



Revista Luna Azul
ISSN: 1909-2474
revista.lunazul@ucaldas.edu.co
Universidad de Caldas
Colombia

Atenuación de la temperatura y radiación UV de la vegetación en entornos urbanos de ciudades ribereñas y su demanda hídrica

Devia, Carlos; Torres, Andrés

Atenuación de la temperatura y radiación UV de la vegetación en entornos urbanos de ciudades ribereñas y su demanda hídrica

Revista Luna Azul, núm. 49, 2019

Universidad de Caldas, Colombia

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321767977016>

DOI: <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.49.12>

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Investigación original

Atenuación de la temperatura y radiación UV de la vegetación en entornos urbanos de ciudades ribereñas y su demanda hídrica

Attenuation of temperature and UV radiation of vegetation in urban environments of riverside cities and their water demand


Carlos Devia

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

 <https://orcid.org/0000-0002-6316-5844>

Andrés Torres

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

 <https://orcid.org/0000-0001-8693-8611>

Revista Luna Azul, núm. 49, 2019

Universidad de Caldas, Colombia

Recepción: 07 Noviembre 2018

Aprobación: 10 Junio 2019

DOI: <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.49.12>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321767977016>

Resumen: Introducción. Este trabajo de investigación se realizó en la Ciudad de Honda, Colombia. Identificó el efecto de la sombra de los árboles en la atenuación de la temperatura, humedad relativa, temperatura de superficie del suelo, radiación solar y ultravioleta (UV) y determinó requerimientos de agua para la vegetación arbórea.

Metodología. Se tomaron datos de temperatura del aire y de superficie de suelo, humedad relativa del aire, radiaciones solares y UV bajo la sombra de árboles y a plena exposición.

Resultados. Se encontró que la temperatura del aire osciló entre 50°C a plena exposición solar y 41°C bajo sombra. La temperatura de superficie presentó a plena exposición solar valores de 66.8°C y 42.6°C bajo sombra. La variación de la radiación solar registrada ofreció un valor de 17.13 mW/cm² a plena exposición solar y 1.69 mW/cm² bajo sombra. La radiación UV presentó valores de 8 a plena exposición solar y 5 bajo sombra. La demanda hídrica por planta/día varió entre 5 y más de 500 litros, siendo la demanda diaria cercana a 2500 m³.

Conclusiones. En la ciudad no se realiza riego a los árboles, lo que conduce a que se produzca un déficit hídrico evidenciado por la pérdida de follaje ocasionando mínimas atenuaciones a la radiación UV. Las especies más relevantes respecto a la sombra son almendro (*Terminalia cattapa*), Pallandé (*Pitecellobium dulce*), naranjuelo (*Capparis odoratissima*), guayacán carrapo (*Bulnesia carrapo*), chirlobirlo (*Tecoma stands*), cumulá (*Aspidosperma polyneuron*) y mango (*Manguijera indica*). Los árboles pueden generar un buen servicio ecosistémico por la sombra, este servicio está mediado por la selección de la especie y el manejo de que son objeto los árboles.

Palabras clave: arbolado urbano, ciudad, ecología urbana, servicios ecosistémicos.

Abstract: Introduction: This research work was carried out in the city of Honda, Colombia. It identified the effect of tree shade on temperature attenuation, relative humidity, soil surface temperature, solar and ultraviolet (UV) radiation, and determined water requirements for arboreal vegetation.

Methodology: Data on air and soil surface temperature, relative air humidity, solar and UV radiation were taken under the shade of trees and at full exposure.

Results: It was found that the air temperature ranged from 50°C at full sun exposure to 41°C under shade. The surface temperature was 66.8°C and 42.6°C under shade. The variation of the registered solar radiation offered a value of 17.13 mW/cm² at full solar

exposure and 1.69 mW/cm^2 under shade. The UV radiation presented values of 8 at full solar exposure and 5 under shade. The water demand per plant/day varied between 5 and more than 500 liters, being the daily demand close to 2500 m^3 .

Conclusions: There is no irrigation of trees in the city which leads to a water deficit evidenced by the loss of foliage causing minimal attenuations to UV radiation. The most relevant species regarding shade are almond (*Terminalia cattapa*), Pallandé (*Pitecellobium dulce*), orange (*Capparis odoratissima*), guayacán carrapo (*Bulnesia carrapo*), chirlobirlo (*Tecoma stands*), cumula (*Aspidosperma polyneuron*) and mango (*Manguijera indica*). Trees can generate a good ecosystem service by shade which is mediated by the selection of the species and the management of the trees.

Keywords: Ecosystem services, Urban Woodland, Water demand.

Introducción

Las ciudades se constituyen en la máxima expresión de la transformación del medio ambiente. En ellas, la sustitución del entorno natural principalmente por estructuras impermeables y la emisión de agentes sólidos, líquidos y gaseosos de fuente antrópica aumenta dicha modificación que afecta principalmente la temperatura y la dinámica hídrica y genera problemas de contaminación ambiental (Prats, Vicente-Serrano y Sánchez, 2005).

Esta modificación de tipo local en la ciudad se relaciona a su vez de manera directa con el cambio climático, propiciándolo y respondiendo a él, por ejemplo, con la presencia de islas de calor (Prats et al., 2005; Konijnendijk, Nilsson, Randrup y Schipperijn, 2005). Al interior de las ciudades, la vegetación y en especial los árboles juegan un rol importante mitigando las afectaciones climáticas y la contaminación ambiental, a partir de los servicios prestados por estos (Dwyer, McPherson, Schroeder y Rowntree, 1992; De Groot, Wilson & Roelof, 2002; McGranahan et al., 2005; Burden, 2006). Se han publicado varios estudios centrados en los árboles y sus beneficios para el clima urbano. Los estudios de teledetección de la superficie vegetada en general y la vegetación verde urbana, en particular, mostraron una temperatura más fresca que la superficie impermeable de las ciudades (Alavipanah et al., 2015).

La vegetación tiene una capacidad significativa para modificar el microclima urbano (Santamouris et al., 2017; Vieira De Abreu-Harbich et al., 2012; Vieira De Abreu-Harbich, Labaki y Matzarakis, 2015; Zhao, Li y Gao, 2017). Los árboles urbanos ofrecen servicios ambientales como captación de carbono, captura de agentes contaminantes (Nowak et al., 2000, 2007; Escobedo, Kroeger y Wagner, 2011), regulación térmica (Akbari, Pomerantz y Taha, 2002, EPA, 2008, Oke, 1978, 1989, 1995), regulación hídrica (Crackford & Richardson, 2000; FISRWG, 2001; Brezonik & Stadelmann 2002; Asadian & Weiler, 2009), protección contra la radiación ultravioleta (UV) (Grant, Heisler y Goa, 2002; Heisler & Grant, 2002, Cancer Council New South Wales, 2008, Geis et al., 2007) y aumento de la biodiversidad (Konijnendijk et al., 2005). Muchos de estos servicios tienen implicaciones directas e indirectas sobre la salud humana (Randrup et al., 2005; Andersson et al., 2007) y han sido medidos y cuantificados económicamente a partir de diversos métodos y técnicas,

y catalogados como beneficios a la ciudad (McPherson, 2003; Peper et al., 2009), propiciando un mayor interés por la siembra y manejo acorde de estos. Entre los procedimientos utilizados para la cuantificación se encuentran, por ejemplo, los programas basados en GIS como UFORE, CITYgreen y i-Tree, así como propuestas matemáticas diversas.

