Fahmy et al., 2010) la que aplaca la radiación de onda corta por reflexión y transmisión a través de sus hojas, reduciendo así la  $T_{mrt}$  a nivel peatonal (Kong et al., 2017).

### 2.4 ÍNDICE TEMPERATURA FISIOLÓGICA EQUIVALENTE (PET)

La utilización de índices bioclimáticos se debe a que en el espacio urbano se modifican las variables atmosféricas que influyen en el Modelo de Balance Energético Humano como la temperatura del aire, velocidad del viento y presión de vapor afectando al confort térmico, la salud y el consumo energético de las ciudades, (Andrade & Alcoforado, 2008) Uno de los índices bioclimáticos es la Temperatura Fisiológica Equivalente o *Physiological Equivalent Temperature* (PET), este es el más utilizado en

estudios de planeamiento urbano (Puliafito et al., 2013) (Abreu-Harbich et al., 2015) (Kong, et al., 2017) ya que además de utilizar parámetros basados en la simplificación del mencionado Modelo del Balance Energético Humano (Höppe, 1993) como temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento y la  $T_{mrt}$ , sus resultados se generan en grados centígrados, haciéndolo más comprensible en estudios urbanos, amigable con la cartografía bioclimática y recomendable para diferentes climas (Matzarakis et al., 1999).

El mencionado Modelo de Balance Energético Humano, cuyo nombre completo es Balance Energético Humano de Munich o MEMI (Munich Energy Balance Model for Individuals) (Höppe, 1993) es la base para el cálculo del índice PET. Su ecuación es:

$$M + W + R + C + E_{Sk} + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0$$

Donde M es la tasa metabólica (producción interna de energía); W trabajo físico; R radiación neta; C flujo de calor sensible y E es el flujo de calor latente cuando:  $E_{Sk}$  es a través de la piel,  $E_{Re}$  por la respiración,  $E_{Sw}$  por la evaporación de la transpiración y S el calor almacenado. Estos valores están expresados en Watts en forma positiva o negativa dependiendo de la ganancia o pérdida respectivamente a excepción de M que es siempre positivo mientras W,  $E_{Sk}$ ,  $E_{Sw}$  serán siempre negativos y S será cero cuando se asume una posición firme. (Matzarakis & Amelung, 2008) (Matzarakis & Rutz, 2017) Los flujos de calor individuales de la dada ecuación están expresados en forma de energía, pero son controlados por componentes meteorológicos como Temperatura del aire: C,  $E_{Re}$ ; Humedad del aire:  $E_{Sk}$ ,  $E_{Re}$ ,  $E_{Sw}$ ; Velocidad del viento: C,  $E_{Sw}$ ; Temperatura Radiante Media o  $T_{mrt}$ : R Cuando la Asociación Alemana de Ingenieros o VDI, (1998) define a PET como el “*equivalente a la temperatura del aire requerido para reproducir la temperatura corporal e interna de una persona estándar en un escenario estándar observado bajo condiciones evaluadas*” hace referencia a una persona estándar caracterizada de poseer un metabolismo básico o “M”, que ejecuta una actividad ligera y un trabajo o “W” de 80W, adicionalmente tiene una resistencia de vestuario o “clothing” de 0.9 unidades (Matzarakis & Amelung, 2008).

### 2.4.1 Escala de clasificación

El rango de valoración de las temperaturas en grados PET está clasificado en nueve clases de percepción térmica según *Matzarakis & Mayer, (1996)* en donde sobrepasar los 29 °PET o decrecer los 13 °PET es un indicio para alcanzar un grado de estrés térmico, por otra parte, permanecer entre los 18° PET a 23° PET resulta confortable y por ende, contrario adquirir un grado de estrés térmico (Tabla 1)

Tabla 1. Clasificación Térmica de la Temperatura Fisiológica Equivalente

PET °	Percepción térmica	Grado de estrés físico
> 41	Muy caliente	Estrés térmico extremo
35 - 41	caliente	Estrés térmico fuerte
29 - 35	cálido	Estrés térmico moderado
23 - 29	Suavemente cálido	Proclive a estrés térmico
18 - 23	Comfortable	Sin estrés térmico
13 - 18	Suavemente fresco	Proclive a estrés térmico
8 - 13	Fresco	Estrés térmico moderado
4 - 8	Frío	Estrés térmico fuerte
≤ 4	Muy frío	Estrés térmico extremo

Valorización de las clases térmicas perceptibles cuando se toma en cuenta los parámetros fisiológicos de una persona estándar según *Matzarakis & Mayer, (1996)*

### 2.4.2 Método de obtención

Usualmente la consecución del PET es mediante el uso de estaciones meteorológicas móviles que disponen de un sensor en forma de globo oscuro para captar las radiaciones provenientes de todas las direcciones durante el tiempo de interés de la investigación (*Mayer et al., 2008*) (*Thorsson et al., 2006*) (*Sanusi et al., 2016*) la principal complejidad de este índice es la obtención de la  $T_{mrt}$ , parámetro imperante en la validación de PET. Cuando en las estaciones meteorológicas comunes no se dispone del sensor de globo, también se aplica el método hexa-direccional (six-directional) el cual consiste en la combinación de un piranómetro para la medición de la radiación de onda corta incidente y un pirómetro para la medición de onda larga ascendente y descendente orientados en seis direcciones: cielo, suelo y los cuatro puntos cardinales midiendo completamente los flujos radiativos. (*Andrade & Alcoforado, 2008*) (*Matzarakis et al., 2007*)

## 2.5 OBTENCIÓN DE PET POR SIMULACIÓN

### 2.5.1 Simulación con el software Rayman Pro

Al ser una metodología larga, costosa y muchas veces inaccesible, en estudios climáticos y de confort térmico comúnmente no se incluyen los nombrados parámetros, de manera que los resultados de aquellos índices que utilizan solo temperatura y humedad relativa, por ejemplo, llegan a tener variaciones significativas cuando se compara con un índice bioclimático. (Matzarakis & Amelung, 2008) Sin embargo, ahora se presenta la oportunidad de determinar el índice PET mediante simulación con el modelo RayMan Pro, (Matzarakis, 2017) este calcula la radiación de onda corta y onda larga tomando en cuenta las estructuras urbanas complejas llegando así al  $T_{mrt}$ , el mismo modelo calcula PET utilizando además los parámetros adicionales a relevar con instrumentación portátil como temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y el SVF (Matzarakis et al, 2007) (Matzarakis & Amelung, 2008) (Matzarakis & Rutz, 2017).

### 2.5.2 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de acuerdo a Matzarakis et al. (2010) es la simulación de flujos radiativos de onda corta y onda larga, dividiendo al ambiente en un plano separativo inferior y superior desde 1.1 metros, altura que representa el centro de gravedad del cuerpo humano de acuerdo a Fanger (1972) calculando la radiación global y directa de acuerdo a las formula de Jendritzky (1990), la radiación difusa según Valko (1966), la estimación de la radiación de onda larga desde las superficies está sujeto al principio de Stefan-Boltzman y la radiación de onda larga proveniente de la atmosfera según la fórmula de Amgstron, necesitando solo de temperatura del aire, presión de vapor y la nubosidad en octavas; con estos parámetros, el modelo finalmente computa la  $T_{mrt}$  según la fórmula de Fanger (1972) Normalmente el plano inferior tiene un SVF cubierto por elementos que modifican los resultados del  $T_{mrt}$  y por consiguiente el índice PET (He et al., 2014).

