

Análisis de la estructura y Evaluación de los servicios ecosistémicos prestados por el arbolado, de la cabecera Urbana del municipio de Tuluá, Valle del cauca.

**Corporación Autónoma Regional Valle del cauca
CVC- Dirección Técnica Ambiental-Grupo de
Gestión Forestal Sostenible y grupo de gestión
de Riesgo y cambio climático.**

**Santiago de Cali, Agosto de
2023**

Imagen tomada de <https://www.viajarenverano.com/tulua-valle-del-cauca/>

ÍNDICE

Resumen.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
1. OBJETIVOS.....	5
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Objetivos Específicos.....	5
2. METODOLOGÍA.....	5
2.1 Captura de la información.....	5
2.2 Procesamiento de la información.....	8
3. RESULTADOS.....	9
3.1 ESTRUCTURA DEL ARBOLADO URBANO DEL MUNICIPIO DE TULUÁ VALLE DEL CAUCA PARA EL AÑO 2022.....	9
3.1.1 Características de los árboles urbanos.....	9
3.1.2 Cobertura del bosque urbano y área foliar.....	10
3.2.1 ALMACENAMIENTO Y SECUESTRO DE CARBONO.....	12
3.2.1 PRODUCCIÓN DE OXÍGENO.....	14
3.2.3 ELIMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR ÁRBOLES URBANOS.....	15
3.2.4 ESCURRIMIENTO EVITADO.....	18
4. ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA CON BASE A LOS ICU.....	19
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	21
Apéndice I. Modelo y mediciones de campo de i-Tree Eco.....	22
Apéndice II. Efectos de los árboles relacionados.....	27
Apéndice III. Comparación de bosques urbanos.....	28
Apéndice IV. Recomendaciones generales para el mejoramiento de la calidad del aire.....	29
Referencias.....	30

Resumen

Entender la estructura, la función y el valor del bosque urbano puede promover las decisiones de manejo que mejorarán la salud humana y la calidad del medio ambiente. Una evaluación de la estructura, la función y el valor de la vegetación del bosque urbano del municipio de Tuluá, se llevó a cabo durante el período 2023, Los datos de **23.560** árboles localizados a lo largo del municipio se analizaron usando el modelo i-Tree Eco desarrollado por el Servicio Forestal de EEUU, Estación de Investigación del Norte. utilizando datos de la estación meteorológica más cercana al área de estudio registrada en el software, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 1. Resultados de los servicios ecosistémicos calculados por el software i-Tree Eco.

Año/servicios evaluados	2021
Número de árboles evaluados	23.560
Cobertura arbórea	77,04 Ha
Especies más comunes de árboles	<i>Geoffroea spinosa</i> , <i>Adonidia merrillii</i> , <i>Dyopsis lutescens</i>
Porcentaje de árboles menores a 6" (15.2 cm) de diámetro	9,8 %
Eliminación de la contaminación (Kilogramo/año)	6,566
Almacenamiento de carbono (tonelada métrica)	22,72
Secuestro de carbono (tonelada métrica/año)	235,3
Producción de oxígeno (tonelada métrica/año)	627,4
Escurrimiento evitado (metro³/año)	13,06

Tonelada: 1000 kilogramos

Los valores monetarios Col\$ se reportan en Colombian Pesos a lo largo del reporte excepto donde se señala. Los cálculos de los servicios del ecosistema se reportan para los árboles.

Tropical carbón equations have been Used in these estimates.

Para un panorama general de la metodología de i-Tree Eco, consultar el Apéndice I. La calidad de la recopilación de datos la determina los recolectores de datos de la localidad, sobre los que i-Tree no tiene control.

En el censo arbóreo realizado en la cabecera urbana del municipio de Tuluá durante el periodo del 11 de agosto y 1 de octubre de 2021, se actualizaron un total de 28.664 individuos en la cabecera municipal, de los cuales 1.393 corresponden a tocones y muertos. Esta cantidad corresponde a la totalidad de individuos identificados en el perímetro urbano incluyendo borde de cauces, vías férreas y otros emplazamientos donde se identifican individuos forestales, siendo inferior en 5 registros reportados en la base del censo de 2016 (Vásquez et al., 2016) por la ausencia de información en la base compilada. De igual manera, se encontraron 3.088 individuos en predios privados que no se tuvo acceso para hacer la evaluación y 3.687 individuos ausentes, dando como resultado la evaluación fitosanitaria sobre 20.946 individuos. y para el procesamiento en el software se excluyeron los individuos de especies de gramíneas (Bambú y guadua) y setos (*Duranta* y *Swinglea*), que no contaban con la información necesaria para ser ingresados en el software, como DAP y Diámetros de copa, ya que estas especies fueron tomadas por área y no como individuos.

En total en i-Tree se ingresaron 23.570 Individuos arbóreos que representan una cobertura de árboles de los árboles cubren casi 77,04 hectáreas de Tuluá y proporcionan 243,9 hectáreas del área de las hojas del área total del municipio y se identificaron en total 254 especies y 63 familias dispersos en toda el área urbana del municipio de Tuluá.

INTRODUCCIÓN

El arbolado urbano proporciona múltiples beneficios que contribuyen al bienestar humano y al mejoramiento de la calidad ambiental, es por eso que los árboles en la ciudad son elementos fundamentales que han sido reconocidos además por brindar diversos servicios ecosistémicos, por ejemplo: La captura y almacenamiento de carbono por parte de los individuos arbóreos, es identificado a nivel mundial como un fuerte referente en la mitigación del cambio climático. Este proceso se debe a la captura de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂), donde el oxígeno es liberado y devuelto a la atmósfera y el carbono es almacenado como biomasa (Cabudivo, 2017). Otros beneficios reportados son la producción de oxígeno, la remoción de contaminantes y el escurrimiento evitado.

A pesar de que se tiene el conocimiento de los servicios que el arbolado ofrece en las ciudades, no se tienen en cuenta dentro del diseño de la infraestructura, ocasionando que el cambio de las coberturas arbóreas por vías y edificaciones conlleven al aumento de la temperatura al interior de las ciudades. Por otro lado, la creación de fábricas y la movilidad aumentan la contaminación del aire, así mismo se pierden las propiedades de los suelos que facilitan drenar el agua producida por las precipitaciones. Es así como los árboles a través de los procesos de respiración y fotosíntesis remueven los contaminantes y la presencia y actividad de las raíces ayudan a mantener las características del suelo (Gonzales 2002).

Conocer e identificar las coberturas arbóreas presentes al interior de las ciudades posibilita las oportunidades de cuantificar y valorar los servicios ecosistémicos que estas brindan. Los elementos arbóreos, como unidad o conjunto, marcan la diferencia dentro de los ambientes de las ciudades, al generar sombra, proporcionar aire limpio, constituir espacios verdes de esparcimiento, como parques, o simplemente generar paz mental con el solo hecho de apreciarlos. Se han desarrollado modelos matemáticos que junto a diferente software permiten medir la contribución de los árboles al interior de las ciudades y estimar su valor.

El programa i-Tree Eco es una herramienta desarrollada y vigilada por el Servicio Forestal de los Estados Unidos, la cual permite calcular y valorar los servicios ecosistémicos que proveen las coberturas arbóreas urbanas o rurales. El software analiza datos de campo que pueden tratarse de árboles individuales o conjuntos de estos, que son recolectados por medio de muestreos o censos. La información recolectada comprende variables dasométricas y estado fitosanitario de los individuos evaluados (USFS 2020). Además, contiene las ecuaciones que permiten traducir la estructura del arbolado en la capacidad de fijación de contaminantes y de incremento en la infiltración, y nos permite evaluar diferentes escenarios de desarrollo de poblaciones en condiciones locales específicas bajo diferentes supuestos de deforestación y reforestación para determinar el mejor curso de acción. Finalmente, pero no menos importante, permite una planeación y cálculo de estos beneficios en pesos, lo que a su vez ayuda a justificar la realización de gastos en su cuidado y a crear conciencia de la necesidad de llevar a cabo un manejo que, aunque tenga costos, estos son sobrepasados con creces por los beneficios.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Evaluar y cuantificar la estructura y los servicios ecosistémicos generados por el arbolado de la cabecera urbana del municipio de Tuluá, para el año 2021, con la finalidad de proveer información para la toma de decisiones sobre el manejo del arbolado urbano.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar y evaluar las condiciones actuales en las que se encuentra el arbolado urbano del municipio de Tuluá y cuáles son las especies más relevantes en cuanto a servicios ecosistémicos.
- cuantificar los servicios ecosistémicos prestados por el arbolado, desde secuestro de carbono, producción de oxígeno, fijación de contaminantes, incremento en la infiltración o reducción de la escorrentía.
- Cuantificar económicamente, con base en precios establecidos internacionalmente, los beneficios de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano del municipio.
- Establecer información base para el manejo y diseño ecológico de las zonas verdes urbanas, para así contribuir a la sostenibilidad, resiliencia y adaptación al cambio ambiental global.
- Plantear lineamientos para optimizar los servicios ecosistémicos prestados.

2. METODOLOGÍA

2.1 Captura de la información

Aunque para el desarrollo de los demás censos arbóreos se definieron 49 atributos a evaluar por cada individuo, a partir de un consenso entre funcionarios de la Dirección Técnica Ambiental (DTA) y Direcciones Ambientales Regionales (DAR) de CVC, funcionarios de algunas dependencias de la Alcaldía Municipal y el equipo de trabajo del Centro de Investigación Territorio, Construcción y Espacio – CITCE de la Universidad del Valle. para la cabecera urbana de Tuluá fue realizada solamente la actualización de la información del censo entre el 1 de julio al 15 de agosto de 2021, en el marco del desarrollo del Convenio Interadministrativo 141 de 2020, suscrito entre la CVC y el CITCE de la Universidad del Valle, por esta razón solo se tuvieron en cuenta los atributos de ubicación, estado fitosanitario y observaciones, ya que se realizó solo una actualización del estado fitosanitario ya que existía un censo realizado en el año 2017 (Lerma et al., 2017)

A continuación, resaltados en verde se presentan los atributos que fueron tenidos en cuenta para dicha actualización, algunos de los cuales fueron tomados en campo y otros en oficina:

Tabla 2 y 3. Atributos del censo definidos para cada individuo.

	Atributo	Valor	Tipo
ID	- ID		Alfanumérico
	- Longitud		Decimal
	- Latitud		Decimal
	- Comuna		Texto
Ubicación	- Barrio		Texto
	- Tipo	- Árbol - Arbusto - Palma - Otro	Texto
	- Código sp		Alfanumérico
	- Nombre común		Texto
Taxonomía	- Nombre científico		Texto
	- Familia		Texto
	- Etapa de desarrollo	- Juvenil - Adulto - Adulto senescente - Senescente (muerto) - Tocón	Texto
	- Condición	- Introducida - Exótica - Nativa	Texto
	- Caducifolio	- No - Si	Texto
	- CAP 1		Entero
	- CAP 2		
- CAP 3			
Dasometría	- Área (solo gramíneas)		
	- Fuste	- Fuste principal - Bifurcación - Polifurcación	
	- Altura total		
	- Diámetro de copa		Decimal
	- Grado de inclinación		
	- Inclinación	- Andén - Edificaciones - Redes aéreas - Vía - Ninguna	Texto

	Atributo	Valor	Tipo
Emplazamiento	- Emplazamiento	- Andén - Borde de cauce artificial - Borde de cauce natural - Escenario deportivo - Escenario cultural - Glorieta o asimilable - Oreja de puente o asimilable - Parque, plaza o plazoleta - Separador vial - Vía férrea - Vía peatonal - Otro	Texto
	- Confinamiento	- No - Si	Texto
Estado fitosanitario	- Vigorosidad	- Bueno - Regular - Malo	Texto
	- Grado de estrés	- Alto - Medio - Bajo - Ningún	Texto
	- Incidencia	- Enfermo - Sano	Texto
	- Severidad del árbol	- <20 - 21 - 40 - 41 - 60 - 61 -80 - > 80	Texto
	- Localización de la patología	- Flores - Follaje - Fruto - Tallo - Raíces	Texto
- Posibles patógenos	- Bacterias - Hongos - Macromicetos - Plantas parasitas - Virus - Otro - Ninguno	Texto	

Tabla 4 y 5. Atributos del censo definidos para cada individuo (continuación).