Los servicios ambientales ofrecidos por los árboles están determinados por: (i) características morfológicas como tamaño y forma del árbol, tamaño y diámetro de la copa, tipo de hoja, relación entre área de las hojas y área de la copa (índice de área de hoja – LAI –) y estado de crecimiento (edad); (ii) características fisiológicas como tipo de metabolismo, tasas de absorción y captura de carbono, demanda de agua y movimientos násticos; (iii) características silviculturales como el manejo de que son objeto (Barceló-Coll, Rodrigo, Sabater y Sánchez, 1987; Pallardy, 2007) y (iv) las condiciones del entorno en que se establecen (McPherson, 2003; Calaza & Iglesias, 2012). Por otro lado, el arbolado demanda el uso de recursos económicos para su existencia en la ciudad, estos son de dos tipos: (i) de establecimiento, mantenimiento o reposición y (ii) para la reparación de los daños ocasionados a la ciudad (McPherson, 2003; Calaza & Iglesias, 2012). De lo anterior, se señala la importancia de la cuantificación de los servicios del arbolado de la ciudad los cuales incluyen determinantes de la sombra ofrecida y los beneficios derivados de esta, asimismo, la importancia en la determinación de los costos asociados al establecimiento y manejo del arbolado en la búsqueda de relaciones beneficio/costo que favorezcan bajo esta perspectiva la incorporación de árboles en la ciudad que mejoren las condiciones de habitabilidad.

Las ciudades, como paisajes altamente antrópicos, ofrecen una serie de condicionantes a la presencia de los árboles, relacionados estos con la modificación de las características físicas y químicas del suelo, de la temperatura del ambiente y de la superficie del suelo, de la infiltración del agua de lluvia, de la calidad del aire y del espacio físico para el crecimiento tanto para la parte aérea como para las raíces (Urban Horticulture Institute, 2003). De manera particular, se señala el efecto de isla de calor que ofrece condiciones extremas de temperaturas muy bajas en la noche y muy altas al medio día (Prats et al., 2005) y la disminución en la oferta de agua por infiltración (aumento de la escorrentía) asociada a los niveles de impermeabilidad de la superficie del suelo (Urban Horticulture Institute, 2003).

Dichas condiciones limitan, en general, el establecimiento y crecimiento de los árboles, lo cual incide directamente en los servicios de estos, siendo necesario desarrollar estrategias específicas para garantizar que los árboles crezcan adecuadamente (Urban Horticulture Institute, 2003). Complementariamente a los condicionantes de orden biofísico, están los de orden cultural que también afectan negativamente al establecimiento de los árboles, como pueden ser la agresión directa e indirecta por parte de las personas a los árboles que ocasiona el deterioro y la muerte de estos. Igualmente, en este caso es necesario desarrollar estrategias de mitigación y control de esta situación para favorecer el

adecuado crecimiento de los árboles y la prestación óptima de sus servicios (Urban Horticulture Institute, 2003, McPherson, 2003).

El estado formológico y fisiológico de la vegetación responde de manera directa a la oferta de agua, presentando mayor follaje y presencia de hojas en la medida en que se satisfacen los requerimientos hídricos, por el contrario, las tasas de crecimiento y la presencia de follaje es disminuido en la medida en que se presenta déficit hídrico (Salisbury & Ross, 1994; Barceló-Coll et al., 1987; Pallardy, 2007).

Cuando las plantas están expuestas a condiciones de calor pueden reducir la cantidad de radiación aceptada a través de la reflexión y el movimiento; a su vez, pueden disipar el calor excesivo a través de la emisión de radiación, convección de calor y transpiración. Sin embargo, la contribución relativa de cada uno de estos procesos difiere mucho entre las diferentes especies de plantas (Lin et al., 2017).

Como se identificó en referencias internacionales, resulta fundamental comprender la relación agua-vegetación-río (Dudgeon et al., 2006) en la búsqueda de mejorar las condiciones de vida en entornos urbanos. La investigación tiene como objetivo identificar el efecto de la sombra en la atenuación de variables climáticas como temperatura, humedad relativa y temperatura de superficie del suelo y radiación solar y UV; asimismo, establecer unos estimados de requerimientos de agua para la vegetación arbórea.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló a partir de revisión de fuentes primarias y secundarias, y abordó dos aspectos: i) la toma de datos de variables ambientales bajo la sombra de árboles en la ciudad de Honda y a plena exposición y ii) la estimación de requerimientos de agua por los árboles.

En el primer aspecto, las variables tomadas correspondieron a temperatura del aire, temperatura de superficie de suelo, humedad relativa del aire, radiación solar y radiación UV. Los registros se tomaron para la ciudad de Honda, localizada a 210 msnm con una temperatura media de 32°C, precipitación de tipo bimodal (marzo-mayo y septiembre-noviembre) entre 950 y 1.200 mm anuales.

Los registros se realizaron al medio día para todos los individuos realizando cuatro tomas de datos para cada uno de ellos. Para la medición de las variables de temperatura y radiación solar bajo la sombra de los árboles y en condiciones de plena exposición solar se tomaron registros a las 12:00 m durante cuatro días. Los equipos utilizados incluyeron medidor de radiación UV PCE-UV34; termómetros de infrarrojo Fluke 62 MAX+, y medidor de humedad relativa y temperatura Fluke 971. Como se tuvieron dos condiciones de registro de información (en la superficie de suelo y en el aire), se procedió de la siguiente manera:

- a) Para las mediciones en aire se ubicaron los sensores a 1.3 metros de altura registrando valores de respuesta por minuto: i) la temperatura del aire a la sombra (°C), (ii) radiación UV a la

sombra (mW/cm^2), (iii) temperatura de aire a plena exposición solar (utilizando el protector solar correspondiente) ($^{\circ}\text{C}$), (iv) radiación UV a plena exposición solar (mW/cm^2).

- b) Para medir la temperatura en las superficies de suelo, tanto a la sombra como a plena exposición solar, se utilizó un medidor térmico laser, registrando cada hora el valor máximo de temperatura alcanzada por la superficie: (i) temperatura de superficies del suelo a la sombra ($^{\circ}\text{C}$) y (ii) temperatura de superficies del suelo a plena exposición solar ($^{\circ}\text{C}$).

El segundo aspecto correspondió a la definición de requerimientos de agua por parte del arbolado, para lo cual se trabajó la metodología de la estimación por ecosistema de origen de la especie. Esta metodología permite determinar el requerimiento hídrico en función del área de la copa del árbol y de la precipitación media anual que se presenta en el lugar de origen de la especie correspondiente al árbol evaluado, y está basada en la aproximación básica de requerimientos de riego definida por la FAO (Doorenbos, 1977).