### 2.5.3 Validación

Estudios que incluyen la validación de sus resultados mediante el método de Correlación de Pearson con valores de  $T_{mrt}$  obtenidos a partir de sensores demuestran la fiabilidad del software Rayman Pro. Andrade & Alcoforado, (2008) relizaron mediciones utilizando el método hexa-direccional para la obtención del  $T_{mrt}$  durante la noche con valores SVF oscilantes entre 0.25 y 0.84, el coeficiente de correlación fue de  $R^2=0.93$ ,

Haciendo uso del mismo método Matzarakis, Rutz, & Mayer, (2010) correlacionaron los valores obtenidos en dos ambientes distintos, bajo un grupo de árboles y en un espacio semi abierto rodeado por edificios y árboles durante el día en tres días de verano. Los resultados de correlación fueron de  $R^2=0.96$  y  $R^2=0.95$  bajo el canopeo arboreo y bajo el espacio semiabierto respectivamente. Lin et al. (2010) utilizando un termómetro de globo, midieron la  $T_{mrt}$  en cinco ambientes angostos con variaciones de SVF entre 0.04 y 0.81 causado por el componente edilicio y arboreo durante cuatro días, uno en cada estación del año y una medición en la terraza de un edificio de cuatro pisos. La correlación total obtenida fue de  $R^2=0.85$  en valores  $T_{mrt}$ . Chen et al. (2014) experimentaron su validez además de otros modelos comparando con la metodología hexa-direccional. Los valores de correlación entre Rayman y el método hexa direccional fueron de  $R^2=0.91$  y  $R^2=0.92$  para un cielo despejado y nublado respectivamente. Adicionalmente se hallan publicaciones de estudios dirigidos a la búsqueda del confort térmico arboreo utilizando el software Rayman (Puliafito, et al, 2013) (Abreu-Harbich, et al, 2015) (Sanusi, et al, 2016) (Kong, et al., 2017), la utilización de Rayman Pro para el cálculo del SVF (Osmond, 2010) y la relación del SVF con la temperatura del aire (He, et al., 2014).

## 2.6 EVALUACIÓN DE LA REFORESTACIÓN

Para que las especies sobrevivan, es necesario conocer el árbol correcto para el sitio correcto (Farley, 2013), de aquí parte la necesidad de la evaluación de la reforestación, misma que determina qué y donde sembrar (USDA, 2006), además de los métodos apropiados para preparar el sitio y reducir posibles conflictos, asegurando así que el árbol elegido pueda sobrevivir a las condiciones inherentes a su localización (Gilman & Sadowski, 2007). Puesto que la vegetación urbana ha sido ampliamente ignorada por planificadores (Vailshery et al., 2013) antes de iniciar un proceso de arborización se debe considerar las características del sitio como el espacio disponible, estructuras adyacentes, redes de servicio y normativa; atributos de la especie a seleccionar como su requerimiento hídrico, acoplamiento al suelo disponible, altura en su madurez y el objetivo a plantear que pueden ser múltiples o unitarios (Alvarado et al., 2014).

### 2.6.1 Características de la especie

El tamaño define el espaciamiento al momento de sembrar, con distanciamientos de 4 a 6 metros para los árboles pequeños o con altura menor a 6 metros, entre 6 a 8 metros de distancia para los árboles medianos o de 6 a 15 metros de altura y entre 8 a 12

metros de espaciado para los árboles grandes o mayores a los 15 metros de altura (Alvarado et al., 2014). Un apropiado volumen radicular está relacionado con las adecuadas funciones arbóreas, un volumen limitado de suelo confina las raíces, limita el crecimiento, reduce el anclaje y provee inadecuados nutrientes y humedad (USDA, 2006) es por esto que es necesario conocer el Diámetro a la Altura de Pecho o DAP, no solo útil para una aproximación del espacio que puede ocupar el engrosamiento del tronco de cada especie en una vereda dentro de un cantero o plantera, (Alvarado, Guajardo, & Devia, 2014), sino también para determinar el volumen de suelo requerido para su crecimiento normal, el cual puede conocerse de acuerdo a la correlación de Urban, (1999) (Figura 1) multiplicando el área de siembra a una profundidad estándar de 1 metro (Suchocka, 2013). Las plantas sembradas en espacios confinados morirán de sequedad mucho más rápido que aquellas que tienen suficiente volumen de suelo para anclaje radicular (USDA, 2006).

La diversidad también se presenta como un elemento significativo para impedir la mortalidad de las especies en caso existir plagas o insectos que perjudiquen a una misma especie (Farley, 2013). Gilman & Sadowski (2007) indica que generalmente es recomendable un número de 5 especímenes para reducir el impacto en caso de haber un brote, adicionalmente, esto crea mayor diversidad de hábitats (USDA, 2006). La demanda hídrica depende de cada especie y de las condiciones del lugar, si esta no es superior a la pluviometría, los riegos son necesarios sólo durante las primeras etapas (Ledesma, 2008) así, es menester el reconocimiento de los árboles adaptados tanto al requerimiento hídrico como al clima local, tipo de suelo, drenaje, exposición solar y compactación, el mismo que puede lograrse con el relevamiento de la vegetación existente (USDA, 2006). El relevamiento de la vegetación presente en el área de interés ayuda a conocer si la zona es conveniente para determinada especie y aunque los árboles nativos son usualmente recomendadas por adaptarse mejor a las condiciones locales y requerir menos mantenimiento, el ambiente urbano puede dictaminar la selección de una especie foránea naturalizada por ser más resistente a condiciones adversas (USDA, 2006). La etapa de esta evaluación se limita a recorrer y apuntar las especies del sitio a estudiar, (Gilman & Sadowski, 2007) también se detalla las estructuras urbanas entorno al árbol, señalando los inconvenientes e interferencias detectadas (Ledesma, 2008).

### **2.6.2 Características del medio**

Las variables espaciales de una ciudad para con la forestación urbana, presenta retos adicionales a la forestación común, ya que además de necesitar conocer los

componentes edáficos e hídricos del entorno, la escasa disponibilidad de espacio a falta de un planeamiento urbano con el que el sitio fue concebido, dificulta la tarea y reduce la esperanza de vida del árbol (Alvarado, Guajardo, & Devia, 2014) .es por esto que la evaluación del lugar es el primer paso para elegir a las especies de interés, enfocando los atributos físicos superficiales y subterráneos mediante el análisis de las características del escenario y sus componentes antes de emitir un criterio de selección (Gilman & Sadowski, 2007). El criterio de selección de especies también va de acuerdo a la ubicación de las redes de servicio para evitar que estas puedan causar obstrucción en drenajes y acueductos al momento de buscar agua naturalmente, rompiendo tuberías sobre todo en drenajes viejos y deteriorados; (USDA, 2006) el prescindir de la siembra de árboles en aquellas ubicaciones donde se requiera visibilidad ya sean letreros, señalizaciones o luminarias, (Alvarado, Guajardo, & Devia, 2014) y la elección de especies acorde al tamaño, favoreciendo a los más pequeños bajo los cables aéreos y los altos cerca de luminarias de tal manera que el dosel crezca encima de la luz (USDA, 2006). La exposición solar y la escorrentía están influidas por la configuración urbana. Los rayos solares pueden ser directos o direccionados por los edificios, generando estrés hídrico debido a la acumulación de calor a la que no todas las especies pueden tolerar mientras que las pronunciadas pendientes pueden acortar el aprovechamiento del agua de escorrentía pluvial, por lo que especies tolerantes a las sequías son aptas para estos dos tipos de ambientes (USDA, 2006).