	Atributo	Valor	Tipo		Atributo	Valor	Tipo	
Estado fitosanitario	- Síntomas	- Anomalías en follaje - Chancros - Clorosis - Defoliación - Exudados - Muerte de ramas/foliar - Pudrición/Tizones/Necrosis - Otros	Texto	Condición general	- Revisión física	- Anillamiento - Daños mecánicos - Evidencia de endoterapia - Poda mal hecha - Presencia de parasita - Sobre carga de epífitas - Ninguna	Texto	
	Estado entomológico	- Insectos plaga	- Ausencia - Presencia		Texto	- Amenazas	- Volcamiento	Texto
- Nivel de población (individuos)		- ≤ 10 - 11 - 50 - 51 - 100 - > 100	Texto		- Caída de frutos		Texto	
		- Porcentaje de infestación del árbol	- ≤ 20 - 21 - 40 - 41 - 60 - 61 - 80 - > 80		Texto		- Caída de ramas	Texto
- Estructura infestada			- Flores - Follaje - Fruto - Tallo - Raíces		Texto		- Raíces	Texto
			- Daños asociados		- Defoliación - Clorosis - Perforaciones - Galerías - Minas en hojas - Entorchamientos - Perforación de frutos - Otro		Texto	- Ninguno
- Grupos taxonómicos		- Díptera - Lepidóptera - Himenóptera - Coleóptera - Ortóptera - Hemiptera			Texto	- Energizado	- No - Sí	Texto
	- Moluscos plaga (Caracol africano)	- Presencia - Ausencia			Texto	- Hito	- Emblemático (sobresaliente) - Normal	Texto
Recomendación					- Peligro de extinción	- CR (En peligro crítico) - EN (En peligro) - VU (Vulnerable)	Texto	
	- Tipo de intervención silvicultural				- Control fitosanitario - Erradicar - Fertilización - PA Poda aclareo - PC Poda control - PE Poda equilibrio - PF podas formación - PL Poda de limpieza - PRE Poda de realce - PRL Poda de ramas laterales - PRS Poda de ramas secas - PS Poda Sanitaria - RA Reducción de altura - Tala - Traslado (solo juvenil) - Ninguno	Texto		
	- Fotografía					Adjunto		
	- Observaciones					Texto		

2.2 Procesamiento de la información.

Una vez se tuvo el resultado del censo y de la captura de la información en campo se procedió a realizar el procesamiento de la información en el software i-Tree ECO V 6.0.10 del i-Tree 6.1.22. El programa i-Tree con la información dasométrica tomada, calculó los siguientes parámetros morfológicos de los árboles por especie en general:

- Área Foliar (m²).
- Cubierta del dosel (m²).
- Biomasa foliar (Kg).
- Índice de área foliar
- Densidad Población (Árboles/ha).
- Distribución de la población por clase diamétrica (DAP en cm).
- Valor de importancia para las especies.
- Densidad de área Foliar (m²/ha).
- Densidad de biomasa de hojas (kg/ha).

Con esta información es posible determinar, gracias al software i-Tree, la situación del arbolado, y sus servicios ecosistémicos prestados, relacionados con:

- Carbono Almacenado en toneladas (Cfijo).
- Capacidad de Secuestro en toneladas/año (SeC).
- Reducción de escurrimiento de agua de lluvia en m³/año (ReD).
- Remoción de Contaminantes en toneladas/año (ReCon).

Adicionalmente, utilizando los precios de los servicios ecosistémicos incluidos en el software i-Tree se calcula el valor monetario de dichos servicios. En el anexo III se presenta a detalle el modelo i-Tree ECO y la fuente de los valores que se presentan a continuación en la tabla 6:

Tabla 6. Precios de la tonelada de C, contaminantes, y m³ de agua de drenaje evitado, utilizados por i-Tree para Colombia.

Concepto	Unidad	Valor
Carbono fijo y secuestro bruto	Tonelada Metrica	\$ 334.854,00
Reduccion de escorrentia	M3	\$ 7.758.730,00
Contaminantes		
Ozono (O3)	Tonelada Metrica	\$ 61.301.947,00
Monoxido de Carbono (CO)	Tonelada Metrica	\$ 3.543.342,00
Dioxido de nitrogeno (NO2)	Tonelada Metrica	\$ 9.155.067,00
Dioxido de Sulfuro (SO2)	Tonelada Metrica	\$ 3.335.264,00
PM-2.5 mic	Tonelada Metrica	\$ 2.128.084.240,00
PM-10mic	Tonelada Metrica	\$ 15.858.323,00

Fuente: El Autor.

3. RESULTADOS

El software i-Tree tiene la capacidad de generar reportes de la base de datos que procesa y genera con los datos dasométricos de los árboles. Algunos de estos reportes están incluidos en este informe. Así, los resultados se presentan en dos partes, la primera, se refiere a la estructura del arbolado que explica y define el tamaño, la situación, las especies, y su ubicación. La segunda se refiere a los servicios ecosistémicos que nos ofrecen los árboles. A continuación, se presentan algunos reportes gráficos que explican y describen de manera resumida la estructura del arbolado.

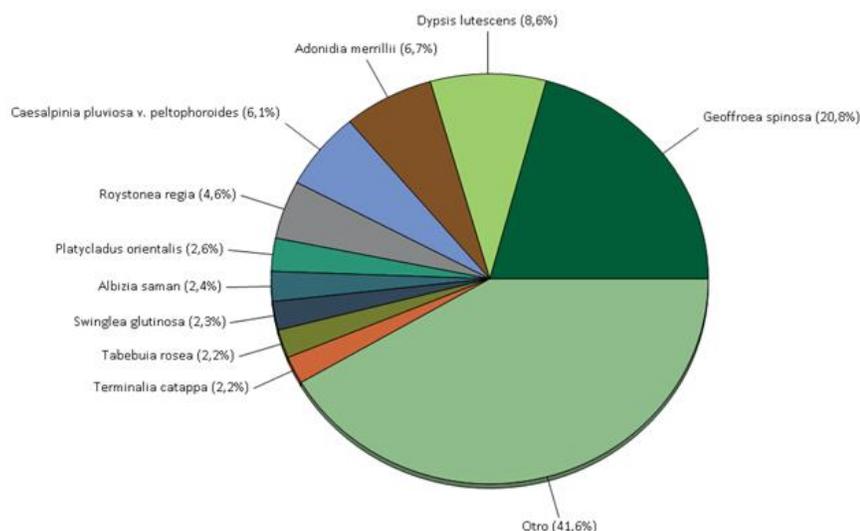
3.1 ESTRUCTURA DEL ARBOLADO URBANO DEL MUNICIPIO DE TULUÁ VALLE DEL CAUCA PARA EL AÑO 2022.

3.1.1 Características de los árboles urbanos

En la cabecera municipal se identificaron 254 especies y 63 familias dispersos en toda el área urbana de Tuluá, equivalente a 23.584 individuos vivos, excluyendo individuos ausentes al momento de la revisión (3.687 individuos), tocones (922 registros) y muertos (471 registros). Sin embargo, esta información taxonómica no es confiable dado que la información obtenida presenta algunas inconsistencias en la asociación de nombre común, nombre científico y familia, esto se pudo haber presentado por cruce de información para procesamiento y análisis de la información en algún momento para la gestión del arbolado. Por lo tanto, es supremamente importante hacer una revisión de las especies consignadas y realizar el proceso de estandarización de individuos con la base consolidada a nivel departamental.

Entre las especies vivas que se destacaron por presentar mayor número de individuos y abundancia relativa fueron: Ébano falso *Geoffroea spinosa* Jacq. con 4.909 individuos (20,81%), seguida de Palma areca *Dypsis lutescens* (H. Wendl.) Beentje & J. Dransf con 2.017 individuos (8,55%), Palma manila *Adonidia merrillii* (Becc.) Becc. con 1.577 individuos (6,69%), Acacia rubinea *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) G.P.Lewis con 1.443 individuos (6,12%) y Palma botella *Roystonea regia* (Kunth) O.F.Cook con 1.083 individuos (4,59%) como se muestra en la siguiente figura:

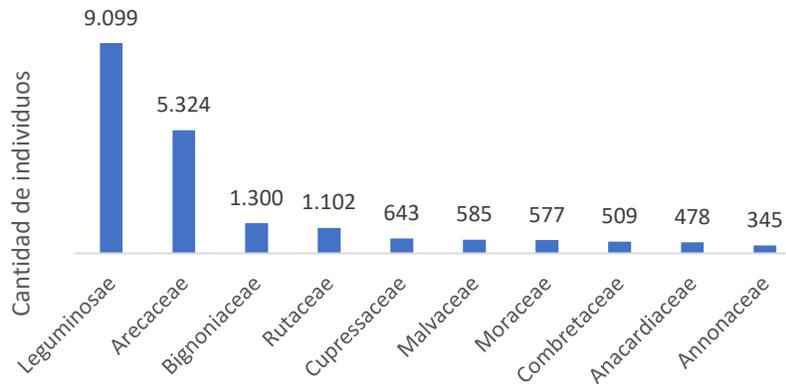
Figura 1. Composición florística de las 10 especies más representativas, encontradas en el



Fuente: Software Itree.

Por otro lado, las familias botánicas más representativas, siendo la más abundante la familia Leguminosae con 9.099 individuos arbóreos, seguida de Arecaceae con 5.324 individuos y la familia Bignoniaceae con 1,300 individuos arbóreos, que corresponden al 38,6%, 22,6% y 5,5% respectivamente (Figura 2).

Figura 2. 10 familias botánicas más representativas en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2022.



Fuente: Adaptado del censo 2016 (Vásquez et al., 2016).

3.1.2 Cobertura del bosque urbano y área foliar

Muchos beneficios de los árboles corresponden directamente con la cantidad de área superficial saludable de las hojas de las plantas. Los árboles cubren casi 77,04 hectáreas de Tuluá y proporcionan 243,9 hectáreas del área de las hojas.

Para la cabecera municipal se encontró que las comunas con mayor presencia de individuos arbóreos son la comuna 5 (23,4%), la comuna 1 (14,1%), la comuna 3 (11,0%) y la comuna 3 (10,2%). Adicionalmente de la distribución espacial de puntos se puede apreciar que el oriente y sur de la ciudad son el sector mayoritariamente Arbolado; esto es consecuente con las comunas que nombran en estos sectores, y por el contrario, el centro y noroccidente son los sectores con menor presencia de individuos arbóreos (comunidades 10, 4 y 8). Para los procesos de planificación y gestión del arbolado urbano, deben priorizarse las comunas del centro tradicional (Comuna 4 y norte de la comuna 5) que se caracterizan por manzanas cuadradas de dimensiones cercanas a los 100 m y calles estrechas con distancias entre 10 y 12 m entre paramento y paramento. Esta condición histórica del sistema de calles y manzanas tradicionales ha dificultado el establecimiento de vegetación. Para incorporar nuevo arbolado en estas áreas, se recomienda un estudio de las especies adecuadas, debido a las limitaciones de espacio aéreo y la proximidad de edificaciones y pavimentos.

Las zonas destacadas y de gran importancia se presentan en la comuna 5 al sur de la ciudad como se observa en la figura 3, que alberga 5.523 individuos en un área de 317,8 ha, representando una media de 17,38 árboles/ha, colocando a esta comuna en temidos globales en la categoría Media, lo que la convierte en el factor de mayor diferenciación para la cabecera municipal.

Figura 3. Distribución espacial de la cobertura arbórea en el municipio por Comunas



Fuente: CVC y Univalle (2022).

Con respecto a la especie más dominante en términos de área de las hojas son *la especie más dominante en términos de área de las hojas son Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides, Albizia saman, y Geoffroea spinosa*. Las 10 especies con los valores de importancia más altos son enumeradas en la Tabla 7. Los valores de importancia (VI) se calculan como la suma del porcentaje de la población y porcentaje del área de las hojas. Los valores de importancia altos no quieren decir que los árboles deben procurarse necesariamente a futuro; sino que dichas especies dominan actualmente la estructura del bosque urbano.