La estimación de demanda hídrica para los árboles se basó en la oferta que el entorno natural les ofrece, asociado al déficit que se puede presentar por efectos de sequía y por la condición de impermeabilización de las superficies urbanas. En este sentido, la demanda hídrica varía en función de la especie y el ecosistema del que es originario, así como del tamaño, con especial referencia al diámetro de la copa. Esta se estimó utilizando la ecuación (1):

$$v = \frac{\pi r^2 * pma * k * i}{365 * 1000} \quad (1)$$

Donde:

V: volumen estimado de requerimiento diario (litros)

R: radio de la copa del árbol (m)

PMA: precipitación anual del ecosistema de referencia (m)

K: factor de ajuste por impermeabilización del suelo, estimado para este estudio en 1.5, correspondiente a la disminución del área permeable bajo la copa del árbol (sin unidades). En general 1/3 parte de la superficie bajo la copa está cubierta por superficie impermeable.

I: factor de infiltración en el suelo, estimado para este estudio en 1, basado en las características físicas del suelo que permiten mantener valores típicos de infiltración (sin unidades). El valor de 1 corresponde a suelos franco-arenosos (Doorenbos, 1977).

Se tomaron registros de 17 especies diferentes y un total de 110 árboles, en la tabla 1 se presentan las especies arbóreas evaluadas y las condiciones ecosistémicas correspondientes a sus requerimientos hídricos.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	#	RH	NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	#	RH
Anon	<i>Annona squamulosa</i>	7	1000	Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i>	7	1000
Achiote	<i>Bixa orellana</i>	7	1250	Mirto	<i>Murraya paniculata</i>	7	1500
Almendro	<i>Terminalia catappa</i>	7	1500	Muñeco	<i>Cordia sp.</i>	7	1250
Carbonero	<i>Calliandra sp.</i>	7	1500	Naranjuelo	<i>Capparis odoratissima</i>	7	750
Chirlobirlo	<i>Tecoma stands</i>	7	1000	Nim	<i>Azadirachta indica</i>	7	1000
Cumulá	<i>Aspidosperma polyneurum</i>	6	1000	Payandé	<i>Phitecellobium dulce</i>	7	750
Guayabo	<i>Psidium guajava</i>	7	1250	Pepa de cabro	<i>Tevetia peruviana</i>	7	750
Guayacán carrapo	<i>Bulnesia carrapo</i>	6	1000	Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	7	1000
Mango	<i>Mangifera indica</i>	7	1000				

Tabla 1

Especies arbóreas evaluadas (#: número de individuos de la especie indicada).

RH: Requerimiento Hídrico (valores en milímetros de precipitación anual)

La información colectada se analizó a partir de correlaciones con el uso de bisectrices y análisis pareados de Wilcoxon que permiten evaluar y comparar la mediana de dos muestras relacionadas y determinar si existen diferencias entre ellas. Se utiliza como alternativa a la prueba t de Student cuando no se puede suponer la normalidad (Wilcoxon, 1945). Los correspondientes diagramas de caja que se utilizan para variables de tipo numérico basado en el concepto de percentiles, consisten en cajas centrales con una línea horizontal dentro de ellas, dos líneas verticales que salen de los extremos superior e inferior de las cajas y líneas horizontales que rematan estas líneas verticales, así como puntos por fuera de estas últimas líneas correspondientes a outliers o datos atípicos. Para los análisis estadísticos y las salidas gráficas se utilizó el programa R Core Team (2018) ¹.

Resultados

Valores absolutos de atenuación de las variables analizadas por el efecto de la sombra

Se realizaron gráficas de relación de los valores de atenuación encontrados para las variables estudiadas: temperatura de aire, humedad relativa, radiación solar, radiación UV y temperatura del suelo, encontrando las mayores y menores variaciones para cada una de estas. En cada gráfica se incluyen bisectrices para determinar los efectos en términos de las relaciones de valores al sol y bajo sombra. La escala vertical corresponde a

los valores a plena exposición solar y la horizontal a condición de sombra. A continuación se señala lo encontrado para cada caso:

La variación de la temperatura del aire encontrada a plena exposición con respecto a condiciones bajo sombra de los árboles fue de casi 9 grados, con registros a plena exposición solar de 50°C y bajo sombra de 41°C; para los valores más bajos de temperatura a pleno sol, con registros de 30.7°C, el valor bajo sombra corresponde a 29.9°C (ver figura 1). En esta figura se evidencia el efecto puntual de la sombra con respecto a la plena exposición solar, asociado a la presencia de hojas de los árboles.

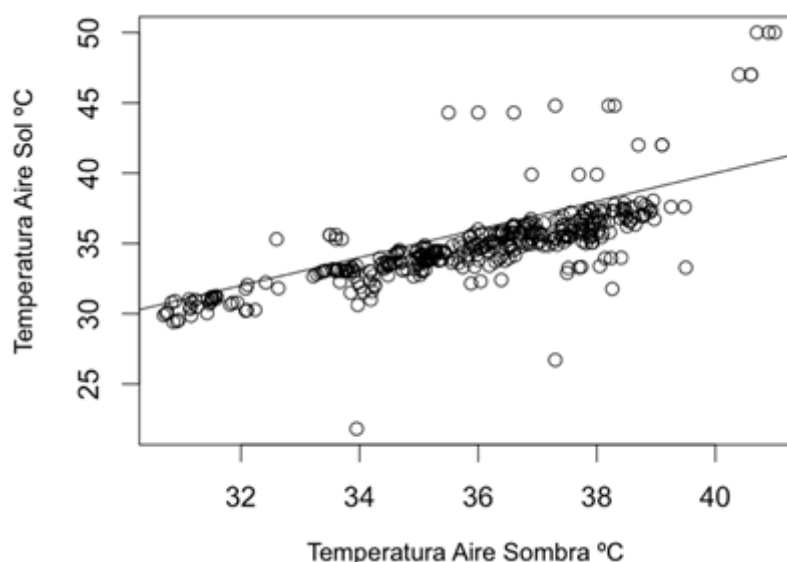


Figura 1

Relación de la temperatura del aire en condiciones de sombra y de plena exposición solar.

La figura 2 muestra la variación de la humedad relativa del aire encontrada a plena exposición; se encontró una variación de casi 5 %, con registros a plena exposición solar de 62 % y bajo sombra de 57 %. Para los valores más bajos de humedad relativa a pleno sol, con registros de 17 %, el valor bajo sombra corresponde a 18 %, siendo mayor la humedad bajo los árboles que a plena exposición solar. De manera similar a lo sucedido con la temperatura del aire, la variación de la humedad relativa está directamente relacionada con la presencia de sombra efectiva, que hace que para los diferentes árboles presente altísimos rangos entre máximos y mínimos.