El espaciamiento en siembras a lo largo de una calle está muchas veces restringido por la expansión del canopeo arboreo y el crecimiento de las raíces que tienden a dañar y levantar el pavimento, (Smiley, 2008) con un mayor potencial de daño en los pavimentos de asfalto que en los de concreto (Wong, Good, & Denne, 1988) además de la dificultad de desarrollo en suelos compactados. Soluciones sencillas a este inconveniente se proponen a nivel superficial con la utilización de adoquines, juntas de expansión, retrocesos, rampas etc (USDA, 2006) y las más complejas a nivel radicular que involucran diseño para su direccionamiento, suelos estructurales o pavimentos permeables, sin embargo, estas soluciones involucran costos adicionales que pueden desmotivar a los gobiernos locales (Smiley, 2008). Otra solución propuesta por USDA, (2006) para evitar conflictos con las redes de servicio es la poda direccional, en lo cual coincide Ledesma, (2008) al mencionar que las podas no son necesarias en áreas abiertas como parques o plazas, en tanto que en áreas con restricciones espaciales es necesario

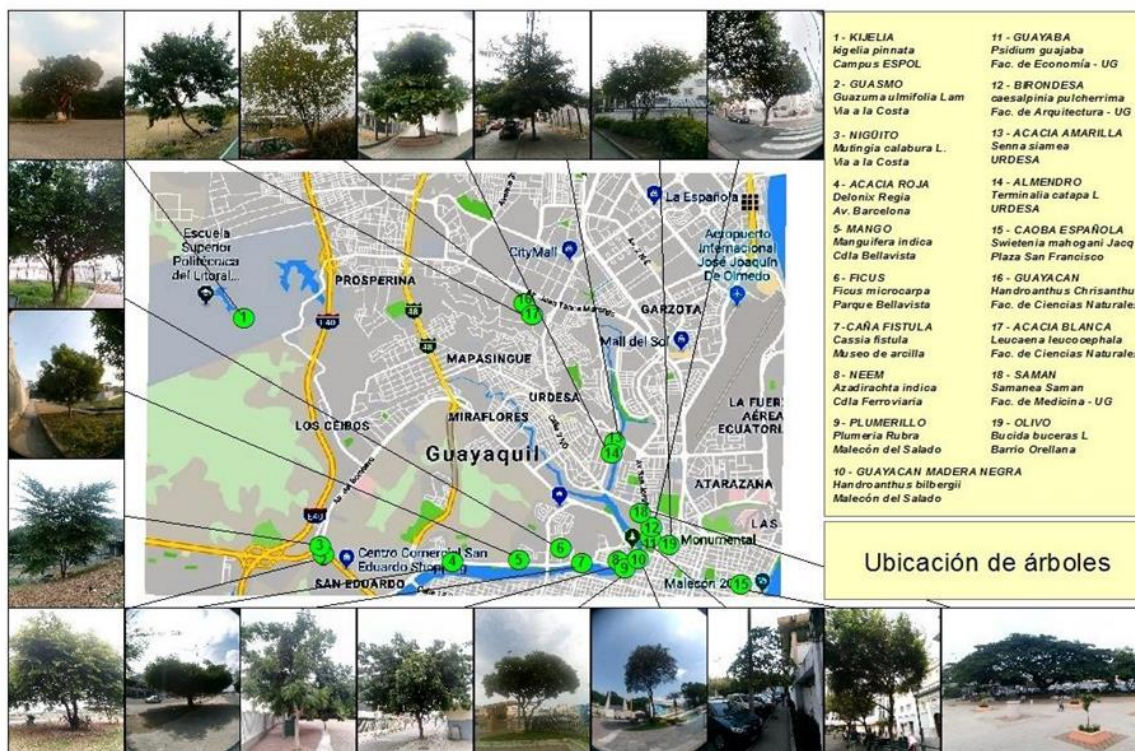
conducir al árbol y evitar la interferencia con las líneas de cableado aéreo, tránsito vehicular y peatonal, viviendas y otros obstáculos.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 LUGAR DE ESTUDIO

La ciudad de Guayaquil localizada entre las coordenadas 2°11'00"S / 79°53'00"O a una altura entre 0 a 4 m.s.n.m. y superficie total de 265 km<sup>2</sup> (INEC, 2010), tropical seco de acuerdo a la clasificación climática de Koppen, entre diciembre y mayo se presenta la época lluviosa con temperaturas promedio de 27.2°C (máxima de 30.7°C) acompañada de copiosas precipitaciones, mientras que de junio a noviembre se presenta la época seca con ausencia de lluvias y temperaturas promedio de 25.2°C (máxima 29.2°C) (INAMHI, 2018). Se pretende representar la mayor parte de la ciudad tomando dos zonas experimentales (un barrio del Norte y un barrio del sur) que ejemplifiquen la predominante estructural y espacial de la ciudad (Figura 1):

Figura 1. Ubicación de las zonas de estudio



## 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO GENERAL EMPLEADO

El parámetro para la consecución del confort térmico arbóreo fue el índice PET, mediante uso del software libre Rayman Pro, cuyos resultados permiten establecer una jerarquización de especies de mayor enfriamiento térmico de acuerdo a la comparación de PET obtenido bajo el dosel de las variedades seleccionadas con el obtenido bajo la sombra de un techo o un parasol, ordenándolas de forma descendente. Los parámetros necesarios relevados para obtener el índice PET fueron: temperatura en grados centígrados y humedad relativa; fotos hemisféricas circulares con un dispositivo “ojo de pez” anexo a la cámara fotográfica de un teléfono móvil; velocidad del viento promedio y nubosidad en octavas.

## 3.3 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECONOCIMIENTO

### 3.3.1 Reconocimiento de especies

El texto “Árboles de Guayaquil” (Molina et al., 2015) como guía principal para el reconocimiento de las especies predominantes en la ciudad y la visita al jardín botánico de Guayaquil para la observación in situ, permitió el apunte de características principales para su posterior búsqueda dentro del entorno urbano. Se buscaron ejemplares alejados de edificaciones u otros árboles que puedan causar sombra adicional, no se consideró su naturaleza endémica o introducida, tampoco el tamaño de raíces o tronco, pero sí el dosel amplio basado en el principio de “a mayor abundancia foliar, menor temperatura” (Lin & Lin, 2010) no fueron tomados en cuenta los árboles aparentemente caducifolios a excepción de aquellos sembrados por la municipalidad en el proceso de regeneración urbana, tampoco las palmeras. Las variables como altura, requerimiento hídrico, exposición solar y forma de raíces, persistencia fueron obtenidos de los recursos bibliográficos disponibles, el DAP de los árboles utilizados para la medición también fue registrado. La ubicación de los ejemplares se encuentra en el anexo A.