TABLA 7. ESPECIES MÁS IMPORTANTES EN MUNICIPIO DE TULUÁ.

NOMBRE DE LA ESPECIE	PORCENTAJE POBLACIÓN	PORCENTAJE DEL ÁREA DE LAS HOJAS	IV
<i>Geoffroea Spinosa</i>	20,8	9,6	30,4
<i>Caesalpinia Pluviosa V. Peltophoroides</i>	6,1	12,4	18,5
<i>Albizia Saman</i>	2,4	10,2	12,5
<i>Dypsis Lutescens</i>	8,6	1,2	9,7
<i>Adonidia Merrillii</i>	6,7	0,9	7,6
<i>Roystonea Regia</i>	4,6	2,8	7,4
<i>Ficus Benjamina</i>	1,5	5,5	7,1
<i>Pithecellobium Dulce</i>	1,7	5,1	6,8
<i>Tabebuia Rosea</i>	2,2	3,0	5,2
<i>Mangifera Indica</i>	1,8	3,1	5,0

Fuente: El Autor.

3.2 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS ASOCIADOS AL ARBOLADO URBANO DEL MUNICIPIO DE TULUÁ 2021.

Tener claro los servicios ecosistémicos que son brindados por el arbolado urbano es de gran importancia, ya que de esa forma se pueden orientar estrategias, acciones a ejecutar, y metas de manejo del arbolado urbano, así como también evaluar los esfuerzos. Por ejemplo, si se plantea aumentar en cierto porcentaje la cantidad de secuestro de carbono al año habrá que incrementar el tamaño de los árboles existentes, sembrar especies eficientes, etc.

A continuación, se relacionan los resultados arrojados por el software en cuanto a servicios ecosistémicos prestados por el arbolado urbano de la cabecera urbana de Tuluá, según censo realizado en el año 2021.

3.2.1 ALMACENAMIENTO Y SECUESTRO DE CARBONO

La fijación de CO₂ tiene dos componentes importantes; el primero se refiere a la cantidad de Carbono ya fijo o almacenado en la madera al momento de realizar el censo, y el segundo es la capacidad que tienen los árboles para secuestrar o capturar CO₂ durante un periodo, que normalmente es de un año.

El primer valor se determina por la cantidad de madera, y es directamente proporcional al tamaño del árbol (DAP y Altura) y está en función a la especie, por la influencia que tiene esta sobre la densidad de la madera. Este indicador se utiliza también para calcular el valor estructural del arbolado, ya que entre más madera exista más valor tiene el arbolado, otra manera en la que los árboles pueden influenciar el cambio climático global. Conforme un árbol crece, almacena más carbono sujetándolo en su tejido (madera). Cuando el árbol se muere y descompone, nuevamente libera la mayoría del carbono almacenado a la atmósfera. Por lo tanto, el almacenamiento de carbono es una indicación de la cantidad de carbono que se puede liberar si se permite que los árboles mueran y se descompongan. Conservar árboles saludables mantendrá el carbono almacenado en los árboles, pero el mantenimiento de los árboles puede contribuir a las emisiones de carbono (Nowak et al, 2002).

Por otro lado, Carbono capturado (secuestro bruto de carbono), hace referencia a la reducción de la cantidad de carbono en la atmósfera al secuestrar el carbono en el crecimiento nuevo cada año, la capacidad de secuestro de carbono anual depende a su vez del follaje, y por supuesto del tipo de hoja, que a su vez depende de la especie. No es lo mismo una hoja de un Ficus (*Ficus benjamina*) comparada con la hoja de un Ébano (*Geoffroea spinosa*), por tamaño, grosor, y eventualmente por cantidad expresada en **biomasa o área foliar**, Estos parámetros son el insumo principal para realizar los cálculos de almacenamiento y captura de carbono y ingresando los datos básicos en el software I-Tree, a continuación en la tabla 8. Se relacionan los datos respectivos a los cálculos de área foliar de las 10 especies más representativas evaluadas en el municipio de Tuluá en el año 2022:

Tabla 8. Especies más representativas respecto al Área foliar en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2021.

Nombre de la especie	Conteo de árboles	Cubierta del dosel (m ²)	Área foliar (m ²)	Biomasa foliar (kg)	Área basal (m ²)
Total	23559	770380,6	2439440,9	232173,4	15544,5
<i>Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides</i>	1443	88263	303087,3	27063,8	1734,2
<i>Albizia saman</i>	554	77188,9	248640,2	10810,4	2773,3
<i>Geoffroea spinosa</i>	4909	83441,5	233271,1	20161,7	1863,2
<i>Ficus benjamina</i>	358	33952,8	134945,6	10566,6	799,7
<i>Pithecellobium dulce</i>	398	38504,9	123757,4	10696,4	584,3
<i>Mangifera indica</i>	431	17651	76225,7	7441,7	302,7
<i>Tabebuia rosea</i>	527	24257	72260,6	4399,4	327,9
<i>Roystonea regia</i>	1083	26289,6	67689,5	11353,5	1246,7
<i>Guazuma ulmifolia</i>	234	15106,3	60163,8	5266,4	288,4
<i>Clitoria</i>	264	17540,3	59830,4	5171,2	319,2

Fuente: El Autor.

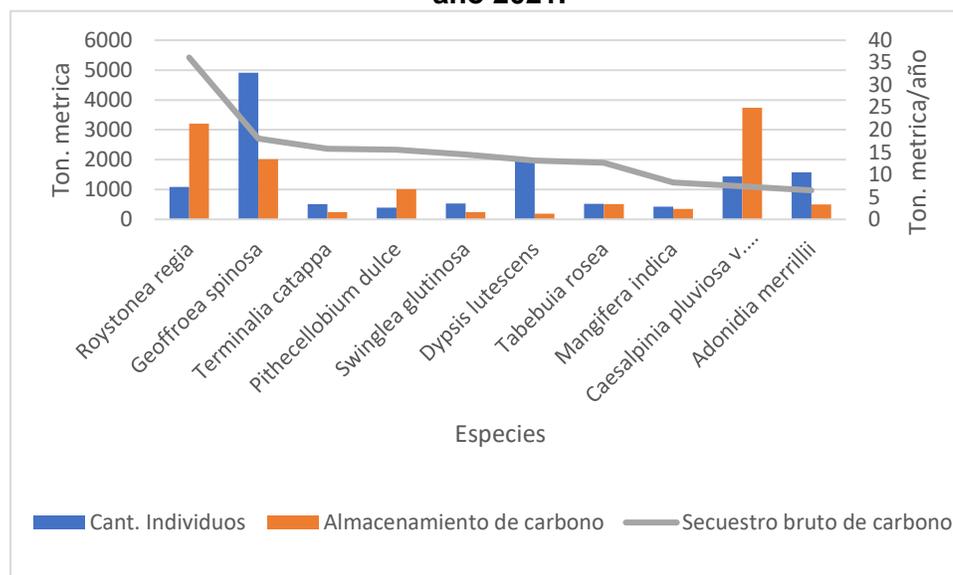
En resumen se puede observar que para este municipio el área foliar aumenta directamente en relación con la especie, su amplitud de copa y la cantidad de individuos, pues aunque de la especie Palma real (*Roystonea regia*) tiene mayor cantidad de individuos (1083), esta no supera el área foliar, ni la cobertura del dosel de los individuos de la especie Samán (*Albizia saman*), que tienen 554 individuos, ya que por lo general tienen copas más amplias y brindan servicios que deben ser considerados dentro de los criterios de selección de las especies que serán plantadas en un futuro.

A continuación en la Figura 4. se muestra una gráfica con los dos conceptos relacionados con la captura y almacenamiento de carbono y su relación entre cantidad de individuos y especie, para los árboles censados en el municipio de Tuluá en el año 2021.

El primero es el secuestro bruto o captura de carbono, el cual incrementa anualmente con el crecimiento y la salud de los árboles. El secuestro bruto de carbono para el municipio de Buga es casi 235,3 toneladas métrica del carbono por año, con un valor asociado de \$ 145.395.711 (Para más detalles de los métodos ver el Apéndice I).

El otro concepto es el almacenamiento de carbono, Se calcula que los árboles en el municipio de Tuluá almacenan 22721 toneladas de carbono (\$ 14.041'137.791). De las especies muestreadas, *Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides* almacena la mayor cantidad de carbono (aproximadamente 16,4% del total de carbono almacenado) y *Roystonea regia* secuestra la mayor cantidad (aproximadamente 15,4% de todo el carbono secuestrado), como se muestra en la figura 8, Es importante destacar, para evitar confusiones, que cuando se menciona Carbono, se refiere al átomo de carbono, con un peso atómico de 12, mientras que al hablar de CO₂, se tiene en cuenta una molécula que pesa 44 (por los 2 átomos de oxígeno de 16).

Figura 4. Comportamiento del almacenamiento para las 10 especies más representativas y secuestro de carbono vs cantidad de individuos en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2021.



Fuente: El Autor.

En resumen se puede observar que aunque la especie Ébano (*Geoffroea spinosa*) es la que tiene mayor cantidad de individuos en el área del municipio con 4.909 árboles equivalente a un 20,81% del total de ellos individuos censados, Seguida de la especie Palma Areca (*Dypsis lutescens*) con un total de 2017 individuos equivalentes a un 8.55% del total de los individuos muestreados, estas no son las que mas almacenan ni capturan carbono, como se observa en la grafica anterior la especie que mas captura carbono es la palma botella (*Roystonea regia*) y la que mas almacena carbono es la especie acacia rubinia (*Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides*).

3.2.1 PRODUCCIÓN DE OXÍGENO

Otro servicio ecosistémico muy importante es la liberación de oxígeno por causa de la fotosíntesis, que es complementario y aditivo a la fijación de CO₂. Este parámetro se comporta directamente proporcional a la cantidad de árboles que existen. Sin embargo, la capacidad de producción de oxígeno si varía dependiendo del tipo de árboles o especies que hay, ya que está directamente relacionada con la cantidad de carbono secuestrado por el árbol, la cual está vinculada también con la acumulación de biomasa.

Se calcula que los árboles del municipio de Tuluá producen 627,4 tonelada métrica de oxígeno al año. Sin embargo, este beneficio de los árboles es relativamente insignificante debido a la gran y relativamente estable cantidad de oxígeno en la atmósfera y extensa producción por los sistemas acuáticos. Nuestra atmósfera tiene una enorme reserva de oxígeno. Si se consumieran todas las reservas de combustibles fósiles, todos los árboles y toda la materia orgánica en el suelo, el oxígeno de la atmósfera sólo se reduciría en un mínimo porcentaje (Broecker 1970).

A continuación se presentan las 20 especies que más producen oxígeno en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2022.

Tabla 9. Las principales especies productoras de oxígeno.

Especie	Producción de Oxígeno (Tonelada Métrica)	Secuestro bruto de carbono (tonelada métrica/año)	Número de árboles	Área Foliar (Ha)
<i>Roystonea regia</i>	96,41	36,15	1.083	6,77
<i>Geoffroea spinosa</i>	48,15	18,06	4.909	23,33
<i>Terminalia catappa</i>	42,09	15,78	508	5,09
<i>Pithecellobium dulce</i>	41,47	15,55	398	12,38
<i>Swinglea glutinosa</i>	38,67	14,50	532	4,18
<i>Dypsis lutescens</i>	35,09	13,16	2.017	2,85
<i>Tabebuia rosea</i>	33,80	12,68	527	7,23
<i>Mangifera indica</i>	21,99	8,25	431	7,62
<i>Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides</i>	19,74	7,40	1.443	30,31
<i>Adonidia merrillii</i>	17,27	6,48	1.577	2,12
<i>Pterogyne nitens</i>	16,57	6,21	187	4,86
<i>Melicoccus bijugatus</i>	13,83	5,19	132	3,26
<i>Albizia saman</i>	13,37	5,02	554	24,86
<i>Simarouba amara</i>	11,51	4,32	90	2,60
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	11,39	4,27	129	1,37
<i>Ficus benjamina</i>	8,12	3,04	358	13,49
<i>Jacaranda caucana</i>	7,33	2,75	114	2,23
<i>Licania</i>	6,98	2,62	68	1,16
<i>Leucaena leucocephala</i>	6,26	2,35	383	4,02
<i>Guazuma ulmifolia</i>	6,13	2,30	234	6,02

Fuente: El Autor.