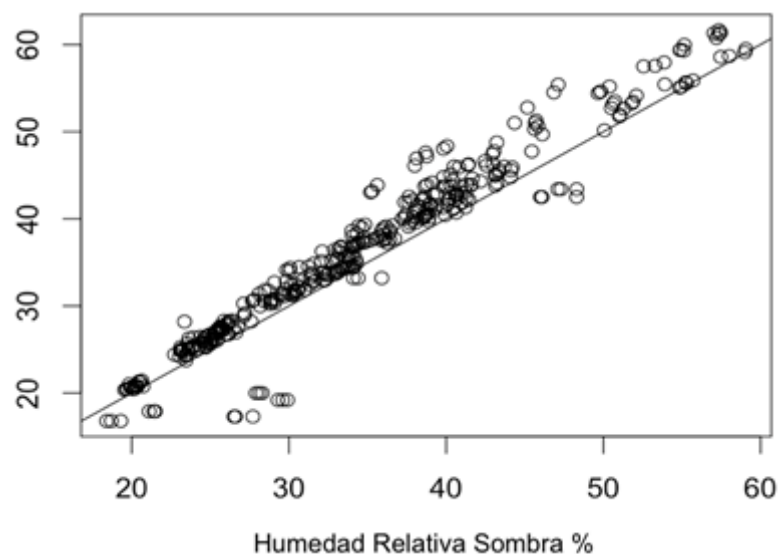


Figura 2

Relación de la humedad relativa en condiciones de sombra y de plena exposición solar.

La variación de la temperatura de superficie encontrada a plena exposición con respecto a condiciones bajo sombra de los árboles fue de casi 27°C, con registros a plena exposición solar de 66.8°C y bajo sombra de 42.6°C. Como es de esperarse, la variación de las temperaturas de superficie evidencia las mayores diferencias (ver figura 3).

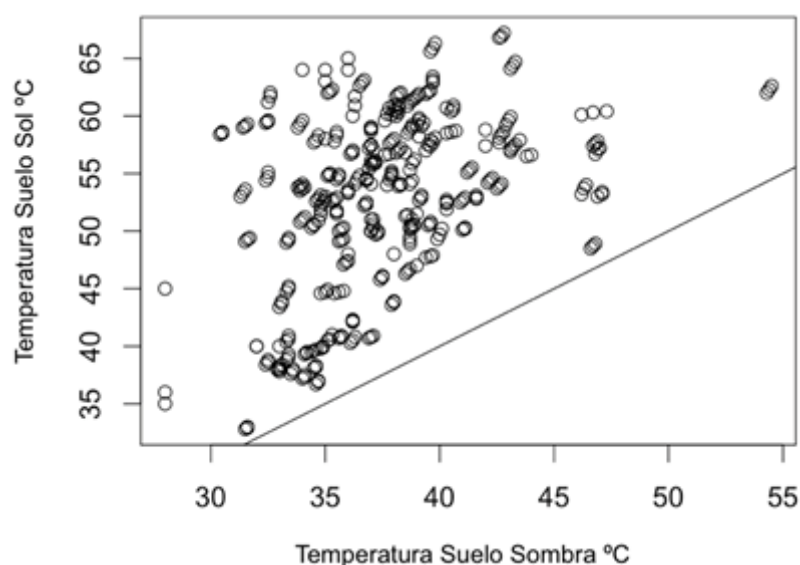


Figura 3

Relación de la temperatura de superficie en condiciones de sombra y de plena exposición solar.

La variación de la radiación solar registrada a plena exposición con respecto a condiciones bajo sombra de los árboles fue de casi 15 mW/cm², con registros a plena exposición solar de 17.13 mW/cm² y bajo sombra de 1.69 mW/cm². Esta variación evidencia específicamente el efecto de la sombra y las características de esta con respecto a la atenuación que pueden ofrecer (ver figura 4).

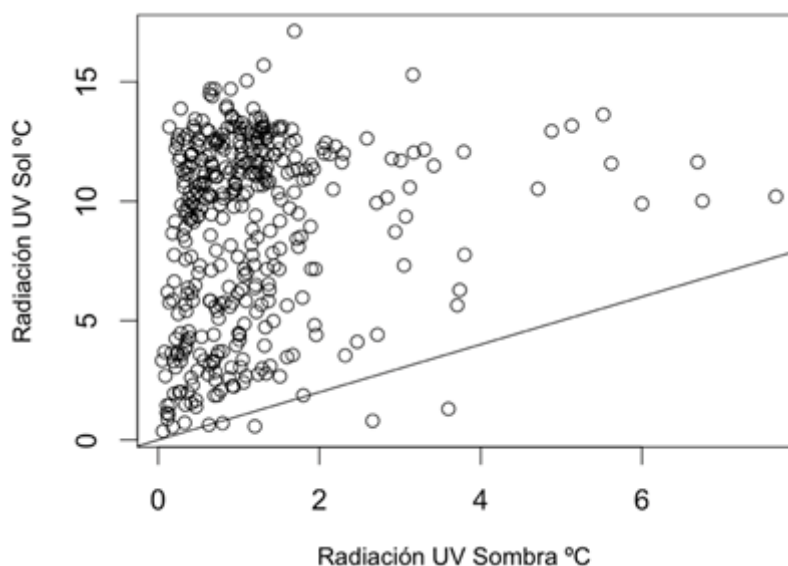


Figura 4

Relación de la radiación solar en condiciones de sombra y de plena exposición solar.

Finalmente, la radiación UV registrada a plena exposición con respecto a condiciones bajo sombra de los árboles fue de casi 3, con registros a plena exposición solar de 8 y bajo sombra de 5 para los valores más bajos de humedad relativa a pleno sol, con registros de 3 el valor bajo sombra corresponde a 2 con una reducción de un poco más de un grado de temperatura; sin embargo, en algunos casos no se presentaron atenuaciones en radiación UV (ver figura 5). La ausencia de la atenuación se debe a la baja efectividad de la cobertura ofrecida por los árboles.

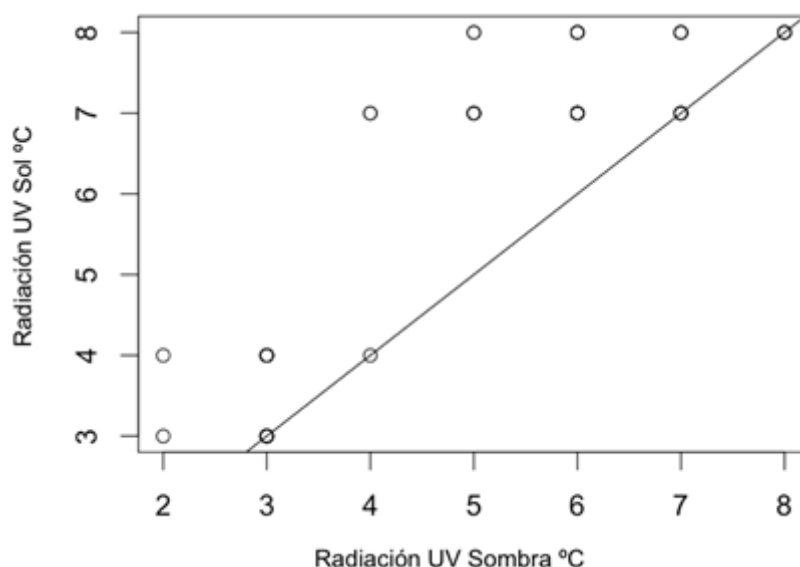


Figura 5

Relación de atenuación de la radiación UV en condiciones de sombra y de plena exposición solar.