### 3.3.2 Reconocimiento del área de estudio

La medición de veredas, ancho de calles y de las rampas, (Figura 2) Debido a las desigualdades dimensionales que se llegaron a presentar de forma recurrente, se establecieron valores mediante promedios. El ancho de las veredas calculado con múltiples mediciones en ubicaciones aleatorias y el de las calles con mediciones antes de la intersección con su correspondiente calle transversal, en tanto que los diferentes tamaños del ancho de las rampas de ingreso a las cocheras en las dos zonas de estudio

fluctuaron entre 2.50 m a 3 m por lo que se estableció el mayor valor. Ante la falta de los planos subterráneos, las cajas de redes de servicio fueron relevadas en un recorrido utilizando un plano de Google Maps y se asumió la altura del cableado eléctrico y telefónico contemplando la legislación que regula la instalación de postes y líneas eléctricas de media y baja tensión.

Figura 2. Veredas, calles y espacios de aparcamiento



También consta la identificación de árboles en la zona con el fin de obtener una evaluación preliminar del entorno con respecto a una posible siembra y la búsqueda de alternativas.

### 3.4 TOMA DE PARÁMETROS

#### 3.4.1 Temperatura y humedad

La temperatura y humedad relativa fueron registradas utilizando un termo higrómetro marca PeakMeter modelo MS6508 a una altura de 1.1 metros del piso, (Matzarakis, 2017) (Sanusi et al, 2016) en días soleados. El muestreo consistió en promediar lecturas periódicas de un minuto durante diez minutos bajo la sombra del árbol seleccionado desde las 11:00 a 17:00, el mismo procedimiento se repitió inmediatamente después bajo la sombra de un techo cercano. Al final de la jornada se obtienen 140 lecturas de temperatura y 140 de humedad relativa, tanto bajo el dosel como bajo el techo o parasol, (Figura 3) que al promediarlos se simplifican en 14 datos de temperatura y 14 datos de humedad relativa. Estos son los datos necesarios a ingresar en el software Rayman Pro.

Figura 3. Temperatura y humedad relativa de la especie *Ficus Benjamin*



### 3.4.2 Factor de Vista al Cielo

El factor de vista al cielo o Sky View Factor fue obtenido con fotografías hemisféricas circulares utilizando un dispositivo ojo de pez o “fisheye” para celulares marca Aukey OL-A1 180 grados, anexo a un teléfono móvil Nokia 3 con cámara de 8 megapíxeles. A diferencia de la medición de temperatura, se esperaron los días nublados para la toma de fotografías bajo el dosel del árbol a 1.30 metros del suelo en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, manteniendo firmemente sobre la mano. El procedimiento es fiel a la metodología de Bianchi, et al, (2017). Las fotografías SVF se encuentran en el anexo B.

### 3.4.3 Diámetro a la altura del pecho (DAP)

El Diámetro a la Altura del Pecho o DAP es una metodología utilizada para conocer el diámetro del árbol. Se la obtiene rodeando con una cinta métrica el tronco del árbol a la altura del pecho para obtener su diámetro, es resultado es dividido para el número  $\pi$  de acuerdo a la metodología descrita por UNLP (2002).

### 3.4.4 Velocidad del viento y nubosidad

Aún en días soleados y despejados, hay fracciones del cielo cubiertas por nubes, es por eso que mediante observación al cielo y separándolo imaginariamente en ocho partes se estima la nubosidad en octavas al momento de tomar la temperatura y la humedad, aunque si bien es un método subjetivo, es válido para observaciones meteorológicas, mientras que la velocidad del viento es del promedio de los últimos diez años del sitio web del INAMHI (2018).

Figura 4. DAP de birondesa (*Caesalpinia Pulcherrimia*)<sup>1</sup> y caoba española (*Swietenia Mahagoni*)<sup>2</sup>



### 3.5 PARÁMETROS A INGRESAR EN EL SOFTWARE RAYMAN PRO

La pantalla principal del software Rayman Pro, (Figura 5) solicita parámetros básicos a completar, como las fotografías y unidades térmicas que se han obtenido en el relevamiento, mientras otros datos no son necesarios puesto que el mismo modelo lo calcula.

#### 3.5.1 Fecha, día del año y hora

El día del año permite obtener una estimación del acercamiento del sol hacia la tierra, por ende, su influencia en la temperatura. Se fijaron las fechas y las horas del relevamiento de temperatura y humedad relativa.

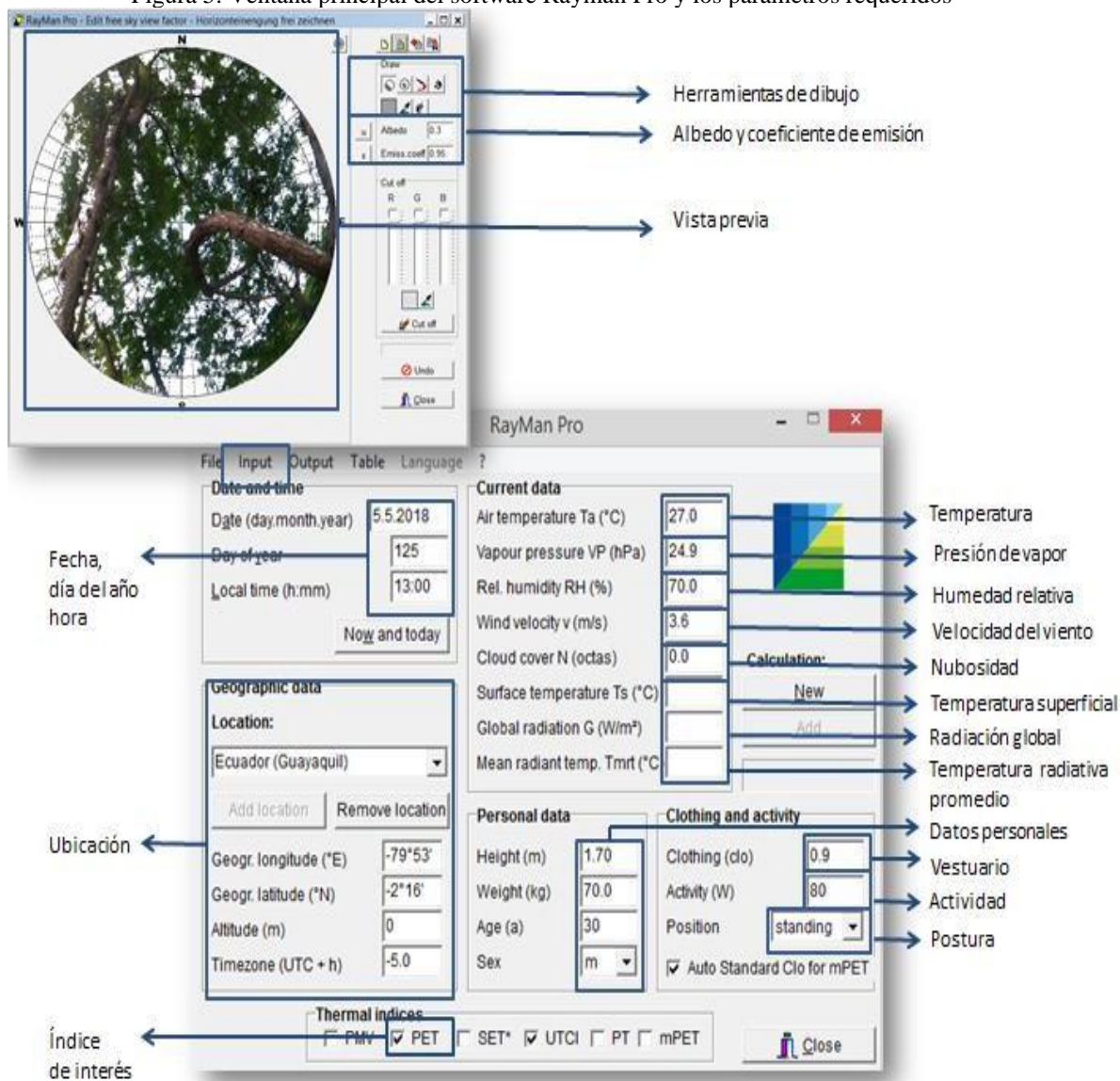
#### 3.5.2 Ubicación Geográfica

Es conocido que la temperatura regional y que la radiación solar receptada en un ámbito geográfico es repercutida por la latitud y altitud. El modelo Rayman Pro incluye a en su catálogo a Guayaquil y autocompleta los valores correspondientes.