3.2.3 ELIMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR ÁRBOLES URBANOS

La mala calidad del aire es un problema común en muchas áreas urbanas. Puede conducir a la disminución de la salud humana, dañar los materiales del paisaje y los procesos de los ecosistemas y reducir la visibilidad. El bosque urbano puede ayudar a mejorar la calidad del aire reduciendo la temperatura del aire, eliminando directamente los contaminantes del aire y reduciendo el consumo de energía de los edificios, que por consiguiente reduce las emisiones de los contaminantes del aire de las fuentes eléctricas. Los árboles también emiten compuestos orgánicos volátiles que pueden contribuir a la formación de ozono. Sin embargo, los estudios integrados han dado a conocer que el aumento en la cobertura de los árboles conduce a una menor formación de ozono (Nowak y Dwyer 2000).

La eliminación de la contaminación por árboles en municipio de Tuluá, se calculó usando datos de campo y de contaminación reciente, así como el estado del tiempo, disponibles en la siguiente estación meteorológica:

Detalles de estación meteorológica:

- Año: 2016
- USAF: 802590
- WBAN: 99999
- Nombre: ALFONSO BONILLA ARAGON INTL
- Data source: NCDC and user submitted

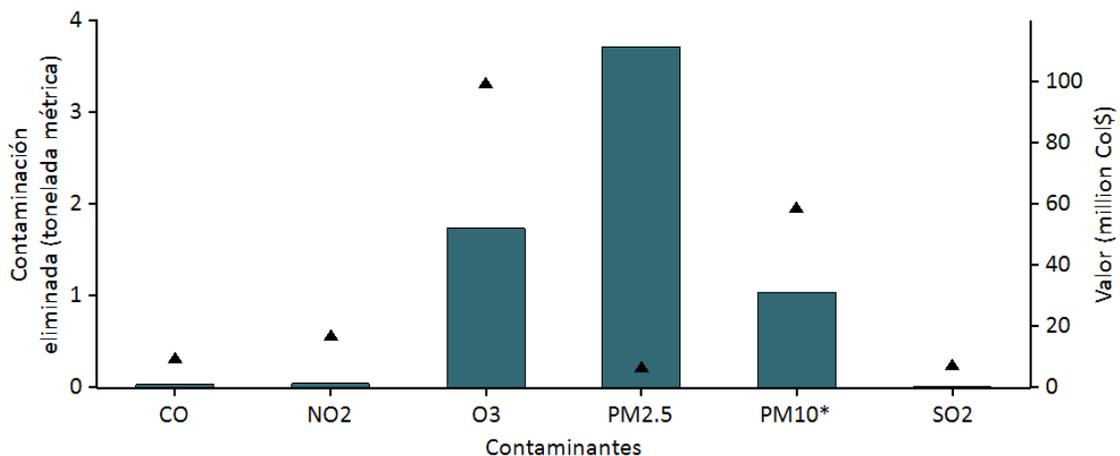
Detalles de la contaminación:

- Año: 2016

CO	O3	NO2	SO2	PM2.5	Lugar	Station ID	Distance (km)
Sí	Sí			Sí	Cali, Valle del Cauca, Colombia	0002	87,4
				Sí	Cali, Valle del Cauca, Colombia	0003	84,1
Sí					Bogota, D.c., Bogota, Colombia	0002	238,7

Esta estación meteorológica es la más cercana al área de estudio reportada en el software. La eliminación de la contaminación fue mayor para ozono (Figura 5). Se estima que los árboles eliminaron 6,57 toneladas métricas de la contaminación del aire (ozono (O3), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO2), material particulado menor a 2.5 micrones (PM2.5), material particulado menor a 10 micrones y mayor a 2.5 micrones (PM10*)², y dióxido de sulfuro (SO2)) por año con un valor asociado de \$ 197'232.292 (para más detalles ver el Apéndice I).

Figura 5. Eliminación anual de la contaminación (puntos) y valor (barras) por total de árboles en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2022.



PM10* es material particulado menor a 10 micrones y mayor a 2.5 micrones. PM2.5 es material particulado menor a 2.5 micrones. Si no se monitorea PM2.5, PM10* representa material particulado menor a 10 micrones. PM2.5 por lo general es más relevante en las discusiones sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud humana.

Los árboles eliminan PM2.5 y PM10* cuando el material particulado se deposita en la superficie de las hojas. Este PM2.5 y PM10* depositado puede volver a suspenderse en la atmósfera o eliminarse durante las lluvias y disolverse o transferirse al suelo. La combinación de eventos puede conducir a una eliminación y valor de la contaminación positiva o negativa según los diferentes factores atmosféricos (para más detalles ver el Apéndice I).

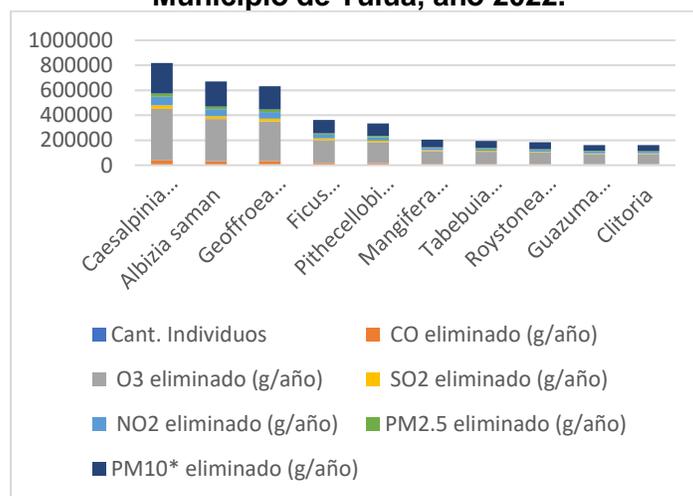
A continuación en la tabla 10 se relacionan la cantidad de contaminantes removidos por cada especie:

Tabla 10. Cantidad de contaminantes eliminados al año por las 10 especies arbóreas más representativas en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2022.

Especie	Cant. Individuos	CO eliminado (g/año)	O3 eliminado (g/año)	SO2 eliminado (g/año)	NO2 eliminado (g/año)	PM2.5 eliminado (g/año)	PM10* eliminado (g/año)
Total general	23559	304093	3311833,7	235854,2	556098,5	203812,3	1954557,3
<i>Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides</i>	1443	37783,4	411476,7	29303,5	69092,4	25321,7	242845,2
<i>Albizia saman</i>	554	30996	337557,4	24040,8	56679,7	20775,2	199217,5
<i>Geoffroea spinosa</i>	4909	29074,6	316693,8	22548	53177,8	19488	186905,1
<i>Ficus benjamina</i>	358	16820,3	183204,4	13046,2	30762,4	11275,8	108121,8
<i>Pithecellobium dulce</i>	398	15426,8	168015,9	11965,5	28211,2	10340,3	99158,2
<i>Mangifera indica</i>	431	9501,4	103485,9	7369,1	17376,5	6369,1	61073,6
<i>Tabebuia rosea</i>	527	9007,7	98102,1	6986,8	16474,1	6036,9	57898
<i>Roystonea regia</i>	1083	8438,2	91896,1	6543	15431,6	5656,5	54234,9
<i>Guazuma ulmifolia</i>	234	7499,8	81680,7	5817,1	13715	5026,6	48205,2
<i>Clitoria</i>	264	7458,4	81227,1	5784,9	13638,7	4998,4	47938,6

Fuente: El Autor.

Figura 6. Proporción de contaminantes removidos por cada especie en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2022.



Fuente: El autor.

El valor de la eliminación de la contaminación se calcula con base en los precios de Col\$3,54334 por g (CO), Col\$15,74951 por g (O3), Col\$2,35002 por g (NO2), Col\$0,85576 por g (SO2), Col\$547,04226 por g (PM2.5), Col\$15,85832 por g (PM10*).

De acuerdo a lo anterior se aclara que, aunque algunas especies como Acacia rubinia (*Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides*), Saman (*Albizia saman*) y Ébano (*Geoffroea spinosa*) aparecen como las especies que más eliminan contaminantes de la atmosfera, esto no quiere decir que sean las más recomendadas para posteriores planes de siembra o revegetalización, ya que todo dependerá de la cantidad de individuos, tipo de ecosistema, entre otros factores determinantes. Por ello para cada sitio, y objetivo específico, se deberán evaluar las especies más recomendables.

Por otra parte En 2021, los árboles en Tuluá emiten aproximadamente 2,998 toneladas métricas de los compuestos orgánicos volátiles (COV) (2,479 toneladas métricas de isopreno y 0,5196 toneladas métricas de monoterpenos). Las emisiones varían entre las especies con base en las características de las mismas (p. ej., algunos géneros como los robles son altos emisores de isopreno) y la cantidad de biomasa de las hojas. Treinta- nueve por ciento de las emisiones de COV del bosque urbano fueron de *Albizia saman* y *Roystonea regia*. Estos COV son sustancias químicas precursoras de la formación de ozono.

En el Apéndice VIII se brindan recomendaciones generales para mejorar la calidad del aire con árboles.

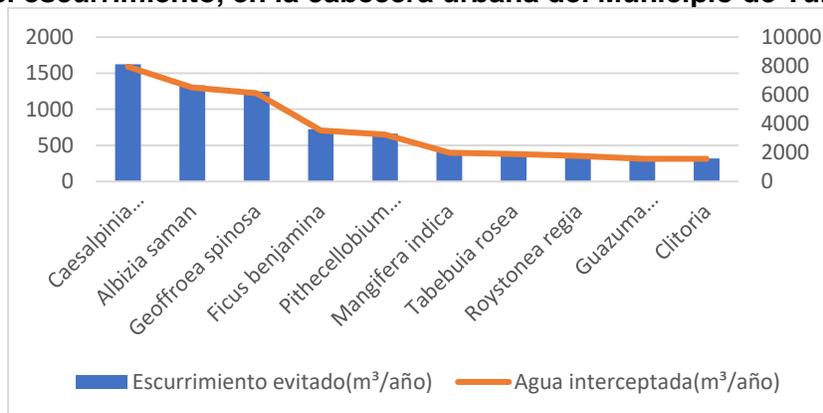
3.2.4 ESCURRIMIENTO EVITADO

El escurrimiento superficial puede ser causa de preocupación en muchas áreas urbanas ya que puede contribuir a la contaminación de arroyos, humedales, ríos, lagos y océanos. Durante los eventos de precipitación, cierta cantidad se ve interceptada por la vegetación (árboles y matorrales) mientras que la otra alcanza el suelo. La cantidad de la precipitación que llega al suelo y no se filtra se vuelve escurrimiento superficial (Hirabayashi 2012). En las áreas urbanas, la gran extensión de superficies impermeables aumenta la cantidad de escurrimiento superficial.

Sin embargo, los árboles y matorrales urbanos son benéficos al reducir el escurrimiento superficial. Los árboles y matorrales interceptan la precipitación, mientras que sus sistemas de raíces promueven la infiltración y el almacenamiento en el suelo. Los árboles y matorrales del municipio de Tuluá ayudan a reducir el escurrimiento por casi 12.970 metros cúbicos al año con un valor asociado de Col \$ 101.363.341 (para más detalles ver el Apéndice I). El escurrimiento evitado se calcula en base al estado del tiempo de la localidad de la estación meteorológica designada por el usuario. En Tuluá, la precipitación anual total en 2016 fue -71.128.690,6 centímetros.

se toman los datos del año 2016 por que es el último año en el que se reportan los datos de precipitación y temperatura de la estación meteorológica asignada, en resumen las especies que genera mayor impacto en este servicio ecosistémico son *Caesalpinia pluviosa v. peltophoroides*, *Albizia saman*, *Geoffroea spinosa*, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 7. Ecurrimiento evitado vs agua interceptada para las especies con mayor impacto general en el escurrimiento, en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá, año 2021.



Fuente: El Autor.

4. ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA CON BASE A LOS ICU.