Las observaciones sobre la bisectriz (temperatura de superficie de suelo y radiación UV) están directamente relacionadas con la sombra proyectada por el árbol: a mayor densidad de sombra, mayor atenuación. Las variables distribuidas a ambos lados de la bisectriz (Temperatura del

aire, Humedad relativa del aire, Radiación solar) responden tanto al efecto de la sombra como del entorno. En este sentido, la temperatura del aire hace referencia, por ejemplo, a los efectos de la radiación de la temperatura del entorno, al igual que la humedad relativa del aire. Un aspecto a señalar es que estas variables dependen de la sombra de los árboles para el caso de la temperatura del aire: para valores de temperatura a plena exposición solar por encima de 40°C los valores bajo sombra son menores, evidenciando el efecto de la atenuación térmica por parte de los árboles (ver figura 1). Para el caso de la humedad relativa, los mayores valores de atenuación se encuentran por encima de 30 %, para valores menores de humedad relativa, a plena exposición solar, los valores bajo sombra son menores evidenciando un efecto positivo en el confort climático (un poco más húmedo bajo los árboles).

Valores relativos de atenuación de las variables analizadas por el efecto de la sombra

Se realizaron análisis de similitud y diferencias respecto a los valores de atenuación encontrados para las variables estudiadas: temperatura de aire, humedad relativa, radiación solar, radiación UV y temperatura del suelo. Para cada una de estas variables se realizaron análisis pareados de Wilcoxon y los correspondientes diagramas de caja.

Se encontró que la atenuación de temperatura del aire con respecto al efecto de la sombra varía en rangos de entre 8.5°C y 0°C, y que las especies que mayor atenuación ofrecieron fueron el almendro (*Terminalia catappa*), el mango (*Manguijera indica*) y el nim (*Azadirachta indica*), seguidos del roble (*Tabebuia rosea*), el muñeco (*Cordia lanatta*) y el mirto (*Murraya paniculata*). Sin embargo, es necesario señalar que estos mismos árboles también presentan valores de atenuación térmica muy baja, cercanos a entre 1°C y 3°C. Con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre los diferentes árboles, se realizó la prueba de Wilcoxon. Se encontró que las especies con valores de atenuación significativamente menores ($p\text{-value} < 0.05$) fueron: chirlobirlo (*Tecoma stands*), guayacán carrapo (*Bulnesia carrapo*), mango (*Manguijera indica*), matarratón, naranjuelo (*Capparis odoratissima*), roble (*Tabebuia rosea*), nim (*Azadirachta indica*) y pepa de cabro (*Tevetia peruviana*), lo cual contrasta en algunos casos con los máximos valores de atenuación presentados por estos individuos (figura 6).

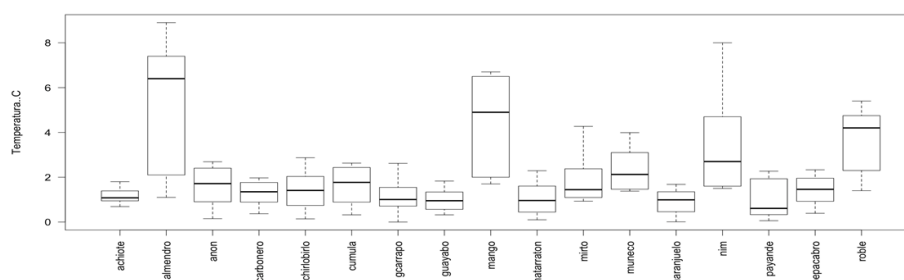


Figura 6

Atenuación de temperatura de aire.

La atenuación de temperatura del aire con respecto al efecto de la sombra varió en entre 10 °C y 0 °C, y las especies que mayor atenuación ofrecieron fueron el almendro (*Terminalia catappa*), el mango (*Manguifera indica*), el muñeco (*Cordia lanatta*), el naranjuelo (*Capparis odoratissima*) y el mirto (*Murraya paniculata*), seguidos del matarratón, el pepa de cabro y el chirlobirlo. Sin embargo, al aplicar la prueba de Wilcoxon no se hallaron diferencias significativas entre las especies (figura 7).

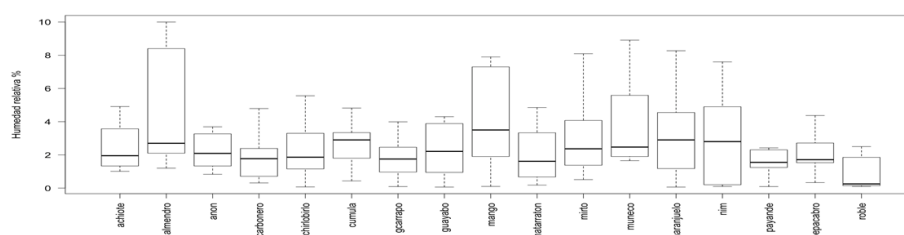


Figura 7

Atenuación de humedad relativa.

La disminución de la temperatura de superficie con respecto al efecto de la sombra varió entre 2°C y 30°C, y las especies que mayor atenuación ofrecieron fueron el almendro (*Terminalia catappa*), el carbonero, el chirlobirlo (*Tecoma stads*) y el mango (*Manguifera indica*) y, en último lugar, el roble (*Tabebuia rosea*). Sin embargo, es necesario señalar que estos mismos árboles también presentan valores muy bajos de atenuación de radiación solar, cercanos a 5°C. Según la prueba pareada de Wilcoxon, se encontró que el mirto (*Murraya paniculata*), el roble (*Tabebuia rosea*) y el cumula (*Aspidosperma polyneurum*) presentan valores de atenuación de temperatura significativamente menores ($p\text{-value} < 0.05$) que las otras especies (figura 8).

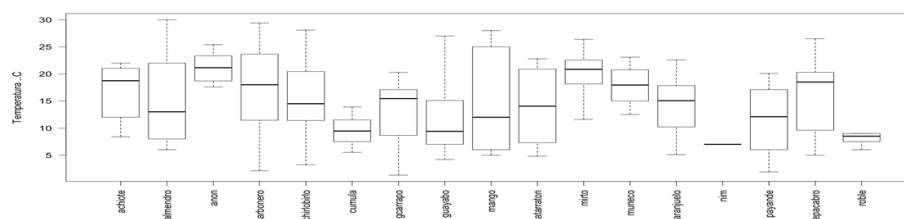


Figura 8

Atenuación de Temperatura del Suelo.