#### 3.5.3 Índice Térmico

Rayman Pro permite obtener índices térmicos como el Predicted Mean Vote (PMV), Standard Effective Temperature (SET), Universal Thermal Climate Index (UTCI), Perceived Temperature (PT) y Modified Physiologically Equivalent Temperature (mPET). El índice de interés fue el Physiologically Equivalent Temperature (PET). En la parte superior izquierda se muestra la ventana el apartado que calcula el SVF desde la pestaña “Input” (Figura 5):

Figura 5. Ventana principal del software Rayman Pro y los parámetros requeridos



### 3.5.4 Humedad relativa y presión de vapor

La presión de vapor se extrae automáticamente si se especifica la humedad relativa y la temperatura (Matzarakis, 2017) mientras que la temperatura y humedad relativa son conseguidos en el relevamiento.

### 3.5.5 Velocidad del viento y nubosidad

Se apunta el valor 3.6 m/s en todos los ensayos como un valor de referencia. Este valor es el promedio de los últimos diez años de acuerdo al INAMHI mientras que la nubosidad en octavas varía de acuerdo a la hora de los días estudiados.

### **3.5.6 Temperatura superficial, radiación global, temperatura radiante media**

Rayman Pro computa dichos parámetros basándose en expresiones matemáticas de Oke (1987) para Temperatura Superficial (Surface Temperature); Valko (1966) Kasten & Young (1989) y VDI (1998) para Radiación Global (Global Radiation) y de acuerdo a Fanger (1972) Jendritzky & Nübler (1981) (Jendritzky et al, 1990) para Temperatura Radiante Media (Mean Radiant Temperatura).

### **3.5.7 Datos personales**

Rayman Pro incluye este apartado fundamentándose en que *“la percepción térmica se basa en la sensación de parámetros térmicos integrados que es percibida por la piel, el torrente sanguíneo y regulado por el hipotálamo”* (Tromp, 1980) y por lo tanto no puede medirse a partir de un solo parámetro meteorológico (Matzarakis, 2017) Los parámetros anotados fueron: sexo masculino (Sex m), 30 años de edad (Age) 30, estatura (Height) 1.70m, peso (Weight) 70kg.

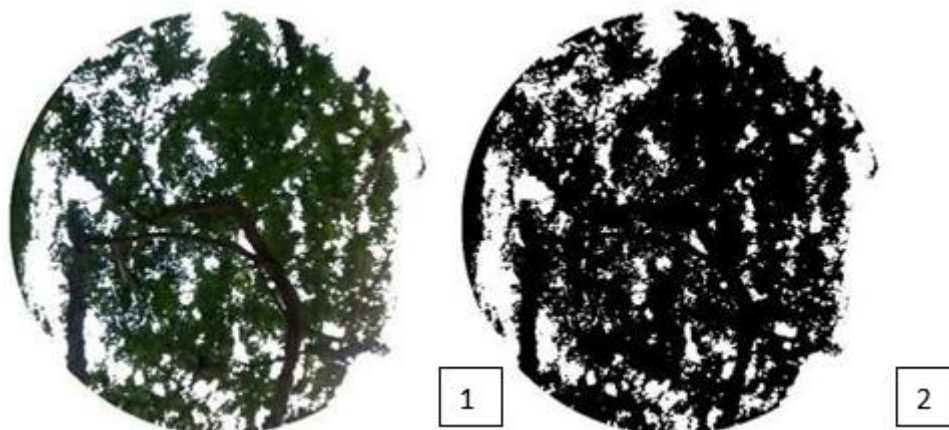
### **3.5.8 Actividad y vestuario**

En las unidades de vestuario (Clothing) y actividad (Activity) Matzarakis & Amelung, (2008) recomiendan utilizar los valores de 0.9 en vestuario, correspondiente a ropa de trabajo ligera y 80W como actividad leve.

### **3.5.9 Input: fotos hemisféricas circulares, albedo y emisividad**

La fotografía de la especie de interés en dirección Norte-Sur es ingresada en la sesión del día y la hora correspondiente para ser clasificada de forma manual con las herramientas de dibujo, obteniendo un gráfico separado de los elementos externos como el cielo o nubes (Figura 6) y repitiéndose con la fotografía Este-Oeste. El valor de albedo fue de 2.5 correspondiente a hierba verde según (Makvart & Castalzer, 2003) y el coeficiente de emisividad de 0.9 (Oke, 1987). El procedimiento completo se repite con los valores de temperatura y humedad relativa relevadas bajo la sombra del techo, para esto se incluyó un gráfico que representó un SVF de 0 (completamente cubierto) con valores 3 y 0.9 para albedo y emisividad respectivamente:

Figura 6. hemisférica circular de la especie *Caesalpinia Pulcherrimia*, Norte<sup>1</sup> y Sur<sup>2</sup>



### 3.5.10 Obtención de valores PET de especie y jerarquización

Los 7 valores PET (11:00 a 17:00) de cada especie, producto de las sesiones ejecutadas con las fotografías de dirección Norte-Sur fueron promediados para obtener un único valor, el procedimiento se repite con los valores PET obtenidos con las fotografías Este-Oeste, estos dos valores se promedian para llegar al valor “PET especie”, en tanto que el valor “PET sombra”, alcanzado del mismo modo con los valores obtenidos bajo techo, es utilizado para conseguir el valor de reducción final:

$$\text{PET especie} - \text{PET sombra} = \text{reducción de grados PET}$$

## 4 OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 4.1 ENFRIAMIENTO POR ESPECIE

El resultado de temperatura en grados PET de las 19 especies estudiadas se expone en cada tabla de forma individual. Los valores “PET SVF” corresponden a los resultados PET logrados con los valores SVF de las dos fotografías hemisféricas circulares tomadas en cada especie, mientras que “PET especie” es el promedio de estos dos valores. Las dos últimas categorías, “PET intemperie” y “PET sombra” es la obtenida en un ámbito no sombreado y bajo una sombra no arbórea respectivamente. El rango de variación de temperaturas fluctúa de suavemente cálido o proclive a estrés térmico para temperaturas entre 23° a 29°, cálido o de estrés térmico moderado para temperaturas entre 29° a 35° y caliente o de estrés térmico fuerte para temperaturas entre 35° a 41°, de acuerdo a la clasificación de Matzarakis & Mayer (1996). Se agruparon los resultados como especies endémicas e introducidas, a su vez que fueron subclasificadas como eficientes, cuando la

reducción es >0.9°; poco eficientes, cuando la reducción es >0.2 ° y las ineficientes, que presentaron un incremento de la temperatura con respecto a la sombra.