La regulación de la temperatura y la mitigación del efecto de Isla de Calor Urbana (ICU), es un beneficio importante de la vegetación urbana, especialmente en un contexto de temperaturas extremas asociadas al cambio climático. La exposición a altas temperaturas tiene efectos relevantes en la salud, incluyendo problemas respiratorios, deshidratación, fatiga e incluso la mortalidad por insolación (Hsu et al., 2021). El tráfico vehicular y la expansión urbanística magnifica estos efectos al aumentar el estrés por calor, ruido y contaminación del aire. Las características del entorno urbano, como el predominio de superficies impermeables (edificaciones, pavimentos) y la falta de espacios verdes, espacios de agua y vegetación arbórea, son las causas principales de las ICU (CVC, UNIVALLE 2022).

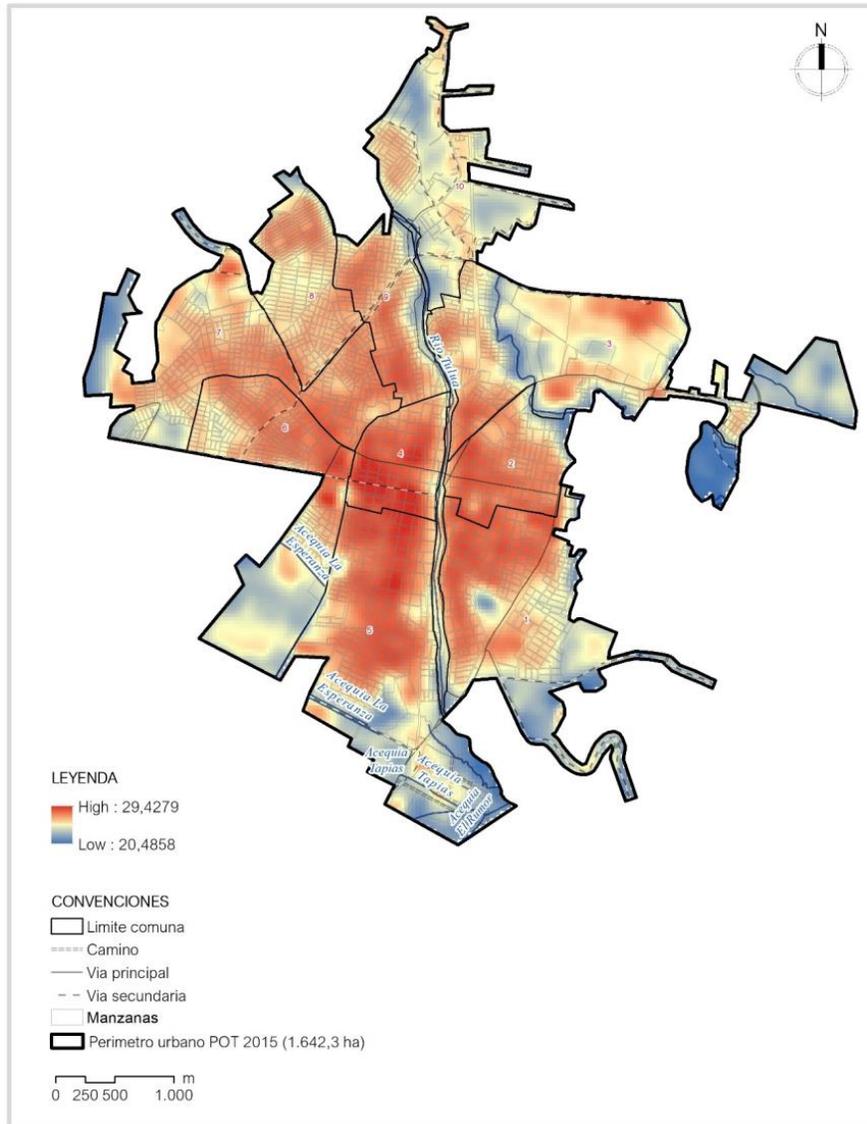
De los resultados obtenidos del procesamiento de la información recopilada arrojaron que la ciudad de Tuluá presenta un rango de temperaturas de superficie que oscila entre los 20°C hasta los 29°C, ubicándose las máximas temperaturas en las zonas centrales del caso urbano y con un mayor incremento hacia las comunas 4 y 5. Siendo las zonas asociadas a los cauces principales que atraviesan la ciudad (Río Tuluá y Río Morales) donde se rompe con la tendencia de calor y se reduce considerable reducción la temperatura en proporción a las zonas contiguas. Los valores de NDVI para el municipio indican que el 32.85%, del casco urbano se encuentra bajo una cobertura diferente a la vegetal (edificaciones, vías, cuerpos de agua), siendo las comunas 6, 7 y 8 las que representan los valores más bajos en todo el municipio.

Además, las zonas correspondientes a los corredores fluviales mencionados anteriormente tienen una representación favorable hacia la presencia de vegetación, al igual que las zonas suroccidental y nororiental, mostrando un elevado índice de vegetación; para estos últimos dos casos corresponden principalmente a tierras con actividad agropecuaria, zonas privadas como el Cementerio los Olivos y área de conservación del parque de la Guadua. No obstante, en las zonas con influencia agrícola se debe considerar que el NDVI en estos sectores es más dinámico que en el resto de la ciudad. Al comparar la TS contra el NDVI se puede apreciar que existe una relación estrecha entre los valores de temperatura superficial y la cobertura vegetal, sin embargo, esta relación toma mayor importancia cuando se habla de suelos edificados, ya que en estos casos la temperatura superficial se debe al desarrollo urbano, por lo cual los efectos de altas temperaturas son permanentes. Si bien las comunas 6, 7 y 8 presentan un NDVI bajo, los valores de TS son menores respecto a otros sectores del municipio, por ej.: las comunas 1, 2, 4 y 5 que también presentan índices de vegetación bajo. Este comportamiento se presenta por el tipo de uso residencial a diferencia las comunas 1, 2, 4 y 5 donde prima el uso del suelo mixto y/o comercial como las actividades antrópicas, en concordancia con la clasificación recibida por el DANE (2018).

De los resultados obtenidos del procesamiento de la información recopilada arrojaron que la ciudad de Tuluá presenta un rango de temperaturas de superficie que oscila entre los 20°C hasta los 29°C, ubicándose las máximas temperaturas en las zonas centrales del caso urbano y con un mayor incremento hacia las comunas 4 y 5. Siendo las zonas asociadas a los cauces principales que atraviesan la ciudad (Río Tuluá y Río Morales) donde se rompe con la tendencia de calor y se reduce considerable reducción la temperatura en proporción a las zonas contiguas. Los valores de NDVI para el municipio indican que el 32.85%, del casco urbano se encuentra bajo una cobertura diferente a la vegetal (edificaciones, vías, cuerpos de agua), siendo las comunas 6, 7 y 8 las que representan los valores más bajos en todo el municipio. Además, las zonas correspondientes a los corredores fluviales mencionados anteriormente tienen una representación favorable hacia la presencia de vegetación, al igual que las zonas suroccidental y nororiental, mostrando un elevado índice de vegetación; para estos últimos dos casos corresponden principalmente a tierras con actividad agropecuaria, zonas privadas como el Cementerio los Olivos y área de conservación del parque de la Guadua. No obstante, en las zonas con influencia agrícola se debe considerar que el NDVI en estos sectores es más dinámico que en el resto

de la ciudad. Al comparar la TS contra el NDVI se puede apreciar que existe una relación estrecha entre los valores de temperatura superficial y la cobertura vegetal, sin embargo, esta relación toma mayor importancia cuando se habla de suelos edificados, ya que en estos casos la temperatura superficial se debe al desarrollo urbano, por lo cual los efectos de altas temperaturas son permanentes. Si bien las comunas 6, 7 y 8 presentan un NDVI bajo, los valores de TS son menores respecto a otros sectores del municipio, por ej.: las comunas 1, 2, 4 y 5 que también presentan índices de vegetación bajo. Este comportamiento se presenta por el tipo de uso residencial a diferencia las comunas 1, 2, 4 y 5 donde prima el uso del suelo mixto y/o comercial como las actividades antrópicas, en concordancia con la clasificación recibida por el DANE (2018).

Figura 8. Temperatura en superficie en la cabecera urbana del Municipio de Tuluá 2021.



Fuente: CVC y Univalle (2022)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De manera satisfactoria para la actualización del municipio se registraron un total de 28.664 individuos arbóreos, de los cuales 23.584 corresponden a individuos vivos (82,3%), 1.393 a individuos muertos o tocones (4,9%) y 3.687 individuos ausentes (12,9%).
- Al interior del del perímetro urbano del municipio se encontró un aumento de la pérdida de individuos pasado de 5.080 al 2021, entre individuos Muertos, Tocones y Ausentes, equivalente al 17,7% del total de individuos registrados. Lo que establece un panorama de atención para la gestión del arbolado en el municipio.
- Del total de individuos arbóreos vivos evaluados, se identificaron 63 familias entre 254 especies, siendo 51,7% de las especies entre *Geoffroea spinosa* Jacq., *Dypsis lutescens* (H.Wendl.) Beentje & J.Dransf., *Adonidia merrillii* (Becc.) Becc., *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) G.P.Lewis, *Roystonea regia* (Kunth) O.F.Cook, *Platycladus orientalis* (L.) Franco y *Albizia saman* (Jacq.) Merr. en orden de mayor a menor. Esta concentración de especies establece una amenaza para el equilibrio ecológico del ecosistema Bosque cálido seco en piedemonte coluvio-aluvial, Arbustales y matorrales medio seco en lomerío estructural-erosional y Bosque cálido seco en piedemonte aluvial, generando presión de selección en la adaptación de otras especies en periodos de tiempos muy cortos y forzando el desplazamiento en otras especies hacia zonas más enriquecidas y menor intervenidas.
- Se identifica la necesidad de aumentar la cantidad de individuos arbóreos para la cabecera urbana del municipio en alrededor de 31.500 individuos para alcanzar una relación de 3 habitantes por árbol, actualmente se establece en la categoría Alta con 7,0 habitantes por árbol. Los sectores con mayor oportunidad de mejora son las comunas y barrios condición Media y Regular debido a que presentan mayor de disponibilidad de espacio s para la incorporación de individuos, contrario a lo que se presenta en los sectores en condición Alta o Muy Alta.
- La presente actualización permitió la identificación de 18.173 individuos que requieren algún tipo de intervención por poda y 3.849 individuos requieren poda de control por estar en contacto con redes aéreas.
- De los 23.584 individuos vivos evaluados, 4.542 presentaban algún problema fitosanitario y/o entomológico, de los cuales 2.680 se encontraron afectados por enfermedades y 1.862 por problemas entomológicos, estos valores son equivalentes al 13,1% y 9,1% respectivamente de la población. Lo que establece una necesidad de evaluar los individuos con mayor rigurosidad, dado que aunque la metodología aplicada es limitada, establece que la población de individuos con problemas fitosanitarios se subestima debido a la sintomatología concentrada en estructuras del tercio medio de los individuos. Otra confirmación de este panorama de alerta se confirma al comprar la información el 2016 con la actual, para aquel entonces se identificó la presencia de 272 individuos con insectos (1,3%), 171 individuos con presencia de hongos (0,8%) y 8.247 individuos con mancha fungosas (38,6%), bajo respuestas dicotómicas, lo que no permite profundizar en el análisis.
- De acuerdo con la evaluación fitosanitaria presuntivo, el principal síntoma fitopatológico evidenciado en las especies evaluadas fue la Muerte de ramas/foiar, causada por Plantas parásitas, mayoritariamente en la especie *Geoffroea spinosa* Jacq. y *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) G.P.Lewis, mientras que el principal daño evidenciado por insectos fue Perforaciones en tallo causado por insectos del orden taxonómico Coleóptera en la especie *Adonidia merrillii* (Becc.) Becc.
- En la gran mayoría de los casos donde se evidenció que la comunidad identificó un árbol como problema, esto obedece principalmente a viviendas que han sido construidas en áreas forestales protectoras - AFP, desconociendo el papel ecosistémico fundamental que tienen los individuos arbóreos en estas zonas.