La modificación de la radiación solar con respecto al efecto de la sombra varió entre 15.5 mW/cm² y 0 mW/cm², y las especies que mayor atenuación ofrecieron fueron el chirlobirlo (*Tecoma stands*), el guayacán carrapo (*Bulnesia carrapo*) y el matarratón (*Glirisdia sepium*), seguidos del nim (*Azadirachta indica*), del pepa de cabro (*Thevetia peruviana*) y del naranjuelo (*Capparis odoratissima*). Sin embargo, es necesario señalar que estos mismos árboles también presentan valores muy bajos de atenuación de la radiación solar, cercanos a 0 w/m². Al aplicar la prueba de Wilcoxon se encontró que el cumulá (*Aspidosperma polyneurom*), el guayacán carrapo (*Bulnesia carrapo*), el guayabo (*Psidium guajaba*), el naranjuelo (*Capparis odoratissima*) y el roble (*Tabebuia rosea*) presentan valores de atenuación de la radiación solar significativamente inferiores al resto de las especies evaluadas (p-value<0.05), lo cual contrasta en algunos casos con los máximos valores de atenuación presentados por estos individuos (figura 9).

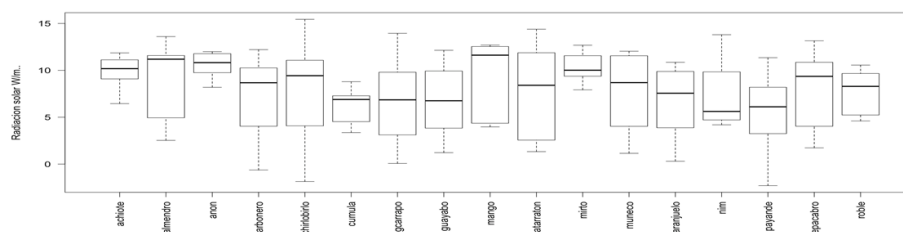


Figura 9
Atenuación de Radiación Solar.

Se observó que la atenuación de la radiación UV con respecto al efecto de la sombra varió entre 1 y 8 (índice de radiación UV), y las especies que mayor atenuación ofrecieron fueron el almendro y el mango (*Manguifera indica*), seguidos del nim y el chirlobirlo y, en último lugar el roble (*Tabebuia rosea*). Sin embargo, es necesario señalar que estos mismos árboles también presentan valores muy bajos de atenuación de la radiación solar, cercanos a 1 (Índice de Radiación Ultra Violeta). La prueba de Wilcoxon arrojó que el roble presenta una atenuación de la radiación UV significativamente inferior al resto de las especies evaluadas (p-value < 0.05) (figura 10).

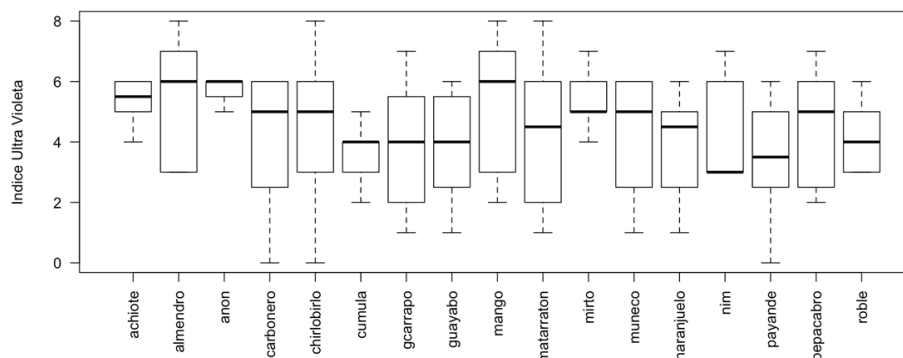


Figura 10
Atenuación de Radiación Ultra Violeta.

Demandas hídricas

Se estimaron valores de demanda hídrica por planta por día de entre 5 litros y más de 500 litros (eje vertical), para lo cual se identifica que para una ciudad de unos 5000 árboles la demanda diaria estimada puede estar por el orden de 2500 m³ (figura 11). Al respecto es importante señalar que prácticamente bajo ninguna circunstancia se efectúan riegos en la ciudad conduciendo a déficit hídrico a los árboles, lo cual se evidencia en la pérdida de follaje por parte de ellos que redunda en mínimas atenuaciones a la radiación UV. La relación de los árboles en términos de requerimiento de precipitación anual se muestra en la tabla 1.

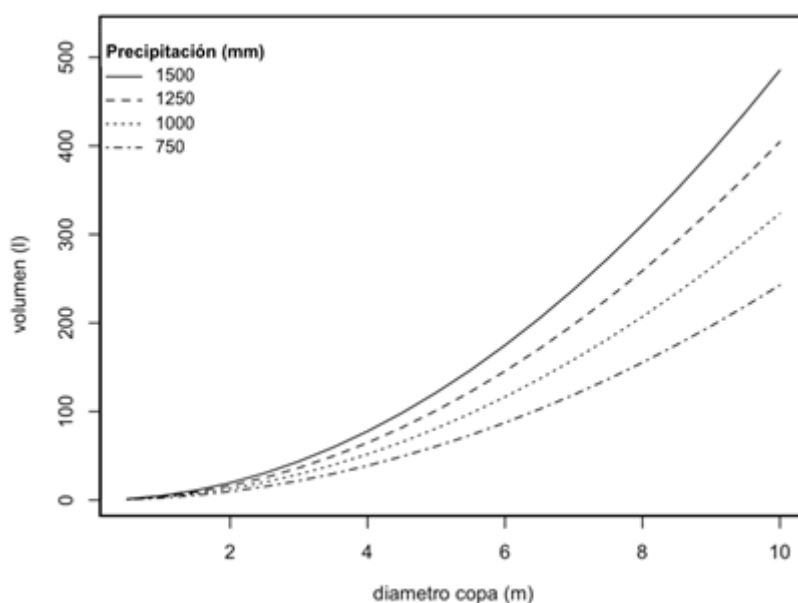


Figura 11

Curvas de requerimiento de agua, en litros diarios en función del diámetro de la copa del árbol.

Discusión de resultados

Valores absolutos de atenuación de las variables analizadas por el efecto de la sombra

La variabilidad total de la temperatura bajo los árboles y a plena exposición solar presentó valores apreciables cercanos a 9°C, lo cual evidencia muy claramente el efecto de la sombra en la atenuación térmica. Tanto los valores cercanos y correspondientes a 0°, es decir ninguna atenuación, y 9°, es decir máxima atenuación responden al efecto de la sombra de los árboles que a su vez responde a condiciones fisiológicas y fenológicas de los árboles. Estos valores de variación corresponden a unos identificados previamente para la ciudad de Santa Marta (Devia & Torres, 2012). Lo cual ha sido corroborado en diversos estudios en donde se evidencia que la vegetación tiene una capacidad significativa para modificar el microclima urbano (Santamouris et al., 2017; Vieira De Abreu-Harbach et al., 2012, 2015; Zhao et al., 2017).

De manera similar a lo sucedido con la temperatura del aire, la variación de la humedad relativa está directamente relacionada con la presencia de sombra efectiva, que hace que para los diferentes árboles presente altísimos rangos entre máximos y mínimos.