#### 4.2 ESPECIES ENDÉMICAS EFICIENTES

Guasmo (*Guazuma Ulmifolia*) se muestra como la especie endémica más eficiente entre las seis identificadas, reduciendo -1.6° PET seguida de *Samanea Saman* o Samán - 1.3° PET y *Mutingia Calabura* o Nigüito con -0.9° PET. Mientras que la primera y la tercera especie se muestran valores de SVF <0.1 unidades, el SVF promedio la segunda es de 0.25 unidades (Tablas 2, 3 y 4)

Tabla 2. Samán (*Samanea Saman*)

Hora	PET SVF 0.30	PET SVF 0.21	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	28.8	29	28.9	36	30.8
12:00	29.8	30	29.9	34.4	30.8
13:00	29.7	29.9	29.8	38.1	33.4
14:00	31.4	31.6	31.5	40.1	33.3
15:00	31.8	30.1	31.0	39.9	30.9
16:00	30.9	28.8	29.9	41.9	30.9
17:00	27.6	28	27.8	40	27.7
Promedio			29.8	38.63	31.1

Tabla 3. Guasmo (*Guazuma Ulmifolia*)

Hora	PET SVF 0.06	PET SVF 0.09	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	28.1	28.2	28.2	37.3	31.5
12:00	28.9	28.9	28.9	36.2	32.3
13:00	30.3	30.3	30.3	35.7	31.1
14:00	29.1	29.2	29.2	37.7	30.9
15:00	29	29	29.0	39.3	30.3
16:00	28	28	28.0	38.9	28.3
17:00	26.5	26.5	26.5	38.5	26.6
Promedio			28.6	37.7	30.1

Tabla 4. Nigüito (*Mutingia Calabura*)

Hora	PET SVF 0.05	PET SVF 0.02	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	28.9	28.9	28.9	37.3	31.5
12:00	30.2	30.2	30.2	36.2	32.3
13:00	30.6	30.7	30.7	35.7	31.1
14:00	30.1	30.2	30.2	37.7	30.9
15:00	30	30.1	30.1	39.3	30.3
16:00	28.2	28.2	28.2	38.9	28.3
17:00	26.5	26.5	26.5	38.5	26.6
Promedio			29.2	37.7	30.1

### 4.3 ESPECIES INTRODUCIDAS EFICIENTES

Seis de las trece especies naturalizadas o introducidas se mostraron como las más propicias para la reducción de temperatura. Los árboles de Ficus (*Ficus Benjamin*), Acacia roja (*Delonix Regia*), Acacia amarilla (*Senna Siamea*), Almendro (*Terminalia Catapa*) y mango (*Manguifera Indica*) ostentan los mejores resultados con un el SVF <0.1 unidades, equivalente a un cielo oculto por el dosel en casi su totalidad, mejorando la temperatura correspondiente al apartado °PET sombra” el mismo que presenta valores por encima de los 30° PET (tabla 5, 6, 7, 8, 9) Olivo (*Bucida Buceras*) es la excepción en valores SVF con una media de 0.2 unidades de SVF y aunque si bien es un valor alejado de los anteriores en cuanto a otorgación de sombra, revela un descenso de -1.1° PET (tabla 10).

A diferencia de los ejemplos nativos, la curva de enfriamiento de todas las especies se mantiene alejada del patrón de sombra a lo largo del día, con mayor notoriedad en *Ficus Benjamin*, que aminora la temperatura - 2.7° PET llegando a restar un nivel en la clasificación de “caliente” a “cálido” entre las 13:00 hasta las 15:00 seguido de *Delonix Regia* que rebaja - 1.9° PET, *Senna Siamea* con - 1.7° PET *Manguifera Indica* y *Terminalia Catapa* - 1.6° PET y la mencionada *Bucida Buceras* con - 1.1° PET, que guarda un leve acercamiento a la temperatura PET sombra entre las 16:00 y 17:00.

Tabla 5. Ficus (*Ficus Benjamin*)

Hora	PET SVF 0.08	PET SVF 0.07	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	29.8	29.8	29.8	36.9	31.8
12:00	32.8	32.8	32.8	38.8	35.4
13:00	33.1	33.1	33.1	39.7	36.7
14:00	33.1	33.1	33.1	42.9	36.3
15:00	34.7	32.7	33.7	45.8	37.1
16:00	30.7	30.7	30.7	44	33.2
17:00	28.8	28.8	28.8	42.7	30.2
Promedio			31.7	41.54	34.4

Tabla 6. Acacia roja (*Delonix Regia*)

Hora	PET SVF 0.05	PET SVF 0.04	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	29.6	29.7	29.65	36.3	30.9
12:00	31.6	31.6	31.6	37.4	33.7
13:00	32.1	32.1	32.1	39.1	34.5
14:00	31.4	31.4	31.4	40.7	33.8
15:00	30.5	30.5	30.5	41.5	32.7
16:00	28.5	28.5	28.5	41.1	30.2
17:00	28.4	28.5	28.45	42.0	29.4
Promedio			30.3	39.7	32.2

Tabla 7. Acacia amarilla (*Senna Siamea*)

Hora	PET SVF 0.08	PET SVF 0.09	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	28.1	28.1	28.1	35.1	29.5
12:00	28.6	28.6	28.6	34.5	30.8
13:00	30.1	30	30.1	36.1	31.4
14:00	29.8	29.8	29.8	38.6	31.7
15:00	28.6	28.6	28.6	40.1	31.1
16:00	29.2	27.6	28.4	41	30
17:00	26.6	26.6	26.6	39.9	27.7
Promedio			28.6	37.9	30.3

Tabla 8. Almendro (*Terminalia Catapa L*)

Hora	PET SVF 0.03	PET SVF 0.02	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	28.4	28.3	28.4	35.1	29.5
12:00	28.8	28.8	28.8	34.5	30.8
13:00	29.3	29.3	29.3	36.1	31.4
14:00	30.1	30.1	30.1	38.6	31.7
15:00	29.1	29.3	29.2	40.1	31.1
16:00	27.9	28	28.0	41	30
17:00	27	27	27.0	39.9	27.7
Promedio			28.7	37.9	30.3

Tabla 9. Manguifera Indica - Mango

Hora	PET SVF 0.02	PET SVF 0.04	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	31.9	31.5	31.7	39.1	33.8
12:00	31.8	31.8	31.8	37.7	34
13:00	33.4	33.4	33.4	39.0	34.9
14:00	32.2	32.1	32.15	41.3	34.6
15:00	31.8	31.7	31.75	42.2	33.2
16:00	29.6	29.7	29.65	41.6	30.6
17:00	28.9	28.9	28.9	42.1	29.4
Promedio			31.3	40.4	32.9

Tabla 10. Olivo (*Bucida Buceras L*)

Hora	PET SVF 0.18	PET SVF 0.27	PET especie	PET intemperie	PET sombra
11:00	29.1	29	29.05	37.3	31.7
12:00	30.9	30.7	30.8	35.3	31.6
13:00	30.4	29.7	30.05	36.6	31.9
14:00	29.6	28.8	29.2	37.1	30.1
15:00	28.9	30.2	29.55	39.8	30.7
16:00	27.2	27.1	27.15	38.4	27.7
17:00	26.3	27.4	26.85	38.6	26.8
Promedio			28.95	37.59	30.07

## 5 CONCLUSIONES

Fue posible obtener la clasificación de especies de acuerdo la reducción de °PET, no obstante, las especies más eficientes no pueden ajustarse a las zonas de estudio por el reducido espacio que cuentan estos barrios residenciales y los riesgos a daños en las estructuras urbanas por la naturaleza morfológica de estos. Las especies que son aptas para las zonas de estudio si bien no son las más eficientes, logran una reducción entre 1.6° a 0.7° PET e indefectiblemente requieren poda de formación para evitar el crecimiento desmedido de largo y ancho o tronco y dosel respectivamente. Es necesaria la ocupación de espacios en la calzada con planteras. y la posibilidad de utilizar las especies eficientes en nuevos proyectos urbanísticos o espacios abiertos donde no interrumpa el cableado aéreo.

Queda a consideraciones gubernamentales tener en cuenta al arbolado urbano como labor necesaria para afrontar problemas cotidianos de las urbes que atentan a la calidad ambiental y sobre todo en la sociedad civil, como actores principales en exigir y hacer cumplir acciones que vinculen elementos propios de la naturaleza para una mejor calidad de vida.

### **Clasificar un grupo de especies arbóreas eficientes para la mitigación del efecto ICU**

En la evaluación de especies como atenuante de temperatura se obtuvieron diferentes respuestas térmicas, hallándose un importante enfriamiento de forma característica en algunas y una notable ineficacia para dicho propósito en otras.

Las especies introducidas *Ficus Benjamina*, *Delonix Regia* o acacia roja y *Senna Siamea* o acacia amarilla fueron las más eficientes en la reducción de temperatura, destacándose *Ficus Benjamina* al aplacar 2.7 °PET, en tanto que dos especímenes de los más comunes en los patios de las viviendas de la ciudad, *Terminalia Catappa* o almendro y *Mangifera Indica* o mango, lograron una importante merma térmica en 1.6 °PET. Por otro lado, cuatro tuvieron un efecto contrario al de enfriamiento, con incremento de temperatura bajo su dosel como *Psidium Guajava* o Guayaba, curiosamente las otras tres se hallan en las calles y avenidas regeneradas por el atractivo de sus flores, es el caso de *Caesalpinia Pulcherrima*, *Handroanthus Bilbergii* y *Handroanthus Chrysanthus*, estas dos últimas de naturaleza endémica.

Coincidiendo con la bibliografía, los valores SVF estuvieron vinculados a la reducción de temperatura, por lo que mencionados incrementos probablemente hayan sido causadas por los valores SVF correspondientes, pues los huecos o escaso dosel

permiten el ingreso de rayos solares como lo muestran los valores  $T_{mrt}$  y aunque si bien durante las mediciones se procuró evitar el contacto de la radiación solar, la reflexión en forma de onda larga influye en la temperatura ambiente y por ende en los registros del termohigrometro, empero, estas aberturas atañen a la forma natural de su correspondiente copa.

Las especies más eficientes se distinguen por tener un valor SVF  $<0.1$ , sin embargo, esta no es una condicionante, dado que la evapotranspiración también interviene en la merma de la temperatura, esto se puede notar especialmente en las especies de mayor diámetro y tamaño como *Samanea Saman*. Aquellas especies endémicas que tuvieron óptimos resultados fueron *Guazuma Ulmifolia* o Guasmo, *Samanea Saman* o Samán y algo alejado *Mutingia Calabura* o Nigüito.

Tabla 25. Reducción de temperaturas por especie en °PET y SVF

Nombre científico	Nombre común	Reducción °PET	SVF medio
<i>Ficus Benjamina</i>	Ficus	-2.7	0.07
<i>Delonix Regia</i>	Acacia roja	-1.9	0.04
<i>Senna Siamea</i>	Acacia amarilla	-1.7	0.08
<i>Terminalia Catappa</i>	Almendro - almendra	-1.6	0.02
<i>Mangifera Indica</i>	Mango	-1.6	0.03
<i>Guazuma Ulmifolia</i>	Guasmo	-1.6	0.07
<i>Samanea Saman</i>	Samán	-1.3	0.25
<i>Bucida Buceras</i>	Olivo	-1.1	0.22
<i>Mutingia Calabura</i>	Nigüito	-0.9	0.03
<i>Leucaena Leucocephala</i>	Acacia blanca- leucaena	-0.8	0.18
<i>Azadirachta Indica</i>	Neem	-0.7	0.09
<i>Cassia Fistula</i>	Caña fistula – lluvia de oro	-0.6	0.35
<i>Swietenia Mahagoni</i>	Caoba española	-0.6	0.32
<i>Kigelia Pinnata</i>	Kijelia africana	-0.5	0.32
<i>Plumeria Rubra</i>	Suche - Plumerillo	-0.2	0.14
<i>Psidium Guajava</i>	Guayaba	+0.4	0.52
<i>Handroanthus Chrysanthus</i>	Guayacán de la costa	+0.4	0.28
<i>Handroanthus Bilbergii</i>	Guayacán madera negra	+0.7	0.61
<i>Caesalpinia Pulcherrima</i>	Birondesa - Clavelina	+0.7	0.23

- **Recomendaciones para futuros trabajos:**

Contrastar la información de campo (*in situ*), con un análisis multitemporal (imágenes satelitales) de las temperaturas del área de estudio.

- **Limitaciones de la investigación**

Las normativas locales deben trabajar articuladamente con los departamentos responsables de las áreas verdes, para evitar tomar malas decisiones, ya que la vegetación arbórea urbana necesita un trato diferenciado, a la vegetación arbórea del área rural.

## REFERENCIAS

- Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2015). PaperEffect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planing*, 1 - 11; 2.
- Alvarado, A., Guajardo, F., & Devia, S. (2014). Manual de Plantación de árboles en Áreas Urbanas.
- Andrade, H., & Alcoforado, M. (2008). Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night. *Theor. Appl. Climatol*(92), 225 -237.
- Andreou, E. (2014). The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, 83, 587 -596.
- Árboles sin Fronteras. (2018). Recuperado el 23 de agosto de 2018, de [http://www.arbolessinfronteras.org.ar/donde\\_estamos.php](http://www.arbolessinfronteras.org.ar/donde_estamos.php)
- Ballinas, M., & Barradas, V. L. (2015). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Enviromental Quality*.
- Banco Mundial. (2011). *Guía para la Adaptación al Cambio Climático en Ciudades - resumen ejecutivo*. Washington D.C.
- Bianchi, S., Calahan, C., Hale, S., & Gibbons, J. (2017). Rapid assessment of forest canopy and light regime using smartphonehemispherical photography. *Ecology and Evolution - Pryfisgol Bangor University*.
- Chen, Y.-C., Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2014). Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany. *Theor Appl Climatol*(118), 535–551.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban enviroment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35, 69 - 76.
- El Selectivo: Colectivo de Arquitectura. (2018). Recuperado el 23 de agosto de 2018
- Estrada Ycaza, J. (2000). *Guía Histórica de Guayaquil* (Vol. 3). Guayaquil: Banco del Progreso.
- Fahmy, M., Sharples, S., & Yahiya, M. (2010). LAI based trees selection for mid latitude urban developments: A microclimatic study in Cairo, Egypt. *Building and Eviroment.*, 45, 345 - 357.
- Fanger, P. (1970). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. *Danish technical press*.
- Farley, J. (2013). Street Tree Diversification and Location Consideration. Universidad Estata de Utah.
- Feyisa, G., Dons, K., & Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*(123), 89-95.
- Fundación La Iguana. (2018). [www.fundacionlaiguana.org](http://www.fundacionlaiguana.org). Recuperado el 10 de 10 de 2018, de [www.fundacionlaiguana-org](http://www.fundacionlaiguana-org): <http://fundacionlaiguana.org/sobre-la-fundacion/>