Apéndice I. Modelo y mediciones de campo de i-Tree Eco

i-Tree Eco está diseñado para usar datos de campo estandarizados y datos locales de la contaminación del aire y meteorológicos por hora para cuantificar la estructura del bosque urbano y sus numerosos efectos (Nowak y Crane 2000), incluyendo:

- Estructura del bosque urbano (p. ej., composición de las especies, salud de los árboles, área de las hojas, etc.).
- Cantidad de contaminación del aire que el bosque urbano elimina por hora y su mejoramiento de la calidad del aire asociado a lo largo del año.
- Carbono total almacenado y carbono neto secuestrado anualmente por el bosque urbano.
- Efectos de los árboles en el uso de la energía de los edificios y efectos consiguientes en las emisiones de dióxido de carbono de las fuentes eléctricas.
- Valor de sustitución del bosque, así como el valor para la eliminación de la contaminación del aire y almacenamiento y secuestro de carbono.
- Posible impacto de infestaciones de plagas, como el escarabajo asiático de cuerno largo, el barrenador esmeralda del fresno, la lagarta peluda y la enfermedad holandesa del olmo.

Típicamente, todos los datos de campo se recopilan durante la temporada de hojas para evaluar correctamente el dosel de los árboles. La recopilación típica de datos (la recopilación de datos actual puede variar según el usuario) incluye uso de la tierra, cubierta del suelo y de los árboles, características individuales de los árboles de las especies, diámetro del tallo, altura, ancho de la copa, copa faltante y muerte regresiva, y la distancia y dirección a edificios residenciales (Nowak et al 2005; Nowak et al 2008).

Durante la recopilación de datos, los árboles se identifican a la clasificación taxonómica más específica posible. Los árboles que no se clasifican a nivel de la especie pueden clasificarse por género (p. ej., fresno) o grupo de especie (p. ej., madera noble). En este reporte, la especie, género o grupo de especie de los árboles se denomina de manera colectiva como especie del árbol.

Características de los árboles:

Se evaluó el área de las hojas de los árboles usando las mediciones de las dimensiones de la copa y el porcentaje de copa faltante. En caso de que dichas variables no se hayan recopilado, el modelo las calcula.

No existe disponible un análisis de especies invasivas para estudios fuera de Estados Unidos. Para EEUU, las especies invasivas se identifican usando una lista de especies invasivas para el estado en el que se ubica el bosque urbano. Las listas no son exhaustivas y cubren especies invasivas con varios grados de invasión y distribución. En casos donde un estado no tuvo una lista de especies invasivas, se crea una lista con base en las listas de los estados adyacentes. Las especies de árboles que se identifican como invasivas por la lista estatal de especies invasivas se comparan con los datos de distribución de las nativas. Esto ayuda a eliminar a las especies que están en la lista estatal de especies invasivas, pero que son nativas del área de estudio.

Eliminación de la contaminación del aire:

La eliminación de la contaminación se calcula para ozono, dióxido de sulfuro, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, material particulado menor a 2.5 micrones, y material particulado menor a 10

micrones y mayor a 2.5 micrones. PM2.5 por lo general es más relevante en las discusiones sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud humana.

Los cálculos de la eliminación de la contaminación del aire se derivan de los cálculos de la resistencia del dosel de los árboles al ozono, sulfuro y dióxido de nitrógeno por hora con base en un híbrido de los modelos de deposición de doseles de hojas grandes y de multicapas (Balducchi 1988; Balducchi et al 1987). Ya que la eliminación de monóxido de carbono y material particulado por la vegetación no está directamente relacionada con la transpiración, los índices de eliminación (velocidades de deposición) para dichos contaminantes se basan en los valores promedio medidos de la literatura (Bidwell y Fraser 1972; Lovett 1994) que se modificaron según la fenología y área de las hojas. La eliminación del particulado incorporó un índice de suspensión del 50 por ciento de partículas de regreso a la atmósfera (Zinke 1967). Las últimas actualizaciones (2011) al modelaje de la calidad del aire se basan en mejores simulaciones del índice del área de las hojas, procesamiento e interpolación del estado del tiempo y la contaminación, y valores monetarios actualizados de los contaminantes (Hirabayashi et al 2011; Hirabayashi et al 2012; Hirabayashi 2011).

Los árboles eliminan PM2.5 y PM10* cuando el material particulado se deposita en la superficie de las hojas (Nowak et al 2013). Dicho PM2.5 y PM10* depositado puede volverse a suspender en la atmósfera o eliminarse durante la lluvia y disolverse o transferirse al suelo. La combinación de eventos puede conducir a una eliminación y valor de la contaminación positiva o negativa dependiendo de varios factores atmosféricos. Por lo general, la eliminación de PM2.5 y PM10* es positiva con beneficios positivos. Sin embargo, existen casos donde la eliminación neta es negativa o las partículas vuelven a suspender conducen a mayores concentraciones de contaminación y valores negativos. Durante algunos meses (p. ej., sin lluvia), los árboles vuelven a suspender más partículas de las que eliminan. La resuspensión puede conducir a un aumento general de las concentraciones de PM2.5 y PM10* si las condiciones de la capa límite son menores durante los períodos de resuspensión neta que durante los períodos de eliminación neta. Debido a que los valores de eliminación de la contaminación se basan en el cambio en la concentración de la contaminación, es posible contar con situaciones donde los árboles eliminan PM2.5 y PM10* pero aumentan las concentraciones y por ello tienen valores negativos durante períodos positivos de eliminación general. Dichos eventos no son comunes, pero pueden suceder.

Para reportes en Estados Unidos, el valor predeterminado de la eliminación de la contaminación del aire se calcula con base en la incidencia local de los efectos adversos a la salud y en los costos nacionales de externalidades promedio. El número de efectos adversos a la salud y el valor económico asociado se calcula para ozono, dióxido de sulfuro, dióxido de nitrógeno y material particulado menor a 2.5 micras usando datos del Programa de Asignaciones y Análisis de Beneficios Ambientales (BenMAP) de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (Nowak et al 2014). El modelo usa un enfoque en función del daño que se basa en los cambios locales de la concentración de la contaminación y la población. Los costos nacionales de externalidades promedio se usan para calcular el valor de la eliminación del monóxido de carbono (Murray et al 1994).

Para reportes internacionales, se usaron valores locales de la contaminación definidos por el usuario. Para reportes internacionales que no cuentan con valores locales, los cálculos se basan en los valores europeos de externalidades promedio (van Essen et al 2011) o en las ecuaciones de regresión BenMAP (Nowak et al 2014) que incorporan cálculos de población definidos por el usuario. Luego los valores se convierten al tipo de cambio local con tasas definidas por el usuario.

Para este análisis, el valor de la eliminación de la contaminación se calcula con base en los precios de Col\$3.543.342 por tonelada métrica (monóxido de carbono), Col\$65.232 por tonelada métrica

(ozono), Col\$6.678 por tonelada métrica (dióxido de nitrógeno), Col\$1.888 por tonelada métrica (dióxido de sulfuro), Col\$2.709.706 por tonelada métrica (material particulado menor a 2.5 micrones), Col\$15.858.323 por tonelada métrica (material particulado menor a 10 micrones y mayor a 2.5 micrones).

Almacenamiento y secuestro de carbono:

El almacenamiento de carbono es la cantidad de carbono capturada en las partes de la vegetación leñosa sobre el suelo y bajo el mismo. Para calcular el almacenamiento actual de carbono, se calcula la biomasa de cada árbol usando ecuaciones de la literatura y los datos de los árboles medidos. Los árboles maduros con mantenimiento tienden a tener menos biomasa de la predicha por las ecuaciones de biomasa derivadas del bosque (Nowak 1994). Para ajustar la diferencia, los resultados de la biomasa para árboles urbanos maduros se multiplicaron por 0.8. No se hizo ninguna modificación para árboles en condiciones naturales. La biomasa del peso seco de los árboles se convirtió a carbono almacenado multiplicándola por 0.5.

El secuestro de carbono es la eliminación del dióxido de carbono del aire por las plantas. Para calcular la cantidad bruta de carbono secuestrado anualmente, se añadió el crecimiento promedio del diámetro del género correspondiente y la clase de diámetro y condición del árbol al diámetro existente del mismo (año x) para calcular el diámetro del árbol y el almacenamiento de carbono en el año x+1.

Los valores de almacenamiento y secuestro de carbono se basan en los valores de carbono locales calculados o personalizados. Para los reportes internacionales que no cuentan con valores locales, los cálculos se basan en el valor del carbono para Estados Unidos (Agencia de Protección Ambiental de EEUU 2015, Grupo de Trabajo Interagencial del Costo Social del Carbono 2015) y se convierten al tipo de cambio local con tasas definidas por el usuario.

Para este análisis, los valores de almacenamiento y secuestro de carbono se calculan con base en Col\$617.974 por tonelada métrica.

Producción de oxígeno:

La cantidad de oxígeno producido se calcula a partir del secuestro de carbono con base en los pesos atómicos: liberación neta de O₂ (kg/año) = secuestro neto de C (kg/año) x 32/12. Para calcular el índice de secuestro neto de carbono, la cantidad de carbono secuestrado como resultado del crecimiento del árbol se reduce por la cantidad perdida que resulta de la mortalidad del árbol. Por lo tanto, el secuestro neto de carbono y la producción anual neta de oxígeno del bosque urbano consideran la descomposición (Nowak et al 2007). Para proyectos de inventario completo, la producción de oxígeno se calcula a partir del secuestro bruto de carbono y no considera la descomposición.

Escurrimiento evitado:

El escurrimiento superficial evitado anual se calcula con base en las precipitaciones interceptadas por la vegetación, en particular la diferencia entre el escurrimiento anual con y sin vegetación. Aunque las hojas de los árboles, las ramas y la corteza pueden interceptar la lluvia y mitigar así el escurrimiento evitado, sólo se toman en cuenta las precipitaciones interceptadas por las hojas.

El valor del escurrimiento evitado se basa en los valores locales calculados o los definidos por el

usuario. Para reportes internacionales que no cuentan con valores locales, se utiliza el valor promedio nacional para Estados Unidos y se convierte al tipo de cambio local con tasas definidas por el usuario. El valor de EEUU para el escurrimiento evitado se basa en las Series del Manual de Árboles Comunitarios del Servicio Forestal de EEUU (McPherson et al 1999; 2000; 2001; 2002; 2003; 2004; 2006a; 2006b; 2006c; 2007; 2010; Peper et al 2009; 2010; Vargas et al 2007a; 2007b; 2008).

Para este análisis, el valor del escurrimiento evitado se calcula con base en el precio de

Col\$7.758,73 por m³. Uso de energía de edificios:

Si se recopilaban los datos de campo correspondientes, los efectos estacionales de los árboles en el uso de la energía de edificios residenciales se calcularon con base en los procedimientos descritos en la literatura (McPherson y Simpson 1999) usando la distancia y dirección de los árboles a partir de las estructuras residenciales, la altura de los árboles y los datos de las condiciones de los mismos. Para calcular el valor monetario de los ahorros de energía, se usaron los precios locales o personalizados por MWH o MBTU.

Para este análisis, el valor del ahorro de energía se calcula con base en los precios de Col\$470.000,00 por MWH y Col\$8.740,00 por MBTU.

Valores de sustitución:

El valor de sustitución es el valor de un árbol con base en el mismo recurso físico (p. ej., el costo de tener que reemplazar un árbol con otro similar). Los valores de sustitución se basan en los procedimientos de valoración del Consejo de Tasadores de Árboles y el Paisaje, que usa la información de especie, diámetro, condición y lugar del árbol (Nowak et al 2002a; 2002b). El valor de sustitución puede no incluirse en proyectos internacionales si no se cuentan con datos locales suficientes para concluir los procedimientos de valoración.

Posibles impactos de las plagas:

El análisis completo de posible riesgo de plagas no está disponible para estudios fuera de Estados Unidos. Se reporta el número analizado de árboles en riesgo a las plagas, aunque la lista de plagas se basa en insectos y enfermedades conocidas en Estados Unidos.