La variabilidad en la disminución de la temperatura difiere entre las especies través de la reflexión y el movimiento de sus hojas, relacionado con la emisión de radiación, convección de calor y transpiración (Lin et al., 2017), los cuales están asociados a la mayor presencia de follaje y oferta de sombra.

Respecto a la variación de la humedad relativa, los mayores valores de variación, es decir la mayor presencia de vapor de agua, se da bajo condiciones de sombra de los árboles, correspondiendo muy claramente al efecto de la transpiración de las plantas.

Los mayores valores de temperatura de superficie en condiciones de ausencia de sombra de los árboles respecto a la temperatura de superficie bajo la sombra de los árboles evidencia claramente el efecto de la sombra y, particularmente, la interceptación de los rayos solares por parte del follaje. Como es de esperarse, la variación de las temperaturas de superficie evidencian las mayores diferencias

Finalmente, tanto la variación de la radiación solar y de radiación UV bajo sombra y a plena exposición reflejan el efecto de atenuación de la presencia de hojas en los árboles y en particular del estado de marchitez de los árboles, muy consecuentemente con la relación causa efecto de la radiación solar y la radiación UV y su impacto sobre superficies construidas en la ciudad. La ausencia de la atenuación se debe a la baja efectividad de la cobertura ofrecida por los árboles.

En este sentido, la temperatura del aire hace referencia por ejemplo a los efectos de la radiación de la temperatura del entorno, al igual que la humedad relativa del aire. Un aspecto a señalar es que estas variables dependen de la sombra de los árboles para el caso de la temperatura del aire: para valores de temperatura a plena exposición solar por encima de 40°C los valores bajo sombra son menores evidenciando el efecto de la atenuación térmica por parte de los árboles. Para el caso de la humedad relativa, los mayores valores de atenuación se encuentran por encima de 30 %, para valores menores de humedad relativa, a plena exposición solar, los valores bajo sombra son menores evidenciando un efecto positivo en el confort climático (un poco más húmedo bajo los árboles).

En este sentido, si bien los árboles por naturaleza “dan sombra”, esta sombra varía desde mínima interceptación de radiación UV hasta condiciones de interceptación total de dicha radiación. Igualmente, es probable que durante algunos momentos del día o del año, dicha interceptación no se de porque el árbol no tiene hojas o porque éstas se han “plegado” permitiendo el paso de la totalidad de los rayos solares a través de ellas (Salisbury & Ross, 1994; Barcello-Coll et al., 1987; Pallardy 2007).

Valores relativos de atenuación de las variables analizadas por el efecto de la sombra

La variabilidad en la atenuación relativa de árboles para una misma especie está directamente relacionada con las condiciones morfológicas y fisiológicas que condicionan la característica de la sombra que proyectan. En particular el déficit hídrico determina muy claramente la atenuación efectiva de la sombra, pues una respuesta de las plantas al déficit de agua es perder las hojas y si los árboles no tienen hojas no ofrecen sombra. Este efecto se presenta para la totalidad de las variables estudiadas (temperatura de aire, humedad relativa del aire, temperatura del suelo, radiación solar y radiación ultra violeta). De manera particular, en términos fisiológicos los valores relativos de atenuación se modifican por la respuesta de los árboles a déficit hídrico (Salisbury & Ross, 1994; Barcello-Coll et al., 1987; Pallardy, 2007).

Demanda hídrica

Los valores encontrados sobre requerimientos de agua por parte de los árboles y la evidente ausencia de riego determina de manera directa la variabilidad en las atenuaciones presentadas en la temperatura de aire, humedad relativa del aire, temperatura del suelo, radiación solar y radiación UV. Los valores crecientes de demanda hídrica están relacionados con el tamaño de la copa de los árboles y la relación entre oferta de agua y tamaño de la copa funciona perfectamente en las dos direcciones: a mayor satisfacción de requerimiento de agua mayor tamaño final y por consiguiente mayor demanda de agua y ante el déficit del agua menor tamaño de copa del árbol y menor requerimiento hídrico.

Conclusiones y recomendaciones

En definitiva, la sombra ejerce un efecto en la variación de los valores de temperatura del aire, humedad relativa, temperatura de superficie de suelo y radiaciones solar y UV, por lo tanto a mayor sombra mayores atenuaciones.

Fue posible identificar árboles que presentan mayores atenuaciones, atenuaciones intermedias y atenuaciones bajas; sin embargo, también se evidenció qué condiciones asociadas principalmente a la sequía influyen en los valores finales reportados. Entre los más relevantes en sombra se tiene el almendro (*Terminalia cattapa*), Pallandé (*Pitecellobium dulce*), naranjuelo (*Capparis odoratissima*), guayacán carrapo (*Bulnesia carrapo*), chirlobirlo (*Tecoma stands*) y mango (*Mangifera indica*). Asimismo, los que presentan más variabilidad en la atenuación corresponden a roble (*Tabebuia rosea*), muñeco (*Cordia lannata*), carbonero (*Cassia carbonaria*) y chirlobirlo (*Tecoma stands*).

Se encontró que los valores de humedad relativa aumentan de plena exposición solar a condiciones bajo sombra, lo cual contribuye

efectivamente a mejorar las condiciones de confort de las ciudades. Es importante señalar que las variaciones encontradas en los servicios de atenuación de los árboles en algunos casos es muy alta, lo cual está asociado, principalmente, al déficit hídrico de los individuos; es decir que si bien el árbol puede ofrecer una atenuación alta de temperatura o radiación solar, los valores disminuyen sustancialmente por lo que ocasiona la pérdida de hojas por sequía (por ejemplo valores entre 0 y 15 de atenuación en radiación UV, para chirlobirlo (*Tecoma stands*). Se señala particularmente esta especie pues corresponde a una que no tiene caducifolia natural y la pérdida de hojas se debe a la ausencia de agua. Respecto a los cálculos de demanda de agua por la vegetación de la ciudad se encontró que estos son significativamente altos, lo cual es determinante cuando se piensa en el suministro de agua para la vegetación más aun cuando se busca de ella beneficios ecosistémicos asociados principalmente a la sombra.

Agradecimientos

A COREDUCACIÓN por el apoyo ofrecido durante el levantamiento de la información en campo.

Referencias

- Akbari, H., Pomerantz, M. y Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310.
- Alavipanah, S., Wegmann, M., Qureshi, S., Weng, Q. y Koellner, T. (2015). The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: A case study of Munich, Germany during the warm season. *Sustainability* (Switzerland), 7(4), 4689-4706.
- Andersson, E., Barthel, S. y Ahrné, K. (2007). Measuring Social-Ecological Dynamics Behind the Generation of Ecosystem Services. *Ecologic Applications*, 17, 1267-1278.
- Asadian, Y. & Weiler M. (2009). A New Approach in Measuring Rainfall Interception by Urban Trees in Coastal British Columbia. *Water Qual. Res. J. Can.*, 44(1), 16-25.
- Barceló-Coll, J. G., Rodrigo, G. N., Sabater, B. & Sánchez, R. (1987). *Fisiología Vegetal*. Madrid, España: Ediciones Pirámides S. A.
- Brezonik, P. L. y Stadelmann, T. H. (2002). Analysis and predictive models of storm water runoff volumes, load, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin cities Metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Res.*, 36(7), 1743-1757.
- Burden, D. (2006). *Urban Street Trees. 22 Benefits Specific Applications*. Recovered from http://www.walkable.org/download/22_benefits.pdf.
- Calaza, P. e Iglesias, M. (2012). *Evaluación de riesgo de arbolado peligroso. Principios, indicadores y métodos*. Madrid, España: Editoria Asoc. Española de Arboricultura.