- Georgi, J., & Zafiriadis, K. (2006). The impact of park trees on microclimate in urban areas. *Urban Ecosyst*(9), 195-209.
- Gilman, E. F., & Sadowski, L. (2007). The Urban Forest Hurricane Recovery Program. Universidad de Florida.
- Gonsamo, A., Walter, J., & Pellikka, P. (2011). A package of programs for determining canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs. *Computers and Electronics in Agriculture*(79), 207–215.
- Höppe, P. (1993). Heat balance modelling. *Experientia*, 49, 741-746.
- INEC. (2010). *Censo de Población y Vivienda*. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- INEC. (2016). *Anuario de transporte 2016*.
- INER. (2016). *Estimación del Efecto Isla de Calor Urbano en la ciudad de Guayaquil*. Instituto Nacional de Energía Renovable y Eficiencia Energética., Quito.
- INER. (2017). El fenómeno Isla de Calor Urbano en urbes costeras. *Revista científica del desarrollo energético*, 5, 25.
- IPCC. (2014). *Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge - Uk.
- Jackson, R. B., Randerson, J. T., Canadell, J. G., Anderson, R. G., Avissar, R., Baldocchi, D. D., y otros. (2010). Protecting climate with forests. *Environmental Research Letter*.
- Jendritzky G, M. H.-K. (1990). *Methodology for the spatial evaluation of the thermal component in the bioclimate of humans*.
- Jendritzky, G., & Nübler, W. (1981). A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Arch Meteorol Graphys Bioclimatol*, 29, 313 - 326.
- Jiménez, O. (2008). Índice de Confort de la Vegetación. *NODO*, 3(5), 49 - 70.
- Kasten, F., & Young, A. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl Optics*, 28, 4735-4738.
- Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., Chen, Y., Yong, X., Chao, R., y otros. (2017). Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong KongLing. *Sustainable Cities and Society*(31), 17- 25.
- Kornarska, J., Uddling, J., Holmer, B., Lutz, M., Lindberg, F., Pleijel, H., y otros. (2015). Transpiration of urban trees and its impact on daytime and nocturnal cooling in Gothenburg, Sweden. *9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Enviroment.*, (págs. 1 - 6). Toulouse.
- Ledesma, M. (2008). *Arbolado público. Conceptos. Manejo*. Córdoba: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Lin, B.-S., & Lin, Y.-J. (2010). Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *HortScience*(45), 86.
- Lin, T.-P., Matzarakis, A., & Hwang, R.-L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal confort. *Build enviroment*(45), 213-221.

- Makvart, T., & Castalzer, L. (2003). *Practical Handbooks of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- Matzarakis. (2017). *Rayman Pro: A tool for Applied Climatology*. Freiburg: Research Centre Human Biometeorology.
- Matzarakis, A., & Amelung, B. (2008). Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort on Humans. *Springer Science*, 161 - 172.
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (1996). Another kind of environmental stress. *WHO Newsletter*(18), 7 - 10.
- Matzarakis, A., & Rutz, F. (2017). *Modelling of Mean Radiant Temperature and Thermal Indices*. Freiburg: German Meteorological Service.
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of biometeorology*, 43, 76- 84.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - applications of the Rayman Model. *International J. Meteorol*, 51, 323- 334.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the Rayman model. *International journal of biometeorology*(54), 131-139.
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., & Schindler, D. (2008). Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 241 - 250.
- McDonald & McDonald. (2016). *Habitapp*. Recuperado el 03 de noviembre de 2018, de <http://www.scrufster.com/habitapp>
- Molina, M., Lavayen, J., & Fabara, M. (2015). *Árboles de Guayaquil*. Guayaquil: Universidad de Especialidades Espíritu Santo.
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1 - 24.
- Oke, T. (1987). Boundary layer climates.
- Oke, T. (1995). Boundary layer climates. *Routledge*, 353.
- Osmond, P. (2010). Hemispherical photography as a tool for Urban Sustainability Evaluation and design. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 63 - 74.
- Palme, M., Inostroza, L., Villacreces, G., Lobato, A., & Carrasco, C. (2017). *From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect*. Universidad de Valparaiso - Universidad Católica del Norte - Universidad Autónoma de Chile - Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovable.
- Patrignania, A., & Oschner, T. (2015). *Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover*.

- Puliafito, S., Bochaca, F., & Allende, D. (2013). Mitigación de la isla de calor urbana en ciudades de zonas áridas. *PROYECCIONES - Publicación de investigación y posgrado de la Facultad Regional Buenos Aires*, 11.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., y otros. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*(3), 255 - 265.
- Santamouris, M., Chrysoulakis, N., Grimmond, C., Jusuf, S., Hien, W., Synnefa, A., y otros. (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques* (Vol. 1). Devon, Uk: Routledge.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2016). Street Orientation and Side of the Street Greatly Influence the Microclimatic Benefits Street Trees Can Provide in Summer. *Journal of Enviromental Quality*, 167 - 174.
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*(31), 221 - 235.
- Smiley, T. (2008). Comparison of Methods to Reduce Sidewalk Damage from Tree Roots. *Scientific journal if the International Society of Arbiculture*.
- Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E., & Duarte, D. (2008). Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of Sao Paulo. *SBAU*, 3(2), 1-19.
- Suchocka, M. (2013). Structural soils and other ways of facilitating tree gorwth in the difficult habitat conditions of cities. *Sustainable Development Applications*(4), 39-49.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*(25), 102.
- The Nature Conservancy. (2016). *Planting Healthy Air*. Virginia: The Nature Conservancy.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2006). Measurements of mean radiant temperature in different urban structures. *Sixth international conference on urban climate*. Göteborg.
- Tichý, L. (2015). Field test of canopy cover estimation by hemispherical photographs taken with a smartphone. *Journal of vegetation Science*.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J., & Kiel, J. (2009). Earth's global energy budget. *American Meteorological Society*, 90, 311 - 232.
- Tromp, S. (1980). The impact of the weather and climate on humans and their enviroment (animals and plants). *Biometeorology*, 58.
- UNLP. (2002). Medición de Diámetros, Alturas y Edad del Árbol. *Curso de Biometría Forestal - Guía de clases*.
- Urban, J. (1999). Room to grow. *Treelink*(11), 1-4.
- USDA. (2006). Urban Watershed Forestry Manual. Part 3: Urban Tree Planting.
- Vailshery, L. S., Jaganmohan, M., & Nagendra., H. (2013). Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city. *Urban Forestry and Urban Greening*(12), 408 - 415.

Valko, P. (1966). The sky radiation in its relationship to different parameters. *Archiv für Meteorologie*(14), 336–359.

VDI. (1998). Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for the urban and regional planning at regional level. *Environmental Meteorology*.

Wong, T. W., Good, J., & Denne, M. (1988). Tree root damage to pavements and kerbs in the City of Manchester. *Arboricultural Journal*(12), 7 - 14.