Para EEUU, el posible riesgo de plaga se basa en mapas de distribución de plagas y en las especies conocidas hospederas de plagas que posiblemente experimenten mortalidad. Se usaron los mapas de distribución de plagas de 2012 del Equipo de la Empresa de Tecnología de Salud Forestal (FHTET) (Equipo de la Empresa de Tecnología de Salud Forestal 2014) para determinar la proximidad de cada plaga al condado en donde se ubica el bosque urbano. Para el condado, se estableció si el insecto/enfermedad se encuentra en el condado, a 400 kilómetros de la orilla del condado, o una distancia entre 400 y 1210 kilómetros, o una distancia mayor de 1210 kilómetros. FHTET no cuenta con mapas de distribución para la enfermedad holandesa del olmo o chancro del castaño. La distribución de estas plagas se basa en la presencia conocida y en la distribución del hospedero, respectivamente (Centro Occidental de Evaluación de Amenazas Ambientales Forestales; Worrall 2007).

Efectos de los árboles relacionados:

El valor relativo de los beneficios de los árboles reportado en el Apéndice II se calcula para mostrar a

lo que el almacenamiento y secuestro de carbono y la eliminación de la contaminación del aire equivalen en cantidades de emisiones de carbono municipal, emisiones de automóviles de pasajeros y emisiones de viviendas.

Las emisiones de carbono municipal se basan en las emisiones de carbono per cápita de EEUU 2010 (Centro de Análisis de la Información de Dióxido de Carbono 2010). Las emisiones per cápita se multiplicaron por la población de la ciudad para calcular las emisiones totales de carbono de la ciudad.

Los índices de emisión de vehículos ligeros (g/mi) para CO, NO_x, COV, PM₁₀, SO₂ para 2010 (Buró de Estadística del Transporte 2010; Heirigs et al 2004), PM_{2.5} para 2011-2015 (Junta de Recursos del Aire de California 2013) y CO₂ para 2011 (Agencia de Protección Ambiental de EEUU 2010) se multiplicaron por las millas promedio conducidas por vehículo en 2011 (Administración Federal de Caminos 2013) para determinar las emisiones promedio por vehículo.

Las emisiones de las viviendas se basan en la electricidad promedio kWh utilizada, gas natural Btu utilizado, gasolina Btu utilizada, keroseno Btu utilizado, LPG Btu utilizado, y madera Btu utilizada por vivienda en 2009 (Administración de Información de Energía 2013; Administración de Información de Energía 2014)

- Las emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x de las plantas eléctricas por kWh son de Leonardo Academy 2011. La emisión de CO por kWh asume que 1/3 del uno por ciento de emisiones de C es CO con base en la Administración de Información de Energía 1994. La emisión de PM₁₀ por kWh de Layton 2004.
- Las emisiones de CO₂, NO_x, SO₂ y CO por Btu para gas natural, propano y butano (promedio usado para representar LPG), Combustible #4 y #6 (promedio usado para representar gasolina y keroseno) de Leonardo Academy 2011.
- Las emisiones de CO₂ por Btu de madera de la Administración de Información de Energía 2014.
- Las emisiones de CO, NO_x y Sox por Btu con base en el total de emisiones y quema de madera (toneladas) de (Ministerio de la Columbia Británica 2005; Comisión de Silvicultura de Georgia 2009).

Apéndice II. Efectos de los árboles relacionados

El bosque urbano en MUNICIPIO DE TULUÁ brinda beneficios que incluyen el almacenamiento y secuestro de carbono y la eliminación de la contaminación del aire. Para calcular el valor relativo de dichos beneficios, se compararon los beneficios de los árboles con los cálculos de las emisiones promedio de carbono municipales, las emisiones promedio de los automóviles de pasajeros y las emisiones promedio de las viviendas. Ver Apéndice I para las metodologías.

El almacenamiento de carbono equivale a:

- Cantidad de carbono emitido en MUNICIPIO DE TULUÁ en 1 días
- Emisiones anuales de carbono (C) de 282 automóviles
- Emisiones anuales de C de 116 viviendas unifamiliares

La eliminación de monóxido de carbono equivale a:

- Emisiones anuales de monóxido de carbono de 0 automóviles
- Emisiones anuales de monóxido de carbono de 1 viviendas unifamiliares

La eliminación de dióxido de nitrógeno equivale a:

- Emisiones anuales de dióxido de nitrógeno de 7 automóviles
- Emisiones anuales de dióxido de nitrógeno de 3 viviendas unifamiliares

La eliminación de dióxido de sulfuro equivale a:

- Emisiones anuales de dióxido de sulfuro de 222 automóviles
- Emisiones anuales de dióxido de carbono de 1 viviendas unifamiliares

El secuestro anual de carbono equivale a:

- Cantidad de carbono emitida en MUNICIPIO DE TULUÁ en 0,0 días
- Emisiones anuales de C de 0 automóviles
- Emisiones anuales de C de 0 viviendas unifamiliares

Apéndice III. Comparación de bosques urbanos

Una pregunta común es, “¿cómo se compara esta ciudad con otras?” Aunque la comparación entre ciudades debe hacerse con precaución ya que hay muchas características de una ciudad que afectan a la estructura y las funciones del bosque urbano, se proporcionan los datos resumidos de otras ciudades analizadas con el modelo i-Tree Eco.

I. Total de beneficios según cantidad de árboles por ciudad.

Ciudad	% de cobertura de los árboles	Número de árboles	Almacenamiento de carbono (toneladas)	Secuestro de carbono (toneladas/año)	Eliminación de la contaminación (toneladas/año)
Toronto, ON, Canada	26,6	10.220.000	1.108.000	46.700	1.905
Atlanta, GA	36,7	9.415.000	1.220.000	42.100	1.509
Los Angeles, CA	11,1	5.993.000	1.151.000	69.800	1.792
New York, NY	20,9	5.212.000	1.225.000	38.400	1.521
London, ON, Canada	24,7	4.376.000	360.000	12.500	370
Chicago, IL	17,2	3.585.000	649.000	22.800	806
Phoenix, AZ	9,0	3.166.000	286.000	29.800	511
Baltimore, MD	21,0	2.479.000	517.000	16.700	390
Philadelphia, PA	15,7	2.113.000	481.000	14.600	522
Washington, DC	28,6	1.928.000	477.000	14.700	379
Oakville, ON , Canada	29,1	1.908.000	133.000	6.000	172
Albuquerque, NM	14,3	1.846.000	301.000	9.600	225
Boston, MA	22,3	1.183.000	290.000	9.500	257
Syracuse, NY	26,9	1.088.000	166.000	5.300	99
Woodbridge, NJ	29,5	986.000	145.000	5.000	191
Minneapolis, MN	26,4	979.000	227.000	8.100	277
San Francisco, CA	11,9	668.000	176.000	4.600	128
Morgantown, WV	35,5	658.000	84.000	2.600	65
Moorestown, NJ	28,0	583.000	106.000	3.400	107
Hartford, CT	25,9	568.000	130.000	3.900	52
Jersey City, NJ	11,5	136.000	19.000	800	37
Casper, WY	8,9	123.000	34.000	1.100	34
Freehold, NJ	34,4	48.000	18.000	500	20

II. Beneficios según cantidad de área por ciudad.

Ciudad	Número de árboles/ha	Almacenamiento de carbono (toneladas/ha)	Secuestro de carbono (toneladas/ha/año)	Eliminación de la contaminación (kg/ha/año)
Toronto, ON, Canada	160,4	17,4	0,73	29,9
Atlanta, GA	275,8	35,7	1,23	44,2
Los Angeles, CA	48,4	9,4	0,36	14,7
New York, NY	65,2	15,3	0,48	19,0
London, ON, Canada	185,5	15,3	0,53	15,7
Chicago, IL	59,9	10,9	0,38	13,5
Phoenix, AZ	31,8	2,9	0,30	5,1
Baltimore, MD	118,5	25,0	0,80	18,6
Philadelphia, PA	61,9	14,1	0,43	15,3
Washington, DC	121,1	29,8	0,92	23,8
Oakville, ON , Canada	192,9	13,4	0,61	12,4
Albuquerque, NM	53,9	8,8	0,28	6,6
Boston, MA	82,9	20,3	0,67	18,0
Syracuse, NY	167,4	23,1	0,77	15,2
Woodbridge, NJ	164,4	24,2	0,84	31,9
Minneapolis, MN	64,8	15,0	0,53	18,3
San Francisco, CA	55,7	14,7	0,39	10,7
Morgantown, WV	294,5	37,7	1,17	29,2
Moorestown, NJ	153,4	27,9	0,90	28,1
Hartford, CT	124,6	28,5	0,86	11,5
Jersey City, NJ	35,5	5,0	0,21	9,6
Casper, WY	22,5	6,2	0,20	6,2
Freehold, NJ	94,6	35,9	0,98	39,6

Apéndice IV. Recomendaciones generales para el mejoramiento de la calidad del aire

La vegetación urbana puede afectar de manera directa e indirecta a la calidad del aire local y regional al alterar el ambiente de la atmósfera urbana. Cuatro formas principales en las que los árboles urbanos afectan la calidad del aire son (Nowak 1995):

- Reducción de la temperatura y otros efectos del microclima
- Eliminación de los contaminantes del aire
- Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) y emisiones del mantenimiento de los árboles
- Efectos de la energía en los edificios

Los efectos acumulativos e interactivos de los árboles en el clima, la eliminación de la contaminación y las emisiones de COV y de las plantas eléctricas determinan el impacto de los árboles en la contaminación del aire. Los estudios acumulativos de los impactos de los árboles urbanos en el ozono han revelado que el aumento en la cobertura del dosel urbano, en particular con especies de baja emisión de COV, conduce a la reducción en las concentraciones de ozono en las ciudades (Nowak 2000). Las decisiones de manejo urbano de la localidad pueden ayudar a mejorar la calidad del aire.

Las estrategias de manejo del bosque urbano para ayudar a mejorar la calidad del aire incluyen (Nowak 2000):

<i>Estrategia</i>	<i>Resultado</i>
Aumenta el número de árboles saludables	Aumenta la eliminación de la contaminación
Mantener la cobertura de los árboles actual	Mantiene los niveles de eliminación de la contaminación
Maximiza el uso de árboles de baja emisión de COV	Reduce la formación de ozono y monóxido de carbono
Mantener árboles grandes, saludables	Los árboles más grandes tienen mayores efectos por árbol
Usar árboles duraderos	Reducir las emisiones de contaminantes a largo plazo de la siembra y la eliminación
Usar árboles de bajo mantenimiento	Reducir las emisiones de contaminantes de las actividades de mantenimiento
Reducir el uso de combustibles fósiles en el mantenimiento de la vegetación	Reducir las emisiones de los contaminantes
Sembrar árboles en lugares que conservan energía	Reducir las emisiones de contaminantes de centrales eléctricas
Sembrar árboles para darle sombra a autos estacionados	Reduce las emisiones vehiculares de COV
Suministrar mucha agua a la vegetación	Mejora la eliminación de la contaminación y la reducción de la temperatura
Sembrar árboles en áreas contaminadas o muy pobladas	Maximiza los beneficios de la calidad del aire de los árboles
Evita especies sensibles a la contaminación	Mejora la salud del árbol
Utilizar árboles siempre verdes para material particulado	Eliminación de partículas durante todo el año

References

- Abdollahi, K.K.; Ning, Z.H.; Appeaning, A., eds. 2000. Global climate change and the urban forest. Baton Rouge, LA: GCRCC and Franklin Press. 77 p.
- Animal and Plant Health Inspection Service. 2010. Plant Health – Asian longhorned beetle. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Animal and Plant Health Inspection Service.
- Baldocchi, D. 1988. A multi-layer model for estimating sulfur dioxide deposition to a deciduous oak forest canopy. *Atmospheric Environment*. 22: 869-884.
- Baldocchi, D.D.; Hicks, B.B.; Camara, P. 1987. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment*. 21: 91-101.
- Bidwell, R.G.S.; Fraser, D.E. 1972. Carbon monoxide uptake and metabolism by leaves. *Canadian Journal of Botany*. 50: 1435-1439.
- British Columbia Ministry of Water, Land, and Air Protection. 2005. Residential wood burning emissions in British Columbia. British Columbia.
- Broecker, W.S. 1970. Man's oxygen reserve. *Science* 168(3939): 1537-1538.
- Bureau of Transportation Statistics. 2010. Estimated National Average Vehicle Emissions Rates per Vehicle by Vehicle Type using Gasoline and Diesel. Washington, DC: Bureau of Transportation Statistics, U.S. Department of Transportation. Table 4-43.
- Burnside, R.E.; Holsten, E. H.; Fettig, C.J.; Kruse, J. J.; Schultz, M.E.; Hayes, C.J.; Graves, A.D.; Seybold, S.J. 2011. Northern Spruce Engraver. Forest Insect & Disease Leaflet 180. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 12 p.
- California Air Resources Board. 2013. Methods to Find the Cost-Effectiveness of Funding Air Quality Projects. Table 3 Average Auto Emission Factors. CA: California Environmental Protection Agency, Air Resources Board.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center. 2010. CO2 Emissions (metric tons per capita). Washington, DC: The World Bank.
- Cardelino, C.A.; Chameides, W.L. 1990. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *Journal of Geophysical Research*. 95(D9): 13,971-13,979.
- Childs, R. 2011. Winter Moth Identification and Management. Amherst, MA: University of Massachusetts Amherst, Landscape, Nursery & Urban Forestry Program.
- Ciesla, W. M. 2001. *Tomicus piniperda*. North American Forest Commission. Exotic Forest Pest Information System for North America (EXFOR).
- Ciesla, W. M.; Kruse, J. J. 2009. Large Aspen Tortrix. Forest Insect & Disease Leaflet 139. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 8 p.

Clarke, S. R.; Nowak, J.T. 2009. Southern Pine Beetle. Forest Insect & Disease Leaflet 49. Washington, DC: U.S.

Department of Agriculture, Forest Service. 8 p.

Cranshaw, W.; Tisserat, N. 2009. Walnut twig beetle and the thousand cankers disease of black walnut. Pest Alert. Ft. Collins, CO: Colorado State University.

Seybold, S.; Haugen, D.; Graves, A. 2010. Thousand Cankers Disease. Pest Alert. NA-PR-02-10. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry.

DeMars, C. J., Jr.; Roettgering, B. H. 1982. Western Pine Beetle. Forest Insect & Disease Leaflet 1. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 8 p.

Diller, J. D. 1965. Chestnut Blight. Forest Pest Leaflet 94. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 7 p.

Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center. Dutch Elm Disease.
<http://threatsummary.forestthreats.org/threats/threatSummaryViewer.cfm?threatID=43>

Energy Information Administration. 1994. Energy Use and Carbon Emissions: Non-OECD Countries. Washington, DC: Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.

Energy Information Administration. 2013. CE2.1 Fuel consumption totals and averages, U.S. homes. Washington, DC: Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.

Energy Information Administration. 2014. CE5.2 Household wood consumption. Washington, DC: Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.

Federal Highway Administration. 2013. Highway Statistics 2011. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Table VM-1.

Fellin, D. G.; Dewey, J. E. 1986. Western Spruce Budworm. Forest Insect & Disease Leaflet 53. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 10 p.

Ferrell, G. T. 1986. Fir Engraver. Forest Insect & Disease Leaflet 13. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 8 p.

Georgia Forestry Commission. 2009. Biomass Energy Conversion for Electricity and Pellets Worksheet. Dry Branch, GA: Georgia Forestry Commission.

Gibson, K.; Kegley, S.; Bentz, B. 2009. Mountain Pine Beetle. Forest Insect & Disease Leaflet 2. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 12 p.

Haugen, D. A.; Hoebeke, R. E. 2005. Sirex woodwasp - Sirex noctilio F. (Hymenoptera: Siricidae). Pest Alert. NA-PR-07-05. Newtown Square, PA: Department of Agriculture, Forest Service, Northern Area State and Private Forestry.

Heirigs, P.L.; Delaney, S.S.; Dulla, R.G. 2004. Evaluation of MOBILE Models: MOBILE6.1 (PM),

MOBILE6.2 (Toxics), and MOBILE6/CNG. Sacramento, CA: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board.

Hessburg, P. F.; Goheen, D. J.; Bega, R.V. 1995. Black Stain Root Disease of Conifers. Forest Insect & Disease Leaflet 145. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Hessburg, P. F.; Goheen, D. J.; Bega, R.V. 1995. Black Stain Root Disease of Conifers. Forest Insect & Disease Leaflet 145. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Hirabayashi, S. 2011. Urban Forest Effects-Dry Deposition (UFORE-D) Model Enhancements, [http://www.itreetools.org/eco/resources/UFORE-D enhancements.pdf](http://www.itreetools.org/eco/resources/UFORE-D%20enhancements.pdf)

Hirabayashi, S. 2012. i-Tree Eco Precipitation Interception Model Descriptions, http://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Precipitation_Interception_Model_Descriptions_V1_2.pdf

Hirabayashi, S.; Kroll, C.; Nowak, D. 2011. Component-based development and sensitivity analyses of an air pollutant drydeposition model. *Environmental Modeling and Software*. 26(6): 804-816.

Hirabayashi, S.; Kroll, C.; Nowak, D. 2012. i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions V 1.0

Holsten, E.H.; Thier, R.W.; Munson, A.S.; Gibson, K.E. 1999. The Spruce Beetle. Forest Insect & Disease Leaflet 127. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 12 p.

Houston, D. R.; O'Brien, J. T. 1983. Beech Bark Disease. Forest Insect & Disease Leaflet 75. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 8 p.

Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government. 2015. Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866. [http:// www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/inforeg/scc-tsd-final-july-2015.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/inforeg/scc-tsd-final-july-2015.pdf)

Kliejunas, J. 2005. *Phytophthora ramorum*. North American Forest Commission. Exotic Forest Pest Information System for North America (EXFOR).

Kruse, J.; Ambourn, A.; Zogas, K. 2007. Aspen Leaf Miner. Forest Health Protection leaflet. R10-PR-14. Juneau, AK: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Alaska Region.

Kucera, D. R.; Orr, P. W. 1981. Spruce Budworm in the Eastern United States. Forest Pest Leaflet 160. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 8 p.

Layton, M. 2004. 2005 Electricity Environmental Performance Report: Electricity Generation and Air Emissions. CA: California Energy Commission.

Leonardo Academy. 2011. Leonardo Academy's Guide to Calculating Emissions Including Emission Factors and Energy Prices. Madison, WI: Leonardo Academy Inc.

Liebhold, A. 2010 draft. Personal communication on the geographic distribution of forest pest species.

Lovett, G.M. 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective. *Ecological Applications*. 4: 629-650.

McPherson, E.G.; Maco, S.E.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Xiao, Q.; VanDerZanden, A.M.; Bell, N. 2002. *Western Washington and Oregon Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting*. International Society of Arboriculture, PacificNorthwest, Silverton, OR.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R. 1999. Carbon dioxide reduction through urban forestry: guidelines for professional and volunteer tree planters. Gen. Tech. Rep. PSW-171. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 237 p.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Crowell, A.M.N.; Xiao, Q. 2010. Northern California coast community tree guide: benefits, costs, and strategic planting. PSW-GTR-228. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-228. U.S. Department of

Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Gardner, S.L.; Vargas, K.E.; Maco, S.E.; Xiao, Q. 2006a. *Coastal Plain Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting* PSW-GTR-201. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Gardner, S.L.; Vargas, K.E.; Xiao, Q. 2007. *Northeast community tree guide: benefits, costs, and strategic planting*.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Maco, S.E.; Gardner, S.L.; Cozad, S.K.; Xiao, Q. 2006b. *Midwest Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting* PSW-GTR-199. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Maco, S.E.; Gardner, S.L.; Vargas, K.E.; Xiao, Q. 2006c. *Piedmont Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting* PSW-GTR 200. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Maco, S.E.; Xiao Q.; Mulrean, E. 2004. *Desert Southwest Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting*. Phoenix, AZ: Arizona Community Tree Council, Inc. 81 :81.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Scott, K.I.; Xiao, Q. 2000. *Tree Guidelines for Coastal Southern California Communities*. Local Government Commission, Sacramento, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Xiao, Q. 1999. *Tree Guidelines for San Joaquin Valley Communities*. Local Government Commission, Sacramento, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Xiao, Q.; Maco, S.E.; Hoefler, P.J. 2003. *Northern Mountain and Prairie Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting*. Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Xiao, Q.; Pittenger, D.R.; Hodel, D.R. 2001. *Tree Guidelines for Inland Empire Communities*. Local Government Commission, Sacramento, CA.

Michigan State University. 2010. Emerald ash borer. East Lansing, MI: Michigan State University [and others].

Mielke, M. E.; Daughtrey, M. L. How to Identify and Control Dogwood Anthracnose. NA-GR-18. Broomall, PA: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area and Private Forestry.

Murray, F.J.; Marsh L.; Bradford, P.A. 1994. New York State Energy Plan, vol. II: issue reports. Albany, NY: New York State Energy Office.

Nicholls, T. H.; Anderson, R. L. 1977. How to Identify White Pine Blister Rust and Remove Cankers. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry

Northeastern Area State and Private Forestry. 1998. How to identify and manage Dutch Elm Disease. NA-PR-07-98. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry.

Northeastern Area State and Private Forestry. 2005. Gypsy moth digest. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry.

Nowak, D.J. 1994. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In: McPherson, E.G.; Nowak, D.J.; Rowntree, R.A., eds. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Gen. Tech.

Rep. NE-186. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: 83-94.

Nowak, D.J. 1995. Trees pollute? A "TREE" explains it all. In: Proceedings of the 7th National Urban Forestry Conference. Washington, DC: American Forests: 28-30.

Nowak, D.J. 2000. The interactions between urban forests and global climate change. In: Abdollahi, K.K.; Ning, Z.H.; Appeaning, A., eds. Global Climate Change and the Urban Forest. Baton Rouge, LA: GCRCC and Franklin Press: 31-44.

Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Greenfield, E. 2014. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. Environmental Pollution. 193:119-129.

Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R. 2013. Modeled PM2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. Environmental Pollution. 178: 395-402.

Nowak, D.J.; Civerolo, K.L.; Rao, S.T.; Sistla, S.; Luley, C.J.; Crane, D.E. 2000. A modeling study of the impact of urban trees on ozone. Atmospheric Environment. 34: 1601-1613.

Nowak, D.J.; Crane, D.E. 2000. The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions. In: Hansen, M.; Burk, T., eds. Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. Proceedings of IUFRO conference. Gen. Tech. Rep. NC-212. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station: 714-720.

Nowak, D.J.; Crane, D.E.; Dwyer, J.F. 2002a. Compensatory value of urban trees in the United States.

Journal of Arboriculture. 28(4): 194 - 199.

Nowak, D.J.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; Hoehn, R.E. 2005. The urban forest effects (UFORE) model: field data collection manual. V1b. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 34 p.
http://www.fs.fed.us/ne/syracuse/Tools/downloads/UFORE_Manual.pdf

Nowak, D.J.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; Ibarra, M. 2002b. Brooklyn's urban forest. Gen. Tech. Rep. NE-290. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 107 p.

Nowak, D.J.; Dwyer, J.F. 2000. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: Kuser, John, ed. Handbook of urban and community forestry in the northeast. New York, NY: Kluwer Academics/Plenum: 11-22.

Nowak, D.J.; Hoehn, R.; Crane, D. 2007. Oxygen production by urban trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*. 33(3):220-226.

Nowak, D.J.; Hoehn, R.E.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; Walton, J.T; Bond, J. 2008. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Arboriculture and Urban Forestry*. 34(6): 347-358.

Nowak, D.J.; Stevens, J.C.; Sisinni, S.M.; Luley, C.J. 2002c. Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*. 28(3): 113-122.

Ostry, M.E.; Mielke, M.E.; Anderson, R.L. 1996. How to Identify Butternut Canker and Manage Butternut Trees. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.

Peper, P.J.; McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Albers, S.N.; Xiao, Q. 2010. Central Florida community tree guide: benefits, costs, and strategic planting. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-230. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

Peper, P.J.; McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Vargas, K.E.; Xiao Q. 2009. Lower Midwest community tree guide: benefits,