- Cancer Council New South Wales. (2008). *The Shade Handbook*. Recovered from <https://www.centresupport.com.au/wp-content/uploads/2012/10/Shade-handbook.pdf>.
- Crackford, R. H. & Richarson, D. P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interceptin: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17), 2903-2920.
- De Groot, R. S., Wilson, M. & Roelof, M.J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, 393-408.
- Devia, C. y Torres, A. (2012). Thermic Attenuation on Concrete Sidewalk under Urban Trees. Case Study: Santa Marta-Colombia. *SEEFOR (South-East European Forestry)*, 3(2), 79-85.
- Dwyer, J., McPherson, E., Schroeder, H. y Rowntree, R. (1992). Assessing The Benefits And Costs of the Urban Forest. *Journal of Arboriculture*, 18(5).
- Dudgeon, D., Arthington, A., Gessner, M., Kawabata, Z., Knowler, D., Lévêque, C. y Sullivan, C. (2006). Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81(2), 163-182. DOI: 10.1017/S1464793105006950.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome, Italy: FAO.
- EPA. (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics*. Recovered from <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm>.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T. y Wagner, J. E. (2011). *Urban forest and pollution mitigation: Analyzing ecosystem service and disservices*. Recovered from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21316130>.
- FISRWG. (2001). *Stream corridor restoration. Principles, processes and practices*. EEUU: The Federal Interagency Stream Restoration Working Group.
- Geis, P., Lawry, D., Gardner, J., Hook, T., Cockerrell, S. & Henderson, S. (2007). Assessment of the uvr protection provide by different tree species. *Photochemistry and Photobiology*, 83(6), 1465-1470.
- Grant, R. H., Heisler, G. M. y Goa, W. (2002). Estimation of pedestrian level UV exposure under trees. *Photochemistry and Photobiology*, 75(4), 369-376.
- Heisler, G. M. y Grant, R. H. (2002). Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health. *Urban Ecosyst*, 4(3), 193-229.
- Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T.B. y Schipperijn, J. (2005). Benefits and uses of urban forests and trees. In C. C. Konijnendijk., K. Nilsson., T. B. Randrup. y J. Schipperjin. (Eds.), *Urban Forests and Trees*. (pp. 81-114). Berlin: Springer-Verlag.
- Lin, H., Chen, Y., Zhang, H., Fu, P. y Fan, Z. (2017). Stronger cooling effects of transpiration and leaf physical traits of plants from a hot dry habitat than from a hot wet habitat. *Functional Ecology, British Ecological Society*, 31(12), 2202-2211.
- McGranahan, P., Marcotullio, X., Bai, T., Braga, I., Douglar, T., Elmqvist, W., et al. (2005). Urban Systems. Millennium Ecosystem Assessment. In *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends* (pp. 795-825). Washington: Island Press.

- McPherson, E. (2003). A benefit-cost analysis of ten street tree species in Modesto, California, U.S. *Journal of Arboriculture*, 29(1), 1-8.
- Nowak, D., Crane, D., Stevens, J. e Ibarra, M. (2000). *Brooklyn's urban forest*. Recovered from https://www.fs.fed.us/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/2002/gtrne290.pdf.
- Nowak, D. J., Hoehn, R. E. I. I., Crane, D.E., Stevens, J. C. y Walton, J. T. (2007). *Assessing urban forest effects and values: Philadelphia's urban forest*. Recovered from <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/19659>.
- Oke, T. R. (1978). *Boundary layer climates*. London: William Clowes and Sons.
- Oke, T. R. (1989). The micrometeorology of the urban forest. *Philos T Roy Soc B*, 324(1223), 335-349.
- Oke, T. R. (1995). «The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects». In J. E. Cermak. (Ed), *Wind Climate in Cities* (22-45) London. Kluwer-Academic Publ. Norwell.
- Pallardy, S. G. (2007). *Physiology of woody plants*. California: Academic Press.
- Peper, P. J., McPherson, E., Simpson, J. R., Vargas, K. E. y Xiao, Q. (2009). *Lower Midwest community tree guide: benefits, costs and strategic planting*. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-219. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- Prats, J., Vicente-Serrano, S. y Sánchez, M. (2005). Los efectos de la Urbanización de Zaragoza (España) 2005. La Isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la A.G.E.*, 40, 311-327.
- Randrup, T. B., Konijnendijk, C. C., Dobbertin, M. K. y Prußner, R. (2005). The concept of urban forestry in Europe. In C. C. Konijnendijk, K. Nilsson., T. B. Randrup. y J. Schip-Perijn. (Eds.), *Urban Forests and Trees: A Reference Book* (pp. 9-21). Berlin: Springer.
- Salisbury, F. & Ross, C. (1994). *Fisiología Vegetal*. Ciudad de México, México: Editorial Iberoamericana.
- Santamouris, M., Haddad, S., Fiorito, F., Osmond, P., Ding, L., Prasad, D., Wang, R. (2017). Urban Heat Island and Overheating Characteristics in Sydney, Australia. An Analysis of Multiyear Measurements. *Sustainability*, 9(12), 712.
- Urban Horticulture Institute. (2003). *Recommended urban trees: site assessment and tree selection for stress tolerance*. Recovered from <http://www.hort.cornell.edu/UHI/out-reach/recurbtrees/index.html>.
- Vieira De Abreu-Harbich, L., Labaki, L. C., Matzarakis, A. (2012). Different Trees and configuration as microclimate control strategy in Tropics. *ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates*, Dublin Ireland.
- Vieira De Abreu-Harbich, L., Labaki, L. C. y Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99-109.
- Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80-83.
- Zhao, X., Li, G. y Gao, T. (2017). Research on Optimization and Biological Characteristics of Harbin Trees Based on Thermal Comfort in Summer. *Procedia Engineering*, 180, 550-561.

Notas

1 R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Potencial conflicto de intereses: No se presenta ningún tipo de conflicto de Intereses.

Fuentes de financiación: Proyecto de investigación 6411 “Servicios del arbolado urbano, interceptación de lluvia y radiación en Honda” financiado por la Pontificia Universidad Javeriana.

Para citar este artículo: Devia, C. y Torres, A. (2019). Atenuación de la temperatura y radiación UV de la vegetación en entornos urbanos de ciudades y su demanda hídrica. *Revista Luna Azul*, (49), 200-219. DOI: 10.17151/luaz.2019.49.12.