

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“EVALUACIÓN DE LA CAPTACIÓN DE PARTÍCULAS
SUSPENDIDAS Y ABSORCIÓN DE CO₂ POR SEIS ESPECIES DE
ÁRBOLES EN HERMOSILLO, SONORA”**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA

ANA LILIA MURRIETA CASTRO

DIRECTOR DE TESIS

DRA. CARMEN ISELA ORTEGA ROSAS

HERMOSILLO, SONORA

OCTUBRE, 2025

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

T E S I S

**EVALUACIÓN DE LA CAPTACIÓN DE PARTÍCULAS
SUSPENDIDAS Y ABSORCIÓN DE CO₂ POR SEIS ESPECIES DE
ÁRBOLES EN HERMOSILLO, SONORA**

COMITÉ REVISOR

Dra. Carmen Isela Ortega Rosas
Director

M.C. Aldo Hiram Gutiérrez Saldaña
Codirector

Dra. Diana María Meza Figueroa
Secretario

Dr. Daniel Morales Romero
Vocal 1

M.C. Jesús Antonio Orozco Avitia
Vocal 2

Hermosillo, Sonora

Octubre, 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi comité de tesis por su asesoramiento durante mis estudios y trabajo de investigación, en especial a mi directora por su gran paciencia y comprensión.

Al núcleo académico de la maestría, por sus observaciones y consejos durante la realización de mi trabajo.

A UES, por darme el lugar y espacio para continuar con mi preparación académica.

A CONAHCYT, por proporcionarme los medios económicos durante mis estudios.

A la Dra. Belém González, por su valioso apoyo en el análisis geoquímico de las muestras de partículas.

Al Dr. César Hinojo y Laura Arvizu, por su valioso apoyo en la toma de fotografías digitales y asesoramiento para la obtención del índice de área foliar.

A la Lic. Amparo Fontanot, directora de Parques y Jardines, por su autorización para la donación de árboles y a Luis Ignacio González, por su apoyo en todo momento.

A mis compañeros y amigos Alicia Álvarez, Gabriela Luna, Óscar Gutiérrez y Jubal Díaz por su motivación y buenos momentos compartidos durante la maestría.

A mis amigos y colegas Paloma Montijo, Odeth Muñoz, Irma Otero, José Romero y Leonardo Cárdenas, por su motivación y acompañamiento constante.

A mi querido *team hojitas*: Liliana Rodríguez, Laura Juárez y José Aradid Pérez (Pepe), por su gran apoyo durante el trabajo de campo y laboratorio. El calor, polvo y espinas, pero sobre todo las risas, nunca faltaron.

A María Hinojosa, también por su valioso apoyo durante el trabajo de campo.

A Manuel Ordoñez, por su motivación constante en cumplir mis objetivos y alcanzar nuevas metas.

A mi Mamá, por su apoyo incondicional, comprensión, amor y motivación para llevar a cabo mis objetivos e intereses.

A Emanuel Quiroz, cuya motivación, confianza, comprensión y amor me dieron los ánimos y el último empujón que necesitaba.

Finalmente, a todas las personas que esperaron ansiosas los resultados de esta investigación, su interés fue un motor que me impulsó a realizar mi trabajo de la mejor manera posible.

DEDICATORIA

A mi Mamá.

Por siempre acompañarme durante mi camino,

aun cuando no sabía a dónde ir.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
RESUMEN	7
MARCO TEÓRICO	10
Ecosistema Urbano.....	10
Contaminación del Aire, Cambio Climático y Salud	11
Soluciones Basadas en la Naturaleza: Áreas Verdes	17
Vegetación Urbana.....	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
JUSTIFICACIÓN	21
HIPÓTESIS	22
OBJETIVOS.....	23
Objetivo General	23
Objetivos Específicos	23
METODOLOGÍA	24
Descripción del Área de Estudio.....	24
Clima y Caracterización Física	25
Ecosistema y Tipos de Vegetación	25
Selección de Árboles.....	26
Descripción de Especies: Fichas Técnicas	27
Cuantificación de Partículas Suspendidas	28
Marcaje de Individuos y Limpieza de Hojas.....	28
Muestreo de Follaje y Procesamiento en Laboratorio	29
Estimación de la Captación de Partículas Suspendidas en el Dosel.....	33
Análisis Estadístico: Comparación de Medias entre Especies, Sitios y Estaciones	36
Medición de CO ₂	36
Medición del Área Foliar y Observación de Estomas	39
Obtención del Uso Eficiente del Agua	40

<i>Análisis Estadístico: Comparación de Medias entre Especies</i>	40
RESULTADOS	41
Captación de Partículas Suspendidas	41
<i>Captación por Especie y Estación</i>	41
<i>Captación por Estación</i>	43
<i>Captación por Sitio y Estación</i>	43
<i>Captación por Especie y Sitio</i>	45
<i>Comparación de Medias de la Captación de PS</i>	48
<i>Captación Total en Dosel de las Especies de Estudio</i>	50
<i>Caracterización Geoquímica</i>	52
Absorción de CO₂	59
<i>Mediciones Bajo Condiciones de Estrés Hídrico</i>	59
<i>Mediciones Estacionales</i>	62
<i>Comparación de Medias en la Absorción de CO₂</i>	66
DISCUSIONES	68
Capacidad de los Árboles para Mitigar la Contaminación del Aire en Zonas Urbanas	68
Capacidad de los Árboles para Mitigar el Cambio Climático y Uso Eficiente del Agua en Zonas Urbanas	72
Especies más Eficientes para Reforestar y Mejorar el Ambiente Urbano en Hermosillo, Sonora	74
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	80
LITERATURA CITADA	81
ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Especies de estudio.	27
Tabla 2 Comparación de medias de la captación de PS por las especies de estudio en primavera mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.	48
Tabla 3 Comparación de medias de la captación de PS por las especies de estudio en invierno mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.	49
Tabla 4 Comparación de medias de la captación total (primavera + invierno) de PS por sitio de muestreo mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$	49
Tabla 5 Comparación de medias de la captación de PS por sitio de muestreo en primavera mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.	50
Tabla 6 Masa foliar y peso de PS en kg por individuo.	50
Tabla 7 Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de <i>N. velutina</i> en Panteón Yáñez.	53
Tabla 8 Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de <i>P. florida</i> en Panteón Yáñez.	54
Tabla 9 Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de <i>O. tesota</i> en UNISON.	55
Tabla 10 Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de <i>A. indica</i> en UNISON.	56

Tabla 11	Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de <i>T. buceras</i> en Panteón Yáñez.	57
Tabla 12	Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de <i>N. chilensis</i> en UNISON.	58
Tabla 13	Promedios de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en las cuatro estaciones por especie.	65
Tabla 14	Comparación de medias de la fotosíntesis instantánea (A_i) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico mediante la prueba de Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.	66
Tabla 15	Comparación de medias de la transpiración (E) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico mediante la prueba de Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.	67
Tabla 16	Comparación de medias de la fotosíntesis instantánea (A_i) de las especies en las diferentes estaciones del año mediante la prueba de Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$	67
Tabla 17	Ponderación de especies para utilizar en la reforestación de Hermosillo, Sonora.	74
Tabla 18	Ranking de especies para utilizar en la reforestación de Hermosillo, Sonora.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	24
Ubicación de los sitios de muestreo: Universidad Estatal de Sonora (UES) y Panteón Yáñez en Zona Norte, Instituto Tecnológico de Hermosillo (ITH) en Zona Noroeste, Universidad de Sonora (UNISON) en Zona Centro en la ciudad de Hermosillo, Sonora	
Figura 2	29
Marcaje y limpieza de hojas de <i>N. chilensis</i>	
Figura 3	30
A) Pesaje de las muestras de hojas; B) Almacenamiento de las muestras en hielera; C) Almacenamiento de las muestras en refrigerador.	
Figura 4	31
A) Muestras de hojas sumergidas en agua destilada en vasos de precipitado en reposo después de la agitación para desprender partículas; B) Hojas extraídas de los vasos de precipitado después del reposo; C) Agua de limpieza con partículas en proceso de evaporación en estufa eléctrica; D) Porciones de agua sobrante para su posterior filtración.	
Figura 5	32
A) Vertimiento de agua con partículas en embudo para su filtración; B) Muestras de agua con partículas en proceso de filtración; C) Partículas obtenidas después del proceso de filtración; D) Pesaje de partículas en báscula analítica	
Figura 6	33
A) Vertimiento de partículas con micro tubo; B) Micro tubos con partículas C) Micro tubo con partículas etiquetado con clave de las especies de estudio; D) Análisis de partículas en SEM-EDS.	

Figura 7	Colocación de cámara fotográfica bajo la copa de uno de los individuos muestreados de <i>T. buceras</i> .	34
Figura 8	Individuos de trabajo en macetas dentro de invernadero.	37
Figura 9	A) Medición de gases en hoja de <i>N. chilensis</i> B) Medición de PHS en sustrato de <i>O. tesota</i> .	38
Figura 10	A) Instalación del equipo medidor de gases B) Medición de CO ₂ en árbol de adulto de <i>O. tesota</i> .	39
Figura 11	Promedios del peso en g de las PS capturadas en las muestras de hojas de las especies de estudio en primavera.	41
Figura 12	Promedios del peso en g de las PS capturadas en las muestras de hojas de las especies de estudio en invierno.	42
Figura 13	Captación total en g de las PS en las muestras de hojas de las especies de estudio.	42
Figura 14	Captación total en g de PS por estación.	43
Figura 15	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo en primavera.	43
Figura 16	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo en invierno.	44
Figura 17	Captación total en g de las PS en los sitios de muestreo.	44
Figura 18	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie <i>N. velutina</i> .	45
Figura 19	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie <i>P. florida</i> .	46

Figura 20	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie <i>O. tesota</i> .	46
Figura 21	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie <i>A. indica</i> .	47
Figura 22	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie <i>T. buceras</i> .	47
Figura 23	Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie <i>N. chilensis</i> .	48
Figura 24	Promedios del mayor al menor por especie del peso en kg de las PS capturadas en un mes.	51
Figura 25	Distribución del tamaño de partículas (PS) capturadas por las distintas especies de estudio, análisis realizado en SEM.	52
Figura 26	Cantidad de CO ₂ absorbido (Ai) por las especies de estudio.	59
Figura 27	Cantidad de CO ₂ absorbido por kg de agua perdida (UEA) de las especies de estudio.	60
Figura 28	Valores promedio de Ai ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico.	61
Figura 29	Valores promedio de E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico.	61
Figura 30	Valores promedio de UEA ($\text{g CO}_2 (\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico.	62
Figura 31	Valores promedio de Ai ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en otoño.	63

Figura 32	Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en invierno.	63
Figura 33	Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en primavera.	64
Figura 34	Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en verano.	65
Figura 35	Promedios del mayor al menor de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en las cuatro estaciones de las especies de estudio.	66
Figura 36	Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo, Sonora, periodo enero a septiembre del 2024 para partículas suspendidas $\text{PM}_{2.5}$, promedios diarios. Valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA.	69

RESUMEN

La vegetación urbana, principalmente a través de su follaje o dosel, contribuye en la disminución de contaminantes atmosféricos del aire tales como gases y partículas suspendidas (PS). Dichos contaminantes afectan la salud de las personas, principalmente aquellas con alguna pre disposición a enfermedades pulmonares o cardíacas. Bajo este escenario, es necesario identificar qué especies de árboles usados en los espacios urbanos de la ciudad de Hermosillo, Sonora, son más eficientes en disminuir dichos contaminantes y tienen una menor huella hídrica para su mantenimiento. Por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar la captura de PS, absorción de CO₂ y uso eficiente de agua (UEA) de seis especies de árboles: *Parkinsonia florida*, *Olneya tesota*, *Neltuma velutina*, *Azadirachta indica*, *Terminalia buceras* y *Neltuma chilensis*. Estas especies fueron evaluadas en espacios públicos, así como en invernadero creciendo en macetas bajo condiciones de estrés hídrico. Los resultados indican que la especie que tuvo la mayor cantidad de PS capturadas durante la primavera fue *P. florida* con un valor de 0.5335 g, mientras que *A. indica* lo fue en invierno con un valor de 0.5969 g. En cuanto a la absorción de CO₂, las especies que presentaron una mayor asimilación fueron *N. chilensis* y *N. velutina*, con valores de 13.957 y 12.490 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, siendo *N. chilensis* también la especie con mayor pérdida de agua por CO₂ fijado con un valor de 8.287 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹ y *O. tesota* la especie con la menor pérdida de agua por CO₂ fijado con un valor de 3.990 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹.

Palabras clave: *Vegetación urbana; Contaminantes atmosféricos; Partículas suspendidas; Dióxido de carbono; Hermosillo, Sonora*

INTRODUCCIÓN

En los últimos 50 años, la población mundial se ha duplicado hasta alcanzar los 7.800 millones de personas, con ello el uso de los recursos naturales se ha triplicado, y continua en aumento para abastecer nuestras necesidades, provocando la alteración de los ecosistemas y los servicios que estos proveen a un ritmo sin precedentes, disminuyendo la capacidad de la naturaleza para favorecer la salud y bienestar humano (Panel Internacional de Recursos [PIR], 2019; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2021).

Nos enfrentamos ante una triple crisis planetaria que amenaza el bienestar y supervivencia de millones de personas en el mundo impulsada por la sobreexplotación de los recursos naturales: el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad y la contaminación (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2022; PIR, 2024). Siendo cada uno de estos problemas una crisis en sí misma, con sus propias causas y efectos, pero que convergen y se retroalimentan (Yaniz-Estrada, 2024).

La extracción y el procesamiento desmedido de los recursos naturales en las últimas dos décadas es responsable de más del 90% de la pérdida de biodiversidad, del estrés hídrico, de más del 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y del 40% de los impactos relacionados con la contaminación del aire por partículas, principalmente PM_{2.5}, en la salud humana (PIR, 2019; 2024).

Las zonas urbanas están creciendo a ritmos acelerados, consumiendo dos tercios de la energía del mundo y contribuyendo con una parte significativa de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) (ONU Hábitat, 2021). La sociedad está lejos de cumplir el Acuerdo de París de limitar el calentamiento global a un nivel muy inferior a los 2 °C por encima de los niveles pre industriales y de procurar contener aún más el aumento de la temperatura para mantenerlo por debajo de 1.5 °C; al ritmo actual, el calentamiento alcanzará los 1.5 °C en torno a 2040 y probablemente antes (PNUMA, 2021).

Un crecimiento proyectado del 60% en el uso de recursos naturales para 2060 podría descarrilar los esfuerzos para lograr no sólo los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS)

en materia de clima, biodiversidad y contaminación, sino también la prosperidad económica y el bienestar humano (PIR, 2024). Por ello, las ciudades y otros asentamientos –especialmente las zonas urbanas de rápida expansión y los asentamientos informales– deben hacerse más sostenibles y los gobiernos deben abandonar las subvenciones perjudiciales para el medio ambiente, invirtiendo en tecnologías con bajas emisiones de carbono y soluciones basadas en la naturaleza (SbN), las cuales pueden ser medios rentables para reducir la contaminación, hacer las ciudades más resilientes ante las consecuencias el cambio climático y más respetuosas con el medio ambiente para alcanzar los ODS (PNUMA, 2021).

Las SbN constituyen un elemento esencial del esfuerzo general a nivel mundial para lograr las metas del Acuerdo de París sobre cambio climático, se estima que pueden suponer entre el 35% y el 40% de las medidas de mitigación necesarias de aquí al 2030 para limitar el calentamiento a 2 °C, promoviendo la armonía entre las personas y la naturaleza, así como el desarrollo ecológico, son eficaces, de largo plazo, rentables y aplicables a nivel mundial (PNUMA, 2019; 2021).

El éxito de la adaptación y resiliencia de la sociedad ante la triple crisis planetaria dependerá de si somos capaces de maximizar la contribución de la naturaleza, por lo que es necesario actuar de manera inmediata para garantizar que se alcance su máximo potencial.

Por lo anterior, en esta investigación se analizó la eficiencia del dosel de seis especies de árboles de mayor uso en la ciudad de Hermosillo, Sonora, la cual presenta una alta contaminación por polvos y generación de islas de calor urbano, con la finalidad de identificar aquellas especies que presentan una mayor captación de PS en su follaje y, además, identificar cuáles son más eficientes en la absorción de CO₂ en sus procesos fotosintéticos. Los resultados permitirán proponer que especies utilizar en las campañas de reforestación de la ciudad y así mitigar la contaminación atmosférica y atenuar los efectos del cambio climático con mayor eficiencia.

MARCO TEÓRICO

Ecosistema Urbano

La ciudad es el hábitat que el ser humano ha creado para sí mismo, el cual está conformado por tres ejes principales: población, actividad y territorio, entre los cuales existe una estrecha interrelación, siendo el lado más vulnerable el territorio –entendido también como el espacio vital del ser humano, es decir, ambiente urbano–, ya que este puede perder su equilibrio debido a las actividades de la población (Amaya, 2005). Dada la fragilidad de dicho eje, surge la necesidad de entender a las ciudades bajo los paradigmas de la Ecología.

De acuerdo con Barrios (2012), la ciudad es un sistema abierto y dinámico que consume, transforma y libera materiales y energía; se desarrolla y se adapta; está determinada por los seres humanos y, al ser un ecosistema artificial, depende casi en su totalidad del resto de ecosistemas no urbanos como proveedores de servicios de abastecimiento, regulación y culturales, que son necesarios para el bienestar humano y que cuya demanda es proporcional a la estructura y funcionamiento de la ciudad. El autor también menciona que, en los últimos años, el crecimiento acelerado de las ciudades y su diseño ha provocado que se ejerza una gran presión en su entorno y que incrementa constantemente la demanda de dichos servicios, siendo este su mayor desafío y que ha provocado que los ecosistemas urbanos estén perdiendo su capacidad de resiliencia al cambio climático.

Las principales problemáticas a las que se enfrentan las ciudades son: 1) la regulación de la calidad del aire, las aguas y el suelo, recursos que han sido muy impactados por las actividades urbanas; 2) la capacidad para volver a producir alimentos, energía o equilibrar el ciclo hidrológico, debido a la demanda de grandes cantidades de aguas superficiales y subterráneas; 3) el deterioro de las funciones biológicas propias de los ecosistemas que se desarrollan en su interior –áreas verdes–, como la polinización o el control biológico de plagas y enfermedades; y 4) la creciente demanda de actividades recreativas y de disfrute estético, que generan un impacto sobre los entornos naturales y especialmente a los espacios protegidos (Barrios, 2012).

Contaminación del Aire, Cambio Climático y Salud

De acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la contaminación es la presencia o incorporación de uno o más compuestos en el ambiente que causen un desequilibrio ecológico (Última reforma DOF 01-04-2024). La Organización Mundial de la Salud [OMS] (sin fecha) define la contaminación del aire, o contaminación atmosférica, como la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran o modifican la composición y condición natural de la atmósfera, conocidos como contaminantes atmosféricos.

En el ambiente urbano, los contaminantes atmosféricos provienen de fuentes móviles y fijas de combustión, localizadas en una zona específica cuya ubicación no cambia y se dividen en: 1) fuentes puntuales, es decir, cualquier instalación fija que lleva a cabo operaciones o procesos derivados de energía eléctrica, del comercio o industrias; 2) fuentes de área, emisiones que no se localizan en un punto específico, ya que se generan de una serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, actividades y procesos como el consumo de solventes, la limpieza de superficies y equipos, las panaderías, la distribución y almacenamiento de gas LP, emisiones de caminos pavimentados y no pavimentados, plantas de tratamiento de aguas residuales, combustión doméstica, quemas agrícolas, incendios forestales, entre otras; 3) fuentes naturales, que se remontan a los orígenes de la Tierra, como la actividad volcánica y las tormentas de polvo y arena y; 4) fuentes móviles, que incluye a los medios de transporte, como aviones, helicópteros, ferrocarriles, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipos y maquinaria no fija con motores de combustión, etcétera (Sánchez-Salinas *et al.*, 2014).

Dentro de los principales contaminantes atmosféricos tenemos a las partículas suspendidas (PS) también conocidas como aeropartículas o aerosoles, que son una mezcla de materiales sólidos y líquidos (metales, compuestos orgánicos, material de origen biológico, entre otros) que varían en tamaño, forma y composición dependiendo de su origen, ya sea de fuentes naturales o de origen antropogénico (Rojas-Bracho y Garibay-Bravo, 2003). Estas se clasifican en Partículas Suspendidas Totales (PST), PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{0.1} de acuerdo a su tamaño -diámetro aerodinámico-, el cual es el parámetro más importante de las PS en

términos de su comportamiento y distribución en la atmósfera (Rojas-Bracho y Garibay-Bravo, 2003).

Las principales fuentes de contaminación del aire provocada por PS son el uso ineficiente de energía en los hogares y los sectores de la industria, la agricultura, el transporte y las centrales eléctricas alimentadas con carbón, a su vez, la calidad del aire también puede verse influida por elementos naturales, como factores geográficos, meteorológicos y estacionales, tales como la arena, el polvo del desierto, la quema de desechos y la deforestación (OMS, 2018).

En cuanto a los efectos sobre la salud humana, las PST ($<100\ \mu\text{m}$) se depositan casi exclusivamente en la nariz y garganta; las PM_{10} ($<10\ \mu\text{m}$), también llamadas fracción torácica o inhalable, pueden penetrar y depositarse a lo largo del tracto respiratorio, mientras que las partículas finas, es decir, las $\text{PM}_{2.5}$ ($<2.5\ \mu\text{m}$), llegan hasta los bronquiolos respiratorios y región alveolar, por lo que se les conoce como partículas respirables (Rojas-Bracho y Garibay-Bravo, 2003).

La OMS (2022a) declara que las PS, especialmente la $\text{PM}_{2.5}$, son capaces de penetrar profundamente en los pulmones y entrar en el torrente sanguíneo, lo que afecta a los sistemas cardiovascular, cerebrovascular y respiratorio; afirmando que cada vez hay más pruebas de que las PS afectan a otros órganos y causa también otras enfermedades. Se estima que: “en 2019 aproximadamente el 37% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire exterior se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, el 18% y el 23% de las muertes se debieron a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas, respectivamente, y el 11% de las muertes se debieron a cáncer de las vías respiratorias” (OMS, 2022b).

En Hermosillo, Sonora, se tienen periodos con mala calidad del aire según lo reportan diversas investigaciones, empeorando en la temporada invernal (Meza-Figueroa *et al.*, 2016; Ortega-Rosas *et al.*, 2019, 2021; Duarte-Tagles *et al.*, 2020). La población se encuentra expuesta a una gran cantidad de partículas en suspensión de tamaño PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ de diverso origen y el cambio climático está agravando la problemática de calidad del aire en la región (Duarte-Tagles *et al.*, 2020).

Recientemente se observó que existe una carga excesiva de partículas finas ($PM_{2.5}$) y ultrafinas ($PM_{0.1}$) adheridas a la pared de los granos de polen que circulan en el aire, lo cual pudiera ser la causa del incremento de los problemas de alergias en la ciudad, principalmente en la población infantil, cuyo índice se encuentra por encima de la media nacional (López-Romero *et al.*, 2017; Ortega-Rosas *et al.*, 2021).

La mala calidad del aire también afecta la salud de los ecosistemas mediante la deposición atmosférica, es decir, cuando los contaminantes atmosféricos, como el nitrógeno (N), azufre (S) y ozono (O_3), se depositan desde la atmósfera en la superficie de la Tierra, afectando los servicios ambientales provistos por los ecosistemas naturales como el agua limpia, la biodiversidad y el almacenamiento de carbono, así como incidir en el rendimiento de las cosechas en los sistemas agrícolas (ONU Cambio climático, 2022).

Por otro lado, la Ley General de Cambio Climático define al cambio climático como: “variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables” (Última reforma DOF 01-04-2024).

La ONU (sin fecha), menciona que el cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos, dichos cambios pueden ser naturales, por ejemplo, a través de las variaciones del ciclo solar; sin embargo, desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas, los cuales generan GEI e intensifican el calentamiento global del planeta; siendo el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) las principales emisiones de GEI que provocan el cambio climático.

Los GEI funcionan como una barrera física que impide que las radiaciones de la luz solar sean irradiadas hacia fuera de la Tierra y las retiene, lo que ocasiona que la temperatura sobre la superficie terrestre se eleve (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [UNFCCC], 2007). De acuerdo con el informe del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el CO_2 constituye el 71% del total de GEI emitido en México (INECC, SEMARNAT, 2018).

Lo anterior debido a la quema de los combustibles fósiles, que representan más del 75% de las emisiones mundiales de GEI y casi el 90% de todas las emisiones de CO₂, lo cual ha causado que el nivel de dicho gas se dispare en la atmósfera y provoque el fenómeno conocido como efecto invernadero intensificado, lo cual ha provocado que la temperatura de la Tierra sea 1,1°C más elevada que a finales del siglo XIX, siendo la última década (2011-2020) la más cálida registrada hasta el momento (ONU, sin fecha).

A medida que las condiciones climáticas cambian, se observan fenómenos meteorológicos y climáticos más frecuentes e intensos, que incluyen cambios de la temperatura y del régimen de precipitaciones, tormentas, olas de calor, sequías, incendios forestales, inundaciones y la subida del nivel del mar, afectando no solo a los entornos físicos, sino a todos los aspectos de los sistemas naturales y humanos (OMS, 2021). Solo en 2018, los daños causados por desastres naturales relacionados con el clima supusieron un coste de aproximadamente 155.000 millones de dólares (PNUMA, 2021).

Todos los aspectos de la salud se ven afectados por el cambio climático, desde el aire, el agua y los suelos no contaminados, hasta los sistemas alimentarios y los medios de subsistencia, por ejemplo, con el aumento de las zoonosis y las enfermedades transmitidas por los alimentos, el agua y los vectores, aumentando el riesgo de mortalidad y las emergencias de salud, repercutiendo negativamente sobre los determinantes ambientales y sociales de la salud física y mental, afectando de manera desproporcionada a las personas más vulnerables y desfavorecidas, como las mujeres, los niños, las minorías étnicas, las comunidades pobres, las personas migrantes o desplazadas, las poblaciones de edad avanzada y las personas con problemas de salud subyacentes (OMS, 2021). En la actualidad, el cambio climático se ha convertido en la mayor amenaza para la salud mundial del siglo XXI (Organización Panamericana de la Salud [OPS], sin fecha).

En el caso de la ciudad de Hermosillo, esta es conocida internacionalmente como una de las zonas más vulnerables de México ante el cambio climático, debido a su condición desértica y localización geográfica con variaciones de temperatura de más de 20 °C en verano (Gay-García *et al.*, 2015; Instituto Municipal de Planeación Urbana y del Espacio Público [IMPLAN], 2017; Ortega-Rosas *et al.*, 2020). Dentro de los resultados obtenidos en la tesis

de maestría elaborada por Figueroa-Montes (2018), se encontró evidencia de la presencia del cambio climático en la región de la costa de Hermosillo manifestándose a través del incremento de la temperatura y afectando a los cultivos de la región.

En 2004, se elaboró un estudio de caso sobre la adaptación al cambio climático en Hermosillo, Sonora, en donde se menciona que el principal problema por enfrentar bajo el cambio climático está relacionado con el agua, debido a una mayor tendencia a la evaporación, menor humedad del suelo, menor disponibilidad de agua y aumento en la extracción de agua de acuíferos, así como se prevé un mayor consumo de energía eléctrica para el uso de aparatos de aire acondicionado para mantener el confort térmico debido al incremento de la temperatura (INECC, SEMARNAT, U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2004).

A su vez, Navarro-Estupiñán *et al.*, (2018) encontró evidencia del aumento en el número de días cálidos y las olas de calor (+138%) en Sonora mediante el análisis de datos de estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua en Sonora (CONAGUA), y se realizaron proyecciones estadísticas basadas en modelos que indican que estas tendencias continuarán hasta el año 2060.

Un aspecto importante de considerar es la isla de calor urbana (ICU), fenómeno en el que ocurre un incremento de la temperatura del aire que puede ser de 2 a 5 °C más alta que en el área periurbana durante el día, pero de hasta 12 °C más alta durante la noche; esto como consecuencia de la modificación del clima urbano debido a las actividades e intervención humanas, como lo es el reemplazo de la cubierta natural -vegetación, suelo natural y agua- por superficies impermeables -asfalto y metal-, lo cual provoca una reducción de la evapotranspiración; aumento del almacenamiento y transferencia de calor sensible, y disminución de aire en movimiento (Díaz-Caravantes *et al.*, 2014).

El fenómeno del ICU es considerado como uno de los problemas más importantes de la humanidad en el siglo XXI al tener impactos negativos para los habitantes -p. ej. golpes de calor y deshidratación- e incrementar los efectos del calentamiento global, teniendo un mayor impacto en las ciudades desérticas con climas muy cálidos al aumentar aún más las temperaturas, tal y como ocurre en la ciudad de Hermosillo, que fue una de ciudades al

noroeste de México en donde se encontró mayor evidencia de muertes a causa del calor excesivo (Díaz-Caravantes *et al.*, 2014; Marincic-Lovriha, 2022; Navarro-Estupiñán *et al.*, 2020).

A pesar de que los impactos del cambio climático son de índole global y se han podido evidenciar con el paso de los años y, que los efectos de la contaminación del aire se observan en períodos de tiempo de días a semanas en escalas espaciales que van del ámbito local -p. ej. las ciudades-, la calidad del aire y el clima están interconectados, ya que las especies químicas que provocan la degradación de la calidad del aire, en general, se emiten de forma conjunta con los GEI, y porque los cambios en uno provocan inevitablemente cambios en el otro, por ejemplo, la quema de combustibles fósiles también emite óxido de nitrógeno (NO) a la atmósfera, lo que puede provocar la formación fotoquímica de O₃ -un GEI de vida corta- y partículas de nitrato; del mismo modo, las actividades agrícolas -importantes fuentes de emisión de CH₄- emiten amoníaco (NH₃), que luego forma partículas de amonio (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2021). Por lo que los esfuerzos por reducir la contaminación atmosférica local, como la causada por el carbono negro -hollín-, el ozono troposférico y sus precursores, también pueden contribuir a mitigar el cambio climático (PNUMA, 2021).

Además, dadas las características complejas de las PS, en grandes cantidades también pueden provocar el enfriamiento de la atmósfera al reflejar la luz solar de vuelta al espacio o al absorber la luz solar en la atmósfera, de modo tal que nunca llega al suelo, por lo que en un escenario con bajas emisiones de carbono estará asociado a un calentamiento menor a corto plazo, antes de que la temperatura disminuya, debido a que primero se sentirán los efectos de la reducción de las PS (es decir, una menor cantidad de luz solar reflejada al espacio), mientras que la estabilización de la temperatura en respuesta a las reducciones de las emisiones de CO₂ llevará más tiempo (ONU Cambio climático, 2022).

Dada la estrecha relación de la calidad del aire con el clima del planeta y los ecosistemas de todo el mundo, las políticas orientadas a reducir la contaminación del aire son una estrategia beneficiosa para el clima y la salud, pues reducen la carga de morbilidad y ayudan a mitigar el cambio climático a corto y largo plazo (OMS, sin fecha).

Soluciones Basadas en la Naturaleza: Áreas Verdes

Reynolds *et al.*, (2017) menciona que es de vital importancia contar con diferentes estrategias tanto a nivel nacional como local para hacer frente a la contaminación ambiental y el aumento de las emisiones de GEI en las ciudades. Las SbN son una alternativa de reciente creación que ha tomado auge dentro de la Unión Europea y Estados Unidos, y que empieza a tomar relevancia en Latinoamérica, no sólo como un enfoque para hacer frente al cambio climático, sino también para crear oportunidades de empleo y una economía sostenible (Reynolds *et al.*, 2017).

Las SbN son acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar los ecosistemas naturales y modificados que abordan los desafíos de la sociedad de manera efectiva y adaptativa, tales como el cambio climático, la reducción del riesgo de desastres, la seguridad alimentaria e hídrica, la pérdida de biodiversidad, la salud humana, y son fundamentales para un desarrollo económico sostenible, beneficiando simultáneamente a las personas y la naturaleza; por lo que, las SbN están respaldadas por beneficios que provienen de ecosistemas saludables (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2020). De esta manera se aprovecha al máximo su potencial y se garantiza un futuro resiliente para las ciudades, construyendo un entorno urbano más preparado para los desafíos actuales (PNUMA, 2023).

Las SbN pueden desempeñar un papel importante a nivel local en la mitigación de los problemas de calidad ambiental, tal es el caso de las áreas verdes, espacios libres dentro de las ciudades en donde predomina la vegetación, ya sea que se haya dado de manera natural o que haya sido introducida de manera artificial (Escolástico-León, 2015). Las plantas, principalmente los árboles, pueden ayudar a mejorar la calidad del aire debido a la retención de PS que se depositan en la superficie de sus hojas, y a la absorción de gases, como el CO₂, a través de sus estomas, que mediante sus procesos fotosintéticos lo metabolizan para obtener azúcares y otros compuestos que requieren para el desarrollo de su ciclo vital (Duran-Rivera, Alzate-Guarin, 2009; Baca-Santini, Vázquez-Gálvez, 2015; Arroyave-Maya *et al.*, 2018; Nina-Quispe, 2022).

El arbolado dentro de las ciudades también ayuda a disminuir las emisiones de CO₂ por ser generadores de microclimas al proporcionar sombras que reducen la radiación solar en la superficie urbana y a la transpiración que aporta humedad al aire, regulando la temperatura que tiende a subir aún más debido al fenómeno de ICU, por tanto, se reduce la demanda de refrigeración o climatización artificial, reduciendo indirectamente las emisiones de CO₂ y PS generadas por el uso combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica que se utiliza para el enfriamiento de edificios y casas (Guillén-Mena y Orellana, 2016; Marincic-Lovriha, 2022).

Otros de los beneficios que se obtienen por la vegetación urbana, son la infiltración de agua de lluvia reduciendo el riesgo de inundaciones, disminuyen el ruido, funcionan como barreras contra los fuertes vientos, funcionan como hábitat para la fauna urbana, entre otros, a la vez de mejorar el estado de ánimo, tranquilidad y bienestar a las personas (Escolástico-León, 2015). Por lo que un buen sistema de áreas verdes es fundamental para la salud de los habitantes y del ambiente urbano.

A su vez, las áreas verdes pueden ser utilizadas como objetos de estudio para investigaciones científicas, por ejemplo, para comprender ciertas dinámicas o procesos ecológicos que ocurren a escalas espaciales y temporales grandes, como los sitios de investigación a largo plazo o LTER, por sus siglas en inglés -Long-Term Ecological Research- (Maass *et al.*, 2010). Cabe mencionar que en el presente estudio dos de los sitios de muestreo son sitios LTER.

Vegetación Urbana

Las ciudades tienen impactos significativos sobre las comunidades vegetales, a medida que la urbanización avanza, la vegetación natural y/o preexistente es eliminada y reemplazada por una nueva comunidad vegetal, mezcla de especies nativas e introducidas con características funcionales y estructurales diferentes (Oltra-Carrió *et al.*, 2010).

Las especies introducidas o exóticas, son aquellos organismos que, por diversos mecanismos, naturales -inmigración- o antropogénicos -principalmente el comercio-, son movilizados de sitios de los que históricamente son nativos o naturales, e introducidos en nuevas áreas,

permitiendo que algunas de estas especies se establezcan y encuentren la oportunidad de propagarse. En algunos casos llegan a convertirse en plagas y causan efectos adversos en los ecosistemas invadidos, tales como: depredación, hibridación, competencia por alimento y espacio, alteración o desplazamiento del hábitat, alteración de la estructura de los niveles tróficos e infección por parásitos y enfermedades (Mejía-Mojica, Luna-Figueroa, 2021). En algunos casos, dichas especies no logran adaptarse completamente al clima local, por lo que requieren de mucho mantenimiento, principalmente en los requerimientos de agua.

En Hermosillo, Sonora, el clima árido, baja disponibilidad de agua, el uso inmoderado de especies introducidas provenientes de climas lluviosos tropicales y templados, y con apenas el 38% de utilización de especies nativas para la reforestación, ha dado como resultado áreas verdes pocos sostenibles y con un promedio de cobertura vegetal de apenas el 6.4% (Bernal-Grijalva *et al.*, 2019; Ortega-Rosas *et al.*, 2020). Por lo que es importante reverdecer la ciudad con especies nativas que puedan soportar las condiciones extremas propias de la región, las cuales también tienen mayores probabilidades de adaptación a los cambios ambientales provocados por el calentamiento global y cambio climático.

El aumento de la temperatura dentro de las ciudades producto del fenómeno de ICU aunado al calentamiento global, acompañado de variaciones en los regímenes de precipitación, generando sequías, afecta directamente el crecimiento y desarrollo de las plantas. Puede haber una combinación entre el estrés por sequía y el estrés por calor, lo que conlleva a una alta respiración con bajos niveles fotosintéticos, cierre estomático y aumento en la temperatura foliar, provocando cambios en la fenología de las plantas y en su producción de frutos y semillas. Además, el aumento de las concentraciones de CO₂ atmosférico en las ciudades produce una alteración en la interacción planta-patógeno y planta-insecto, que puede ocasionar enfermedades si la fenología de la planta y el ciclo del patógeno están en sincronía y, si las condiciones ambientales son propicias para el desarrollo del mismo (Useche *et al.*, 2010). Dado lo anterior, es de carácter urgente implementar acciones y estrategias como las SbN que puedan ayudar a la ciudad de Hermosillo en la adaptación, resiliencia y mitigación de la actual crisis planetaria.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La efectividad de los árboles, principalmente por su follaje o dosel, para mejorar la calidad del aire en las ciudades es evidente, sin embargo, los beneficios que se pueden obtener a través de las áreas verdes dependen de la composición vegetal y de la estructura forestal, es decir, del número de plantas, el tipo de árboles, arbustos o herbáceas, la mezcla de especies, la disposición de estas en el espacio, su edad y madurez (Borderías-Uribeondo, Martín-Roda, 2012). A su vez, la remoción de los contaminantes depende de la concentración del contaminante en cuestión, las condiciones climáticas, el régimen de vientos, la pluviosidad y las características morfológicas y fisiológicas de las especies, tales como la consistencia de las hojas, es decir, superficies foliares ásperas y rugosas con presencia de ceras y pubescencia, el área foliar, densidad del dosel y la permanencia del follaje a lo largo del año, así como la resistencia a la contaminación que tienen las plantas (Baca-Santini, Vázquez-Gálvez, 2015; Arroyave-Maya *et al.*, 2018). Dichas características permitirán que algunas especies tengan mayor capacidad en la retención de contaminantes que otras.

En Hermosillo, Sonora, no se cuenta con información publicada al respecto, por lo que es de interés evaluar la eficiencia del dosel para capturar PS, absorber CO₂ y el UEA de seis especies de árboles utilizados en la ciudad, con la finalidad de que los datos generados puedan ser utilizados por las instituciones públicas y privadas, así como asociaciones civiles, escuelas y ciudadanía en general, interesados en realizar labores de reforestación cuya intención sea mejorar la calidad del aire y hacer frente al cambio climático.

JUSTIFICACIÓN

En la ciudad de Hermosillo, la vegetación urbana tanto nativa como introducida, no es considerada formalmente como una estrategia de mitigación de la contaminación del aire y el cambio climático. Los resultados esperados en el presente proyecto de investigación podrían ser utilizados por el Instituto Municipal de Ecología (IME) y el IMPLAN del H. Ayuntamiento de Hermosillo para diseñar un programa de mejoramiento de la calidad ambiental utilizando a la vegetación nativa e introducida con una mayor capacidad de captación de PS, absorción de CO₂ y UEA como estrategias principales. Los resultados también podrían ser considerados para establecer un programa de monitoreo de la calidad del aire utilizando a la vegetación urbana como bioindicadores y complementar el actual Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA). En ambos casos se estaría contribuyendo con el cumplimiento del Reglamento de Ecología y Protección al Ambiente del Municipio de Hermosillo (Boletín Oficial del Estado de Sonora, Número 48 Sección 111, 2019) que menciona que la calidad del aire debe ser satisfactoria en los asentamientos humanos del Municipio de acuerdo a los parámetros fijados por las Normas Oficiales Mexicanas, como la NOM-025-SSA1-2014 de salud ambiental, que establece los valores límite permisibles para la concentración de PS en el aire, y que, desafortunadamente, dichos límites se suelen sobrepasar (Duarte-Tagles *et al.*, 2020).

Por otro lado, la información podrá ser utilizada por la sociedad organizada, principalmente los grupos ambientalistas, que, en su mayoría, son los que llevan a cabo las actividades de reforestación urbana. Así mismo, este proyecto está alineado y contribuye a los ODS de la ONU, particularmente en lo referente al objetivo 3 “Salud y Bienestar”, el cual indica que se debe “garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades” (ONU, sin fecha). En este sentido la población debe tener una buena calidad de vida y respirar aire limpio en las ciudades. Esta investigación también tiene impacto en el objetivo 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles” y en el objetivo 13 “Acción por el clima”.

HIPÓTESIS

El dosel de los árboles nativos es más eficiente en la captación de PS en el aire, absorción de CO₂ y uso eficiente del agua que el dosel de los árboles introducidos utilizados como vegetación urbana en Hermosillo, Sonora.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la eficiencia del dosel de seis especies de árboles entre nativos e introducidos utilizados como vegetación urbana en Hermosillo, Sonora para captar PS en el aire, absorber CO₂ y uso eficiente del agua para apoyar en las acciones de mitigación de la contaminación del aire y el cambio climático.

Objetivos Específicos

1. Cuantificar la cantidad de PS capturadas en las hojas de los árboles en los periodos de primavera e invierno.
2. Caracterizar la composición geoquímica de las PS capturadas en las hojas de los árboles en los periodos de primavera e invierno.
3. Calcular el índice de área y masa foliar de las especies de estudio mediante fotografías digitales.
4. Estimar la cantidad PS capturadas en el dosel de las especies de estudio.
5. Medir dentro de invernadero la absorción de CO₂ durante la fotosíntesis de los árboles bajo condiciones de estrés hídrico.
6. Calcular el uso eficiente del agua de las especies de estudio.
7. Medir en campo la absorción de CO₂ durante la fotosíntesis de los árboles en cada estación del año.

METODOLOGÍA

Descripción del Área de Estudio

La ciudad de Hermosillo, Sonora se ubica al noroeste de México en la línea fronteriza con Estados Unidos. Se encuentra ubicada en las coordenadas $28^{\circ} 04' 12.84''$ y $29^{\circ} 40' 48.58''$ de Latitud Norte y $-110^{\circ} 23' 26.07''$ y $-112^{\circ} 34' 50.27''$ de Longitud Oeste dentro del estado de Sonora, del cual es capital y representa el 8.70% de la superficie territorial de dicha entidad; en 2015, dada su importancia regional y el tamaño de su población, la totalidad del territorio municipal de Hermosillo fue considerado como zona metropolitana (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU], Consejo Nacional de Población [CONAPO], Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018).

Para la elaboración del presente estudio, se seleccionaron cuatro sitios de muestreo ubicados al norte, noroeste y centro de la ciudad (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo: Universidad Estatal de Sonora (UES) y Panteón Yañez en Zona Norte, Instituto Tecnológico de Hermosillo (ITH) en Zona Noroeste, Universidad de Sonora (UNISON) en Zona Centro en la ciudad de Hermosillo, Sonora. **Fuente:** Google Earth Pro.

Clima y Caracterización Física

La clave climática para la ciudad de Hermosillo es BWh'(h)w(e'), la cual indica que es un clima seco muy árido con un régimen de lluvia de verano y un porcentaje de lluvia invernal de entre 5 y 10 (García, 1964). La precipitación promedio anual es de 24.8 mm y la humedad relativa en época de lluvias de hasta el 53%, mientras que en el periodo de enero-junio esta descende a un 30%, aproximadamente (IMPLAN, 2018). Se presentan temperaturas altas con variaciones acordes a la presencia de humedad y a la velocidad del viento, siendo la temperatura promedio anual de 24.8 °C, con una oscilación térmica anual muy extremosa mayor de 14°C; el mes más frío tiene menos de 18°C y en verano con una temperatura que en promedio supera los 32°C en el mes de julio (IMPLAN, 2018; Ortega-Rosas *et al.*, 2022).

Los vientos dominantes se presentan por la mañana en sentido suroeste-noreste y en sentido contrario por la tarde; mientras que, los vientos más fuertes se presentan en la temporada de julio-septiembre, con variaciones de 60 a 80 km/h, que eventualmente pueden presentar vientos huracanados con ráfagas de hasta 120 km/h (IMPLAN, 2018).

Por otro lado, Hermosillo se ubica en la Provincia Fisiográfica Llanura Sonorense II, Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses (INEGI, 2017). El 89.66% del territorio de Hermosillo se encuentra en la Región Hidrológica RH8, mientras que la porción restante se encuentra en la Región Hidrológica RH9 (INEGI, 2017).

En cuanto a la edafología, los suelos dominantes son Regosol (27.40%), Calcisol (15.70%), Leptosol (15.29%), Cambisol (12.17%) y Luvisol (12.14%) (IMPLAN, 2018).

Ecosistema y Tipos de Vegetación

De acuerdo con Martínez-Yrizar *et al.*, (2009), el Desierto Sonorense abarca una región de aproximadamente 300 mil km² en el noroeste México y el suroeste de Estados Unidos, un tercio de su territorio se encuentra dentro del Estado de Sonora y se caracteriza por ser uno de los ecosistemas más importantes de Norteamérica, dicho ecosistema se compone por siete subdivisiones de vegetación, de las cuales la denominada Planicies de Sonora es exclusiva del Estado, esta presenta vegetación que se define como Desierto Arbosufrutescente, en donde dominan los árboles de gran talla como el palo fierro (*Olneya tesota*), el mezquite

(*Neltuma velutina* antes *Prosopis velutina*) y el palo verde (*Parkinsonia microphylla*), además de gran variedad de arbustos como la rama blanca (*Encelia farinosa*), también se menciona que en los sitios planos predomina el matorral abierto de escasa cobertura y pocas especies, y en los sitios de arroyo, el matorral es más diverso y con una mayor densidad, biomasa y productividad de plantas perennes. La ciudad de Hermosillo se encuentra dentro de la subdivisión Planicies de Sonora (Martínez-Yrizar *et al.*, 2009).

Selección de Árboles

Para la selección de las especies de estudio se consideraron algunos de los árboles más comunes en Hermosillo de acuerdo con: 1) su frecuencia en las áreas públicas de la ciudad; 2) su producción en el vivero municipal y, 3) su utilización en actividades de reforestación por parte de grupos ambientalistas.

A continuación, se describe a detalle la información analizada en cada rubro:

- 1) **Árboles más frecuentes en la ciudad.** Se revisaron los tres estudios sobre vegetación urbana más recientes en Hermosillo. Iniciando con Navarro-Navarro y Moreno-Vázquez (2016), quienes analizaron la frecuencia de especies presentes en las banquetas y jardines frontales de las casas en Hermosillo. Encontrando que, las especies que más aparecieron en las banquetas son: *Ficus benjamina*, *F. nítida*, *Bucida buceras* -ahora *Terminalia buceras*-, *Prosopis spp.*, *Ehretia tinifolia*, *Citrus aurantium*, *Cupressus sempervirens*, *Delonix regia* y *Azadirachta indica*. Mientras que, las de mayor frecuencia en los jardines frontales son: *F. benjamina*, *Thuja occidentalis*, *E. tinifolia*, *Plumeria rubra*, *Leucaena leucocephala*, *C. aurantifolia*, *C. sempervirens*, *Mangifera indica* y *C. aurantium*.

Por otro lado, Bernal-Grijalva *et al.*, (2019), por medio de la fotointerpretación, analizaron las masas de vegetación en parques públicos, encontrando que, las especies identificadas con mayor frecuencia fueron: *Prosopis spp.*, *B. buceras*, *A. indica*, *C. aurantium*, *Pithecellobium dulce*, *F. nítida*, *E. tinifolia*, *D. regia* y *F. benjamina*.

Finalmente, Ortega-Rosas *et al.*, (2022) realizó un estudio sobre cobertura y composición arbórea de los parques públicos de la ciudad encontrando que, las

especies más comunes fueron: *Prosopis glandulosa* -ahora *Neltuma glandulosa*-, *Parkinsonia florida*, *Mariosousa heterophylla* -antes *Acacia willardiana*-, *Lysiloma divaricata*, *B. buceras*, *C. aurantium*, *A. indica* y *F. benjamina*.

- 2) **Árboles mayormente producidos en el vivero municipal.** El día viernes 3 de marzo de 2023 se realizó contacto con Ramsés Rodríguez, presidente de la Fundación Verde Ser Natura y asesor del vivero municipal en Parques y Jardines del H. Ayuntamiento de Hermosillo, quien mencionó que las especies de árboles que más se están produciendo actualmente son: *P. glandulosa*, *P. microphylla*, *P. florida*, *P. preacox*, *P. aculeata*, *Olneya tesota*, *M. heterophylla*, *Lysiloma watsonii* y *Chilopsis linearis*.
- 3) **Árboles más utilizados en actividades de reforestación.** El viernes 3 de marzo de 2023 se realizó comunicación personal con integrantes de distintos grupos ambientalistas para consultar las especies que mayormente utilizan en sus actividades de reforestación, dichas especies son: *P. florida*, *P. aculeata*, *P. microphylla*, *P. preacox*, *O. tesota*, *M. heterophylla*, *L. watsonii*, *Prosopis velutina* (ahora *Neltuma velutina*) y *C. linearis*.

Finalmente se seleccionaron tres especies nativas y tres especies introducidas enlistadas a la Tabla 1.

Tabla 1. Especies de estudio.

No.	Especie	Nombre común	Origen
1	<i>Neltuma velutina</i>	Mezquite terciopelo	Nativa
2	<i>Parkinsonia florida</i>	Palo verde azul	Nativa
3	<i>Olneya tesota</i>	Palo fierro	Nativa
4	<i>Azadirachta indica</i>	Neem	Introducida
5	<i>Terminalia buceras</i>	Olivo negro	Introducida
6	<i>Neltuma chilensis</i>	Mezquite chileno	Introducida

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de Especies: Fichas Técnicas

Una vez definidas las especies de estudio, se realizó una descripción detallada de cada una de ellas con la intención de conocer su morfología, fenología y ecología, ya que dicha información facilita el trabajo de campo, así como la discusión de los resultados finales.

Para la elaboración de las fechas técnicas (Anexo 1) se consultó información de fuentes bibliográficas, así como las bases de datos de diversos sitios web¹.

Cuantificación de Partículas Suspendidas

Todos los procedimientos descritos en este apartado son una adaptación de los métodos implementados por Dalmasso *et al.*, (1997), Durán-Rivera y Alzate-Guarín (2009) y Alcalá-Jáuregui *et al.*, (2010).

Marcaje de Individuos y Limpieza de Hojas

En cada sitio se seleccionaron tres individuos de cada especie, de los cuales se buscó que presentaran características y condiciones ambientales similares, como edad, altura, ancho de copa, exposición solar, cercanía a fuente de contaminación -en este caso a la calles y bulevares con mayor tránsito vehicular- y buen estado de salud. Sin embargo, debido a que la selección de los individuos fue restringida a lugares cerrados, en ocasiones la totalidad de los individuos no cumplían con los requerimientos previstos, por lo que las condiciones de cada uno pudieron variar un poco. No obstante, se seleccionaron aquellos individuos en mejor estado y cuyo acceso para la toma de muestras fuera el adecuado. Cabe mencionar que cuando no se logró completar el mínimo de tres individuos por especie en un sitio, se optó por completar la muestra en los demás sitios de muestreo.

Los individuos seleccionados fueron marcados con cinta flagging para facilitar su identificación y se tomó su ubicación geográfica con GPS (Garmin eTrex 10). Después se seleccionaron varias ramas de cada árbol, a una misma altura y abiertamente expuestas a la atmósfera, a continuación, las hojas de cada rama fueron limpiadas cuidadosamente con agua destilada y se dejó transcurrir aproximadamente un mes y medio de espera para la posterior toma de muestras (Figura 2). Los periodos de colecta fueron pre monzón y pos monzón, es decir, en primavera e invierno.

¹ Global Biodiversity Information Facility (<https://www.gbif.org/>), Red de Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/>), NaturaLista (<https://www.naturalista.mx/>), EncicloVida (<https://enciclovida.mx/>) y The Arizona Native Plant Society (<https://aznps.com/>).



Figura 2. Marcaje y limpieza de hojas de *N. chilensis*. **Fuente:** Fotografía propia tomada en abril de 2023 en Panteón Yáñez.

Muestreo de Follaje y Procesamiento en Laboratorio

Una vez transcurrido el tiempo de espera para la colecta de PS, se regresó a los sitios de muestreo para tomar una muestra de 50 gr de hojas por individuo calculadas con apoyo de una báscula mecánica, después, las muestras fueron debidamente almacenadas y etiquetadas en bolsas de plástico con cierre hermético dentro de una hielera (Figura 3).



Figura 3. A) Pesaje de las muestras de hojas; B) Almacenamiento de las muestras en hielera; C) Almacenamiento de las muestras en refrigerador. **Fuente:** Fotografías propias tomadas en junio de 2023.

Dichas muestras se llevaron al Laboratorio de Posgrado de la Universidad Estatal de Sonora en donde cada muestra nuevamente fue pesada ahora con una báscula digital hasta obtener entre 30 y 40 gr de hojas. Después las muestras fueron colocadas en vasos de precipitado y se les vertió agua destilada para posteriormente remover las partículas adheridas en su superficie por medio de agitación. Luego de agitar por algunos minutos, las muestras se dejaron reposar hasta que las partículas se sedimentaron, transcurrido lo anterior, las hojas

fueron retiradas y desechadas. Por otro lado, el agua contenida en los vasos fue puesta a evaporar sobre una estufa eléctrica a 300-400 °C hasta dejar aproximadamente 15 ml de líquido del cual posteriormente se obtuvieron las partículas (Figura 4).

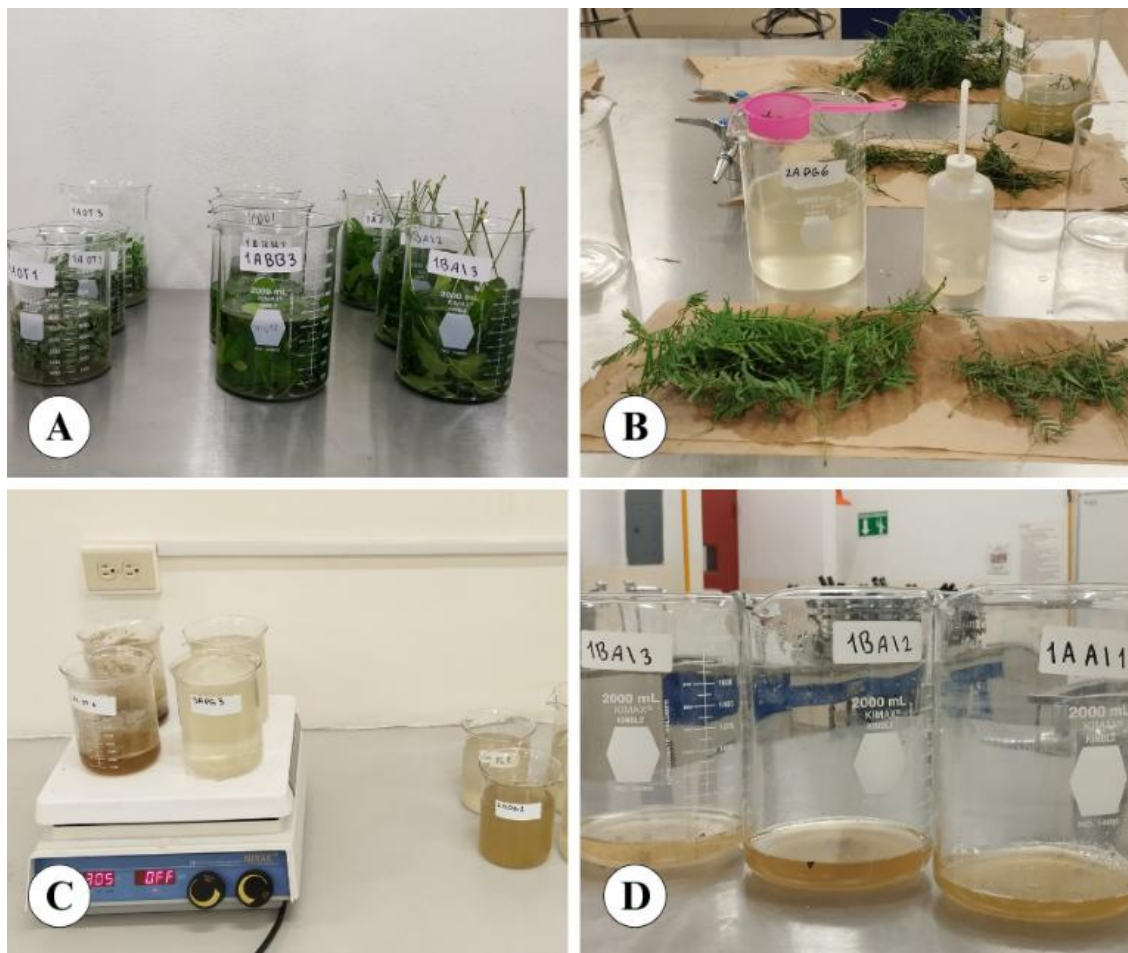


Figura 4. A) Muestras de hojas sumergidas en agua destilada en vasos de precipitado en reposo después de la agitación para desprender partículas; B) Hojas extraídas de los vasos de precipitado después del reposo; C) Agua de limpieza con partículas en proceso de evaporación en estufa eléctrica; D) Porciones de agua sobrante para su posterior filtración.

Fuente: Fotografías propias tomadas en junio de 2023 en Laboratorio de Posgrado-UES.

La obtención de las partículas se realizó por medio de la técnica de filtración por gravedad, vertiendo los 15 ml de agua con partículas sobre papel filtro Whatman número 42, previamente tarado, colocado sobre un embudo de cristal. El agua se dejó filtrar hasta dejar sólo las partículas sobre el papel que, una vez seco, fue retirado y pesado en una báscula analítica (Figura 5).

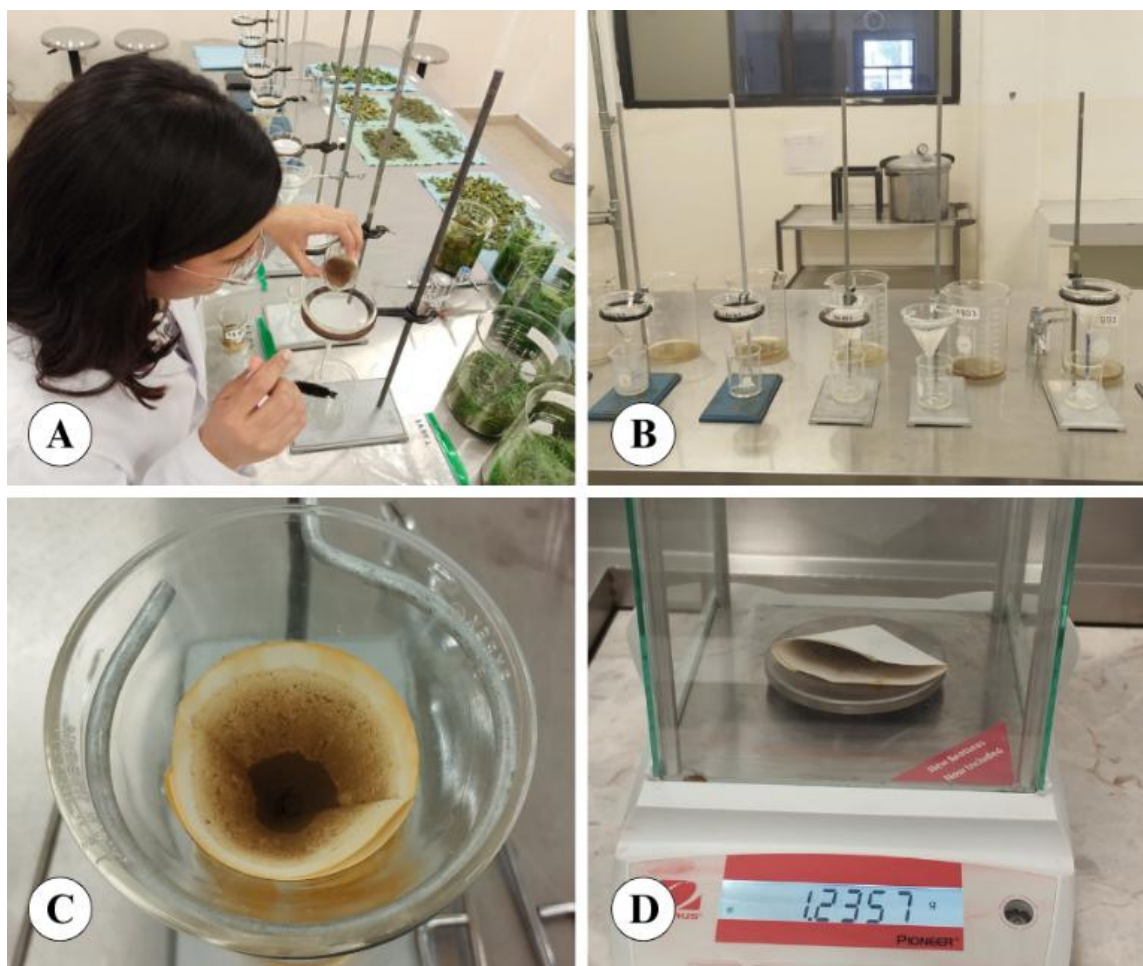


Figura 5. A) Vertimiento de agua con partículas en embudo para su filtración; B) Muestras de agua con partículas en proceso de filtración; C) Partículas obtenidas después del proceso de filtración; D) Pesaje de partículas en báscula analítica. **Fuente:** Fotografías propias tomadas en junio de 2023 en Laboratorio de Posgrado-UES.

Posteriormente las partículas obtenidas de un solo individuo por especie en cada uno de los sitios de muestreo de cada periodo se vertieron en micro tubos para ser enviadas al Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (UNISON) en donde se clasificó y cuantificó su composición geoquímica haciendo uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS) (Figura 6).



Figura 6. A) Vertimiento de partículas con micro tubo; B) Micro tubos con partículas C) Micro tubo con partículas etiquetado con clave de las especies de estudio; D) Análisis de partículas en SEM-EDS. **Fuente:** Fotografías propias tomadas en agosto de 2023 y enero de 2025 en Laboratorio de Posgrado-UES y Laboratorio de Geoquímica-UNISON.

Estimación de la Captación de Partículas Suspendidas en el Dosel

Para estimar la cantidad de PS capturadas en el dosel de las especies de estudio fue necesario: 1) tener un índice de área foliar confiable; 2) estimar la cantidad de área foliar por individuo usando una medición de cobertura del dosel; 3) estimar el peso total húmedo de hojas por individuo usando una estimación del peso húmedo \div área foliar y; 4) estimar la cantidad total de PS por especie usando la cantidad de PS presentes por peso húmedo de hoja. Lo anterior expresado a manera de fórmula quedó de la siguiente manera:

$$PS \text{ en Dosel} = (\text{Índice de Área Foliar})(\text{Cobertura})\left(\frac{\text{Peso Húmedo}}{\text{Área Foliar}}\right)\left(\frac{PS}{\text{Peso Húmedo}}\right)$$

Se utilizó el método denominado como Digital Cover Photography (DCP) para estimar el índice de área foliar y la cobertura del dosel por medio de fotografías digitales, las cuales fueron capturadas con una cámara réflex digital Canon EOS 250D apuntando hacia arriba (zenith), usando un lente de 50 mm que proporcionó un campo de visión de aproximadamente 30° (Figura 7).



Figura 7. Colocación de cámara fotográfica bajo el dosel de uno de los individuos muestreados de *T. buceras*. **Fuente:** Fotografía propia tomada en septiembre de 2024 en UNISON.

Dichas fotografías se tomaron al amanecer para evitar o minimizar la luz directa sobre los árboles, en un modo de prioridad a la apertura, con *f* alta (>10, por lo general >15), la cual se ajustaba manualmente dependiendo de la cantidad de luz en la escena, así como el ISO,

con la intención de tomar la imagen en un tiempo menor a un segundo y así evitar que las hojas salieran movidas por el viento. En general, las fotografías fueron tomadas subexpuestas a un paso, pero la exposición fue ajustada dando prioridad a que el histograma de la imagen no estuviera saturado de ninguno de los dos lados y que se obtuviera un rango amplio o dinámico. Se fotografiaron tres individuos por especie localizados dentro de UNISON y Panteón Yáñez² y se tomaron de 2 a 3 fotografías (guardadas en formato RAW) por individuo, tratando de abarcar la variabilidad de su dosel. Después, utilizando el software ImageMagick, a cada fotografía se le aisló el canal azul y se le hizo un estiramiento de contraste (contrast stretch) de 1 y 99%, con lo cual se satura el 1% de los colores más oscuros y más claros; y no se aplicó corrección gamma. Todo lo descrito anteriormente, se hizo siguiendo las recomendaciones de Chianucci (2019).

A continuación, las fotografías resultantes se analizaron en el paquete coveR de R, usando el método para detectar huecos grandes de "macfarlane" y asumiendo una distribución de ángulos de las hojas de tipo esférica (es decir, un coeficiente de extinción "k" de 0.5). Aunque los valores de índice de área foliar pueden variar según la "k", esa distribución de ángulos es la que más comúnmente se asume, y así, las estimaciones son, a fin de cuentas, aproximaciones.

En cuanto a la cobertura del dosel, se refiere a la proporción de un área fija del suelo cubierta por el follaje y ramas superiores de los árboles, se obtuvo midiendo con una cinta métrica el largo (a) y ancho (b) del dosel de los árboles, y aplicando la fórmula del área de una elipse:

$$\text{Cobertura del dosel} = \pi \times a \times b$$

Finalmente, se tomaron cinco hojas de cada uno de los tres individuos que se utilizaron para la toma de fotografías, de las cuales se obtuvo el área foliar por medio de ImageJ, un programa de procesamiento digital de imagen y el peso húmedo en una báscula digital, después, se realizaron las conversiones necesarias para obtener el promedio de PS capturadas por especie en kg por m².

² Solo en el caso de *N. velutina*, ya que dicha especie no se encontró dentro de UNISON.

Es importante mencionar que, para este apartado, se agregaron las siguientes especies: *Parkinsonia preacox* (Palo brea), *Pithecellobium dulce* (Guamúchil), *Ficus benjamina* (Benjamina) y *Citrus aurantium* (Naranja agrio), cuya cantidad total de PS capturadas se obtuvo de Rodríguez-Becerra (En proceso).

Análisis Estadístico: Comparación de Medias entre Especies, Sitios y Estaciones

Se realizó un análisis de ANOVA de dos vías para determinar las diferencias entre las PS capturadas por especie, sitio y estación de muestreo. En los casos en donde se encontraron diferencias significativas, se emplearon las pruebas *a posteriori* de Tukey-Kramer y regresión logística nominal ($p \leq 0.05$). Para dichos análisis se utilizó el software JPM Pro.

Medición de CO₂

La medición del CO₂ capturado por las especies de estudio (Tabla 1) se realizó por medio del método de Análisis Infrarrojo de Gases -Sistemas IRGA- del tipo abierto, utilizando el equipo de medición de gases LiCor LI-6400XT Portable Photosynthesis System acoplado a una cámara 6400-02B LED Color Light Source con capacidad para emitir un rango de intensidad de radiación fotosintética de 0 a 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dicha cámara fue utilizada con la finalidad de homogenizar la cantidad de luz recibida por las hojas y evitar problemas durante los días nublados u objetos que pudieran bloquear la luz.

Para definir la cantidad de radiación que recibirían las hojas dentro de la cámara, se realizó una cinética de respuesta de la fotosíntesis neta a la luz fotosintéticamente activa (Ai-RFA), por lo que el equipo (LiCor LI-6400XT Portable Photosynthesis System) fue programado para que la cámara emitiera diferentes niveles de radiación (2000, 1500, 1000, 500, 400, 300, 200, 100, 50, 20 y 0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en intervalos de 2 minutos.

Una vez definida la cantidad de radiación dentro de la cámara (800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se procedió con la toma de lecturas del intercambio de gases de acuerdo con el protocolo descrito por Li-Cor LI-6400XT Portable Photosynthesis System (LICOR, Inc., Nebraska, EEUU).

Las mediciones se realizaron bajo condiciones naturales de temperatura y CO₂ a un flujo de 500 $\mu\text{mol s}^{-2}$ en un horario de 8:00 am y 10:00 am colocando una hoja madura dentro de la cámara para obtener los siguientes parámetros: fotosíntesis instantánea (Ai), transpiración (E) y uso eficiente de agua (UEA).

En el caso de la absorción de CO₂ bajo condiciones de estrés hídrico, estas mediciones se realizaron en tres individuos por especie dentro de un invernadero, los cuales primero fueron trasplantados en macetas de tela con la misma cantidad de sustrato, elaborado con 50% tierra -tomada de la capa superior del perfil de suelo bajo del dosel de árboles adultos de *Olneya tesota* y *Neltuma sp.*- pasteurizada a 80°C durante 2 horas y 50% “peat moss” para facilitar la aireación y la retención de humedad. Después fueron regados con 5 L de agua cada tres días durante aproximadamente un mes para su recuperación y aclimatación luego del trasplante (Figura 8).



Figura 8. Individuos de trabajo en macetas dentro de invernadero. **Fuente:** Fotografías propias tomadas en septiembre de 2023 en Invernadero-CIAD.

Posteriormente se tomaron mediciones puntuales cada 12 h en hojas maduras y completamente extendidas después de haber regado a niveles de campo con 5 L de agua hasta observar una caída importante en los valores de A_i . A la par se midió la humedad del suelo por medio del método tensiométrico (PHS = Presión de humedad del suelo) utilizando el equipo Tensiometer model-LT colocado aproximadamente a 10 cm de profundidad en el sustrato (Figura 9).



Figura 9. A) Medición de gases en hoja de *N. chilensis* B) Medición de PHS en sustrato de *O. tesota*. **Fuente:** Fotografías propias tomadas en octubre de 2023 en Invernadero-CIAD.

Luego de observar la caída en A_i , los individuos nuevamente fueron regados a capacidad de campo con 5 L de agua y, con un tiempo de recuperación de 12 h, se volvió a medir A_i y PHS. Se realizaron 7 mediciones en total.

Por otro lado, para conocer el comportamiento y variación estacional en A_i de los árboles estudiados, se realizaron mediciones puntuales en tres individuos adultos por especie dando inicio en otoño de 2023 y culminando en verano de 2024 (Figura 10).

Es importante mencionar que, tanto para las mediciones dentro del invernadero, como las estacionales, se agregaron las siguientes especies: *P. preacox* (Palo brea), *P. dulce* (Guamúchil) y *F. benjamina* (Benjamina).



Figura 10. A) Instalación del equipo medidor de gases B) Medición de CO₂ en árbol de adulto de *O. tesota*. **Fuente:** Fotografías propias tomadas en octubre de 2023 en CIAD.

Medición del Área Foliar y Observación de Estomas

Dada la variación del tamaño foliar de las especies analizadas, fue necesario conocer el área total de la hoja que fue introducida dentro de la cámara del LI-6400XT Portable Photosynthesis System al realizar las mediciones y para ello se utilizó ImageJ.

Por otro lado, la observación de estomas se realizó por medio de la técnica de impresión de estomas, la cual consiste en untar barniz de uñas transparente en el haz y en el envés de una hoja. Una vez seca la capa de barniz, esta se retira colocando cinta adhesiva sobre ella y halando cuidadosamente. Después, la cinta con la capa de barniz se coloca en un portaobjetos y se observa bajo un microscopio óptico.

Dicha observación se hizo con la finalidad de corroborar la existencia de estomas tanto en el haz como en el envés de las hojas y así complementar las variables analizadas de los datos obtenidos.

Obtención del Uso Eficiente del Agua

Se integraron los datos obtenidos de cada especie con los porcentajes de humedad promedio en el sustrato de las macetas de cada día: 23.2, 19.6, 15.7, 12.1, 10.6, 9 y 17.6 % y con los valores de A_i y E se calculó el uso eficiente de agua ($UEA = A_i / E$) de cada especie, que nos indica los g de CO_2 fijado por kg agua perdida.

Análisis Estadístico: Comparación de Medias entre Especies

En el caso de las mediciones dentro de invernadero, se hizo un análisis de ANOVA teniendo como factor variable los porcentajes de humedad promedio y como variable de respuesta A_i , E y EUA de cada especie. Mientras que, en el caso de las mediciones estaciones se hizo un análisis de ANOVA teniendo como factor variable las estaciones y como variable de respuesta A_i de cada especie. En los casos en donde se encontraron diferencias significativas, se empleó la prueba *a posteriori* de Tukey-Kramer ($p \leq 0.05$). Todos los cálculos se realizaron utilizando el software de análisis estadístico SAS (SAS Institute).

RESULTADOS

Captación de Partículas Suspendidas

Captación por Especie y Estación

En relación con las PS capturadas por 30-40 g de hojas de las especies de estudio durante cada estación, observamos diferencias en las cantidades de PS capturadas por las distintas especies de estudio. A continuación, se mencionan los resultados obtenidos:

Durante la primavera (Figura 11), la especie que capturó la mayor cantidad de PS fue *P. florida* (0.5335 g), seguido de *O. tesota* (0.3443 g) y *N. velutina* (0.2989 g) con valores muy similares entre sí, a continuación, se encuentra *T. buceras* (0.2080 g), *N. chilensis* (0.1550 g) y *A. indica* (0.1512 g) también con valores muy similares entre sí.

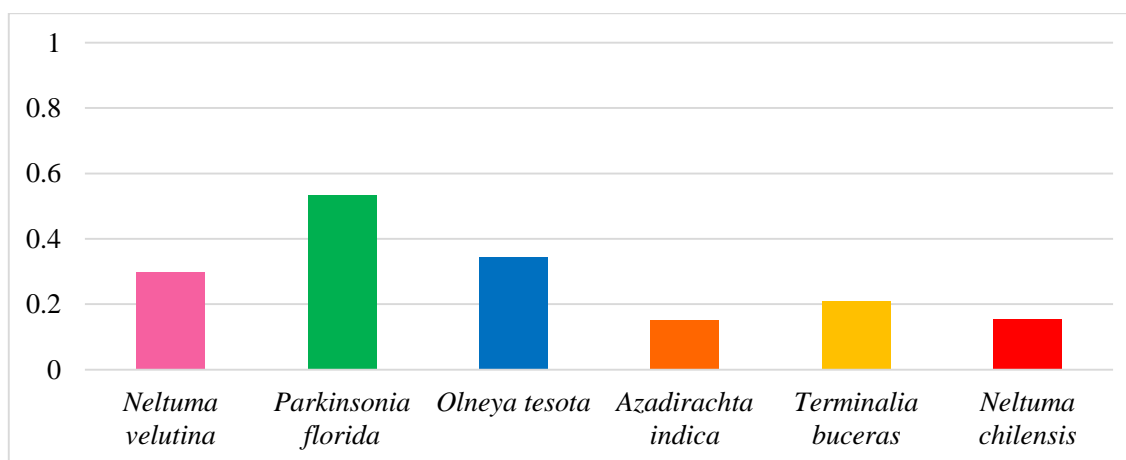


Figura 11. Promedios del peso en g de las PS capturadas en las muestras de hojas de las especies de estudio en primavera. **Fuente:** Elaboración propia.

Mientras que, en invierno (Figura 12), fue *A. indica* (0.5969 g) la especie con mayor captación de PS, seguido de *N. chilensis* (0.5233 g), *T. buceras* (0.4583 g) y *O. tesota* (0.4517 g) con valores muy similares entre sí, luego *N. velutina* (0.3910 g) y, finalmente, *P. florida* (0.1944 g).

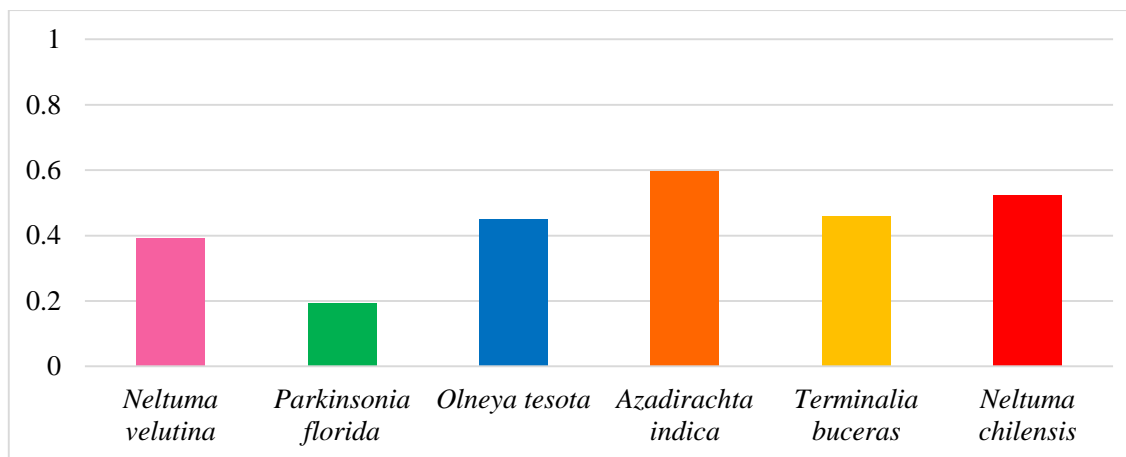


Figura 12. Promedios del peso en g de las PS capturadas en las muestras de hojas de las especies de estudio en invierno. **Fuente:** Elaboración propia.

En cuanto a la captación total (ambas estaciones) de PS por especie (Figura 13), fue *O. tesota* (0.7960 g) la especie que tuvo la mayor captación de PS, seguido de *A. indica* (0.7481 g) y *P. florida* (0.7279 g) con valores similares entre sí, después tenemos a *N. velutina* (0.6899 g), *N. chilensis* (0.6783 g) y *T. buceras* (0.6663 g), también con valores muy similares entre sí.

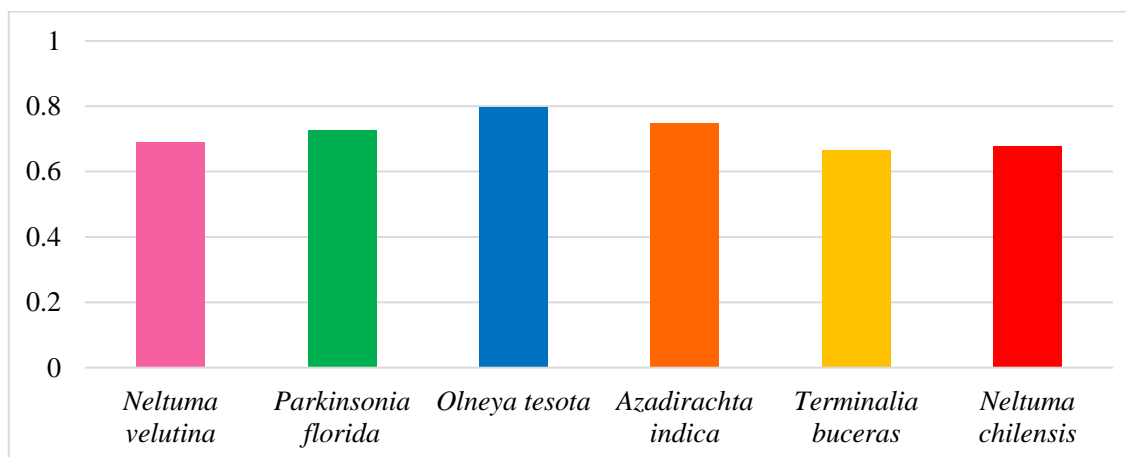


Figura 13. Captación total en g de las PS en las muestras de hojas de las especies de estudio. **Fuente:** Elaboración propia.

Captación por Estación

La captación por estación corresponde a la sumatoria de los promedios de PS capturadas por cada una de las especies de estudio por estación, por lo que, en el periodo de primavera se obtuvo un total de 1.6910 g de PS capturadas y en invierno un total de 2.6156 g, observándose una notoria diferencia (Figura 14).

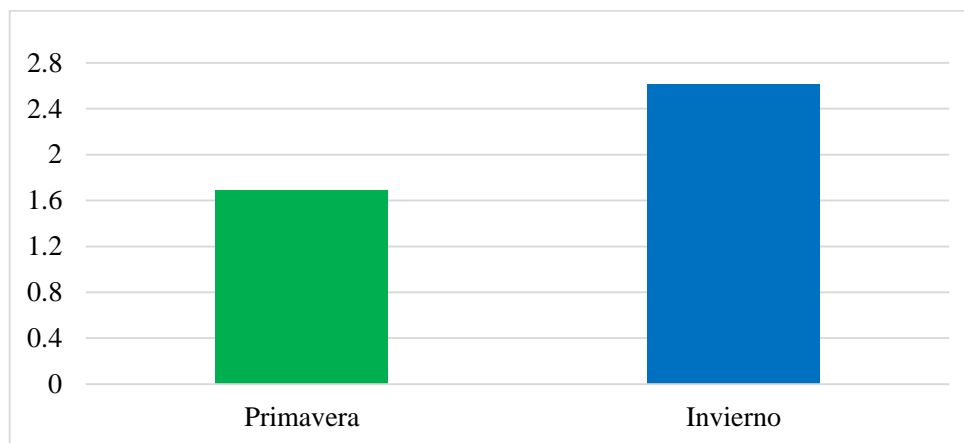


Figura 14. Captación total en g de PS por estación. **Fuente:** Elaboración propia.

Captación por Sitio y Estación

En el caso de las PS capturadas en los sitios de muestreo por estación, se obtuvo que en primavera (Figura 15), UNISON (0.4003 g) y Panteón Yáñez (0.3679 g) fueron los sitios en donde hubo mayor captación de PS con valores similares entre sí, seguido de ITH (0.2002 g) y UES (0.0717 g).

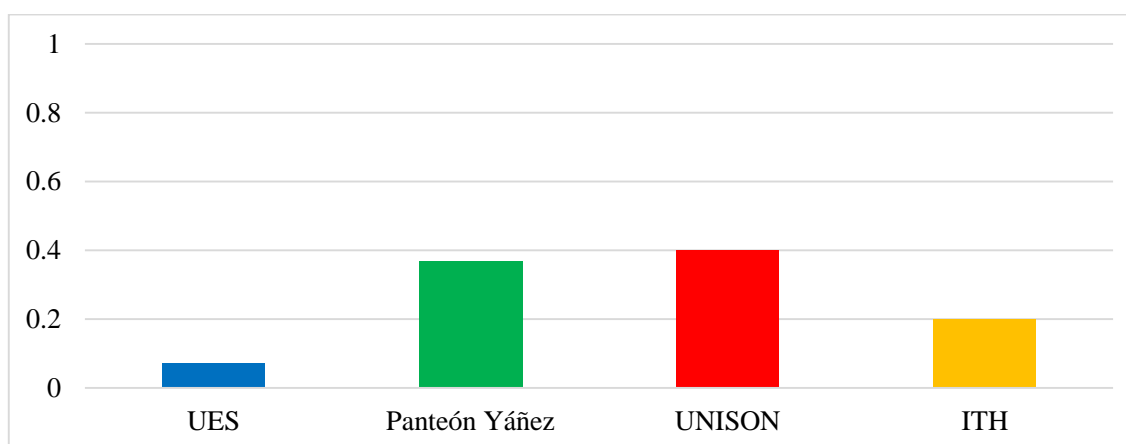


Figura 15. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo en primavera. **Fuente:** Elaboración propia.

Mientras que, en invierno (Figura 16), de nueva cuenta fue en UNISON (0.4977 g) donde se obtuvo la mayor captación de PS, seguido de ITH (0.4432 g), Panteón Yáñez (0.4348 g) y UES (0.3234 g), destacando que todos los valores son muy similares entre sí.

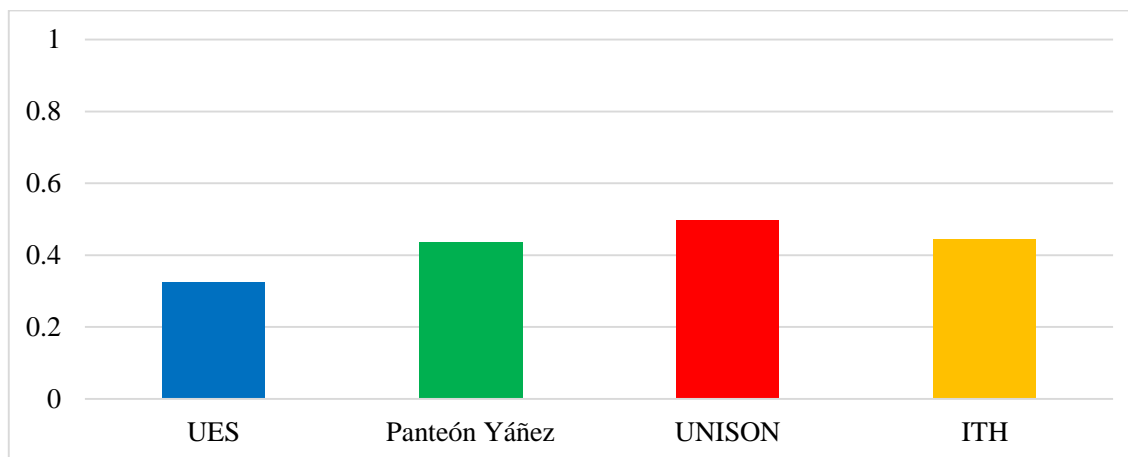


Figura 16. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo en invierno. **Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la captación total (Figura 17) de PS por sitio de muestreo, fueron UNISON (0.8980 g) y Panteón Yáñez (0.8027 g) los sitios donde se obtuvo la mayor captación total de PS con valores similares entre sí, seguido de ITH (0.6433 g) y, finalmente, UES (0.3950 g).

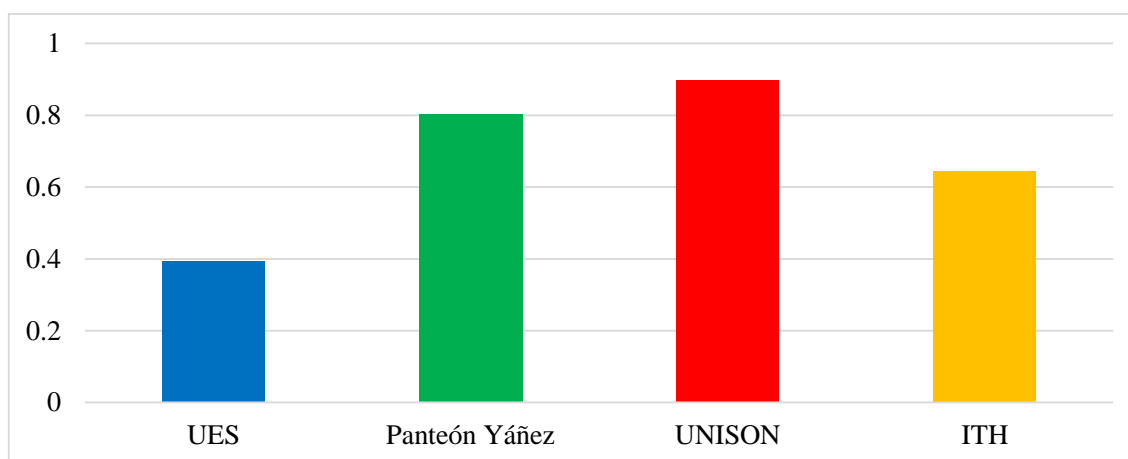


Figura 17. Captación total en g de las PS en los sitios de muestreo. **Fuente:** Elaboración propia.

Captación por Especie y Sitio

En el caso de la captación de PS de cada una de las especies de estudio en cada uno de los sitios de muestreo, se encontró lo siguiente:

- ***Neltuma velutina*.** El sitio de muestreo en donde obtuvo mayor captación fue en Panteón Yáñez (0.6965 g), seguido de ITH (0.6833 g) con valores muy similares entre sí. Esta especie no fue encontrada en UES ni en UNISON (Figura 18).

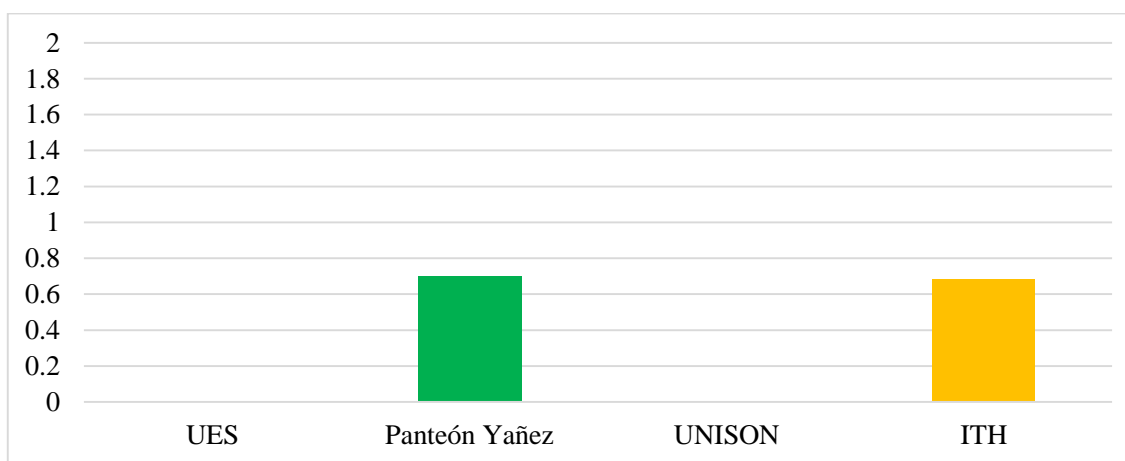


Figura 18. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie *N. velutina*. **Fuente:** Elaboración propia.

- ***Parkinsonia florida*.** En esta especie se puede observar una marcada diferencia en la cantidad de PS obtenidas ya que lo que se obtuvo en Panteón Yáñez (1.1993 g), fue notablemente superior a los demás sitios, seguido UNISON (0.6820 g), ITH (0.4238 g) y UES (0.3100 g) (Figura 19).

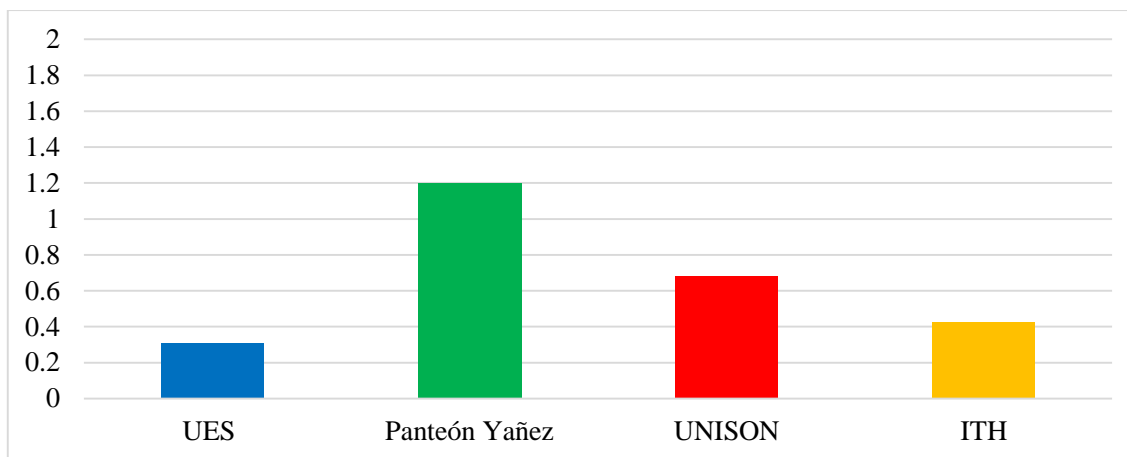


Figura 19. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie *P. florida*. **Fuente:** Elaboración propia.

- *Olneya tesota*. En esta especie también se puede observar una marcada diferencia entre los valores obtenidos, siendo en este caso UNISON (1.1833 g) en donde se obtuvo la mayor captación de PS, seguido de ITH (0.5772 g) y UES (0.2404 g). Esta especie no fue encontrada en Panteón Yáñez (Figura 20).

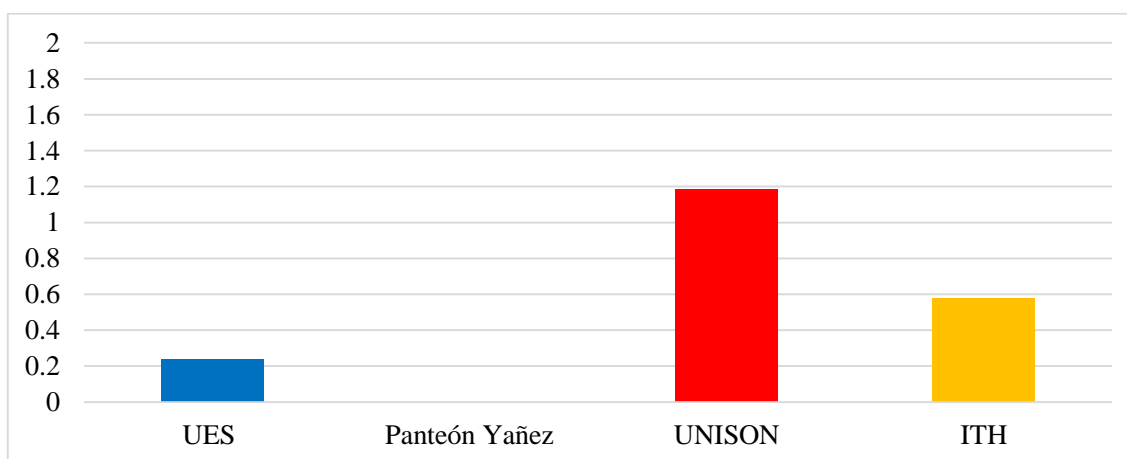


Figura 20. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie *O. tesota*. **Fuente:** Elaboración propia.

- *Azadirachta indica*. Obtuvo la mayor cantidad de captación de PS en UNISON (0.9078 g) y Panteón Yáñez (0.8580 g) con valores similares entre sí, seguido de ITH (0.6972 g) y UES (0.5295 g) (Figura 21).

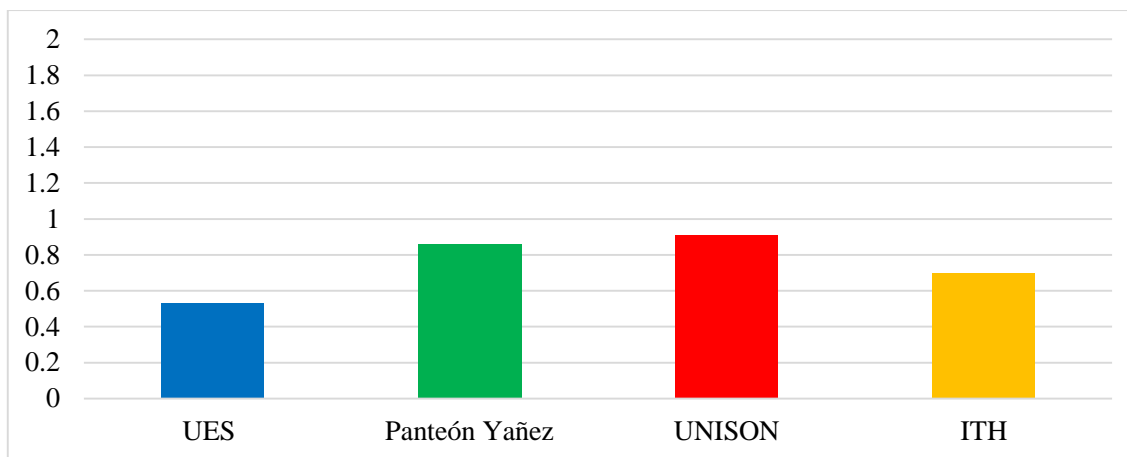


Figura 21. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie *A. indica*. **Fuente:** Elaboración propia.

- *Terminalia buceras*. Tuvo la mayor cantidad de PS capturadas en ITH (0.7750 g) y UNISON (0.7409 g) con poca variación entre sí, seguido de Panteón Yáñez (0.6776 g) y UES (0.4719 g) (Figura 22).

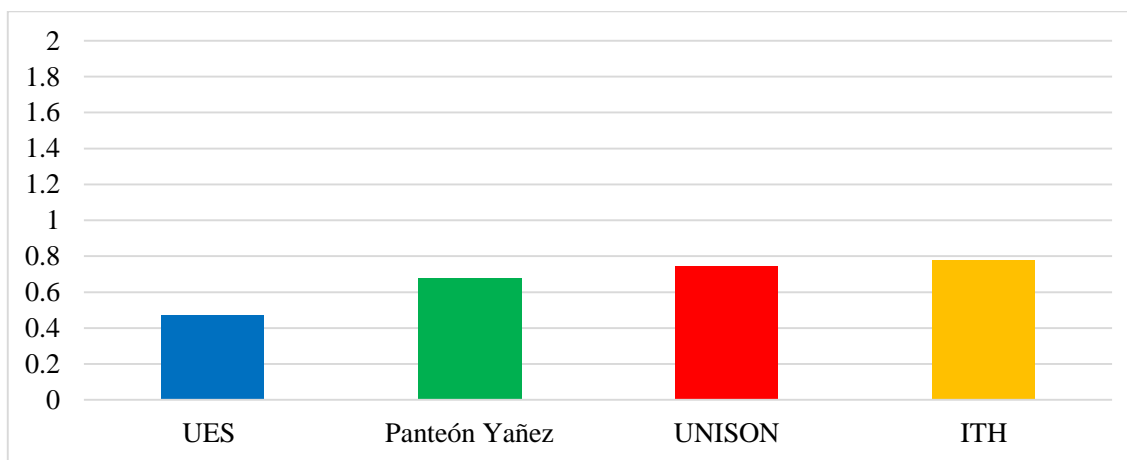


Figura 22. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie *T. buceras*. **Fuente:** Elaboración propia.

- *Neltuma chilensis*. En este caso la variación entre sitios fue muy poca, teniendo en primer lugar, de nueva cuenta, a UNISON (0.6906 g) seguido de Panteón Yáñez (0.6794 g) e ITH (0.6636 g). Esta especie no fue encontrada en UES (Figura 23).

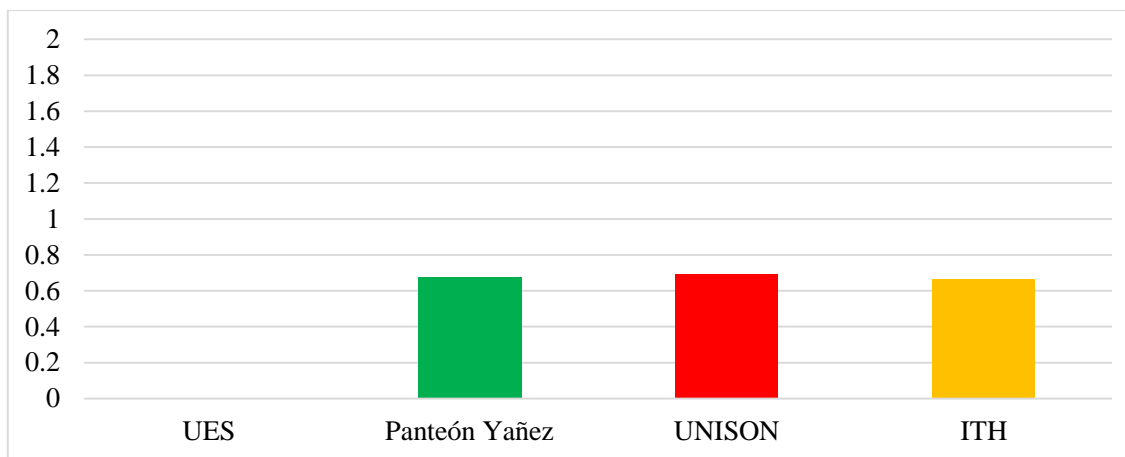


Figura 23. Promedios del peso en g de las PS capturadas en los sitios de muestreo por la especie *N. chilensis*. **Fuente:** Elaboración propia.

Comparación de Medias de la Captación de PS

- **Evaluación por especie.** No se encontraron diferencias significativas ($p < 0.8990$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de captación total (primavera + invierno) de PS de las especies de estudio.
- **Evaluación por especie y estación.** Se encontraron diferencias significativas entre las medias de captación de PS de las especies de estudio durante los periodos de primavera (Tabla 5) e invierno (Tabla 6), con valores de $p < 0.0010$ y $p < 0.0001$ con prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$, respectivamente.

Tabla 2. Comparación de medias de la captación de PS por las especies de estudio en primavera mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Especie	Comparación	Media
<i>Parkinsonia florida</i>	A	0.5335
<i>Olneya tesota</i>	A B	0.3443
<i>Neltuma velutina</i>	A B	0.2989
<i>Terminalia buceras</i>	B	0.2080
<i>Neltuma chilensis</i>	B	0.1550
<i>Azadirachta indica</i>	B	0.1512

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y analizados con el software JPM Pro.

Tabla 3. Comparación de medias de la captación de PS por las especies de estudio en invierno mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Especie	Comparación		Media
<i>Azadirachta indica</i>	A		0.5968
<i>Neltuma chilensis</i>	A	B	0.5232
<i>Terminalia buceras</i>	A	B	0.4583
<i>Olneya tesota</i>	A	B	0.4517
<i>Neltuma velutina</i>		B	0.3909
<i>Parkinsonia florida</i>		C	0.1943

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y analizados con en el software JPM Pro.

- **Evaluación por estación.** Se encontró una diferencia significativa entre la captación total de PS en primavera e invierno ($p < 0.0001$).
- **Evaluación por sitio.** Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.0001$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de captación total (primavera + invierno) por sitio de muestreo (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de medias de la captación total (primavera + invierno) de PS por sitio de muestreo mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Sitio	Comparación		Media
UNISON	A		0.8980
Panteón Yáñez	A	B	0.8027
ITH		B	0.6433
UES		C	0.3950

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y analizados con en el software JPM Pro

- **Evaluación por sitio y estación.** Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.009$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de captación de PS por sitio de muestreo durante el periodo de primavera (Tabla 5), mientras que en el invierno no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.1005$).

Tabla 5. Comparación de medias de la captación de PS por sitio de muestreo en primavera mediante la prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Sitio	Comparación	Media
UNISON	A	0.4003
Panteón Yáñez	A	0.3679
ITH	A B	0.2001
UES	B	0.0716

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y analizados con en el software JPM Pro.

Captación Total en Dosel de las Especies de Estudio

A continuación, se muestra una estimación de la cantidad de PS capturadas en el dosel de las especies de estudio, lo equivalente a la captación total en kg por cada individuo durante el periodo de un mes (Tabla 6):

Tabla 6. Masa foliar y peso de PS en kg por individuo.

Especie	No.	Masa foliar	Captación PS
<i>Neltuma velutina</i>	1	24.5875	0.5037
	2	6.0696	0.1243
	3	102.7765	2.1053
<i>Parkinsonia florida</i>	1	6.4364	0.1291
	2	19.8806	0.3988
	3	37.9811	0.7619
<i>Olneya tesota</i>	1	36.7588	1.2793
	2	44.9709	1.5651
	3	77.8698	2.7100
<i>Azadirachta indica</i>	1	63.5664	1.6972
	2	255.0161	6.8089
	3	160.9922	4.2985
<i>Terminalia buceras</i>	1	23.1975	0.5055
	2	10.6243	0.2315
	3	67.7540	1.4764
<i>Neltuma chilensis</i>	1	100.2411	2.0362
	2	3.7832	0.0768
	3	13.6860	0.2780
<i>Parkinsonia preacox</i>	1	6.8645	0.1874
	2	39.6334	1.0822
	3	32.6412	0.8912

	1	15.2410	0.6014
<i>Pithecellobium dulce</i>	2	228.2207	9.0052
	3	55.3836	2.1853
	1	21.4260	0.3506
<i>Ficus benjamina</i>	2	16.8158	0.2752
	3	65.9288	1.0789
	1	18.8445	0.4200
<i>Citrus aurantium</i>	2	14.9383	0.3329
	3	16.3530	0.3645

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo, complementados con los resultados de Rodríguez-Becerra (En proceso) y analizados con el paquete coveR de R.

Con los resultados obtenidos en la Tabla 6, se calculó el promedio de los kg de PS capturadas en el dosel por especie, encontrando que las especies con la mayor captación de PS fueron *A. indica* (4.2682 kg), *P. dulce* (3.9306 kg) y *O. tesota* (1.8515 kg), seguidos de *N. velutina* (0.9111 kg), *N. chilensis* (0.7970 kg), *T. buceras* (0.7378 kg), *P. preacox* (0.7203 kg), *F. benjamina* (0.5682 kg), *P. florida* (0.4299 kg) y *A. aurantium* (0.3725 kg) (Figura 24).

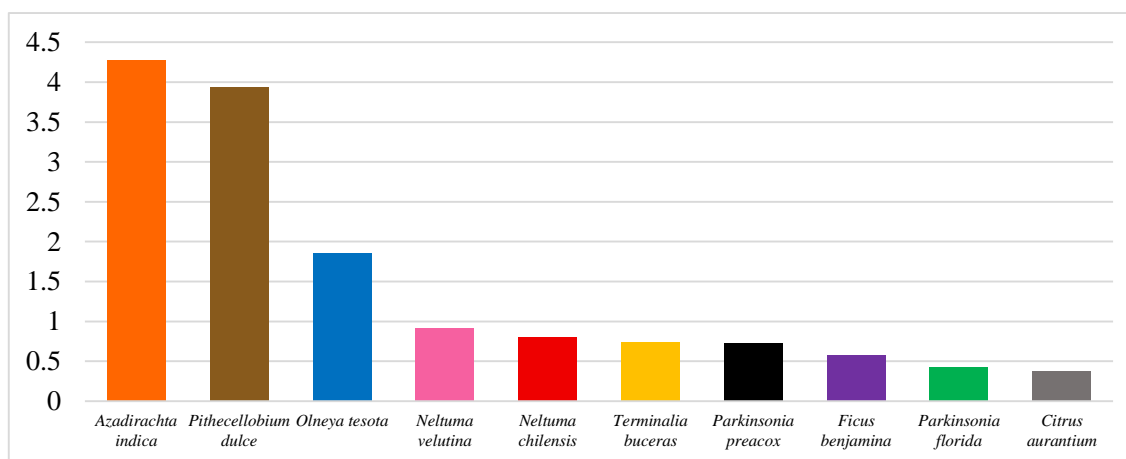


Figura 24. Promedios del mayor al menor por especie del peso en kg de las PS capturadas en un mes. **Fuente:** Elaboración propia.

Caracterización Geoquímica

Se analizó bajo SEM-EDS el tamaño y composición de las PS de cada una de las especies de estudio y se observó que, la mayor distribución, en cuanto al tamaño de la partícula, fue menor a 5 micras en todas las especies (Figura 25). Por otro lado, con respecto a la composición geoquímica, se identificaron algunos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) como: Bromo (Br), Aluminio (Al), Cromo (Cr), Niquel (Ni), Plomo (Pb) y Zirconio (Zr); a continuación, se detallan los resultados por especie de estudio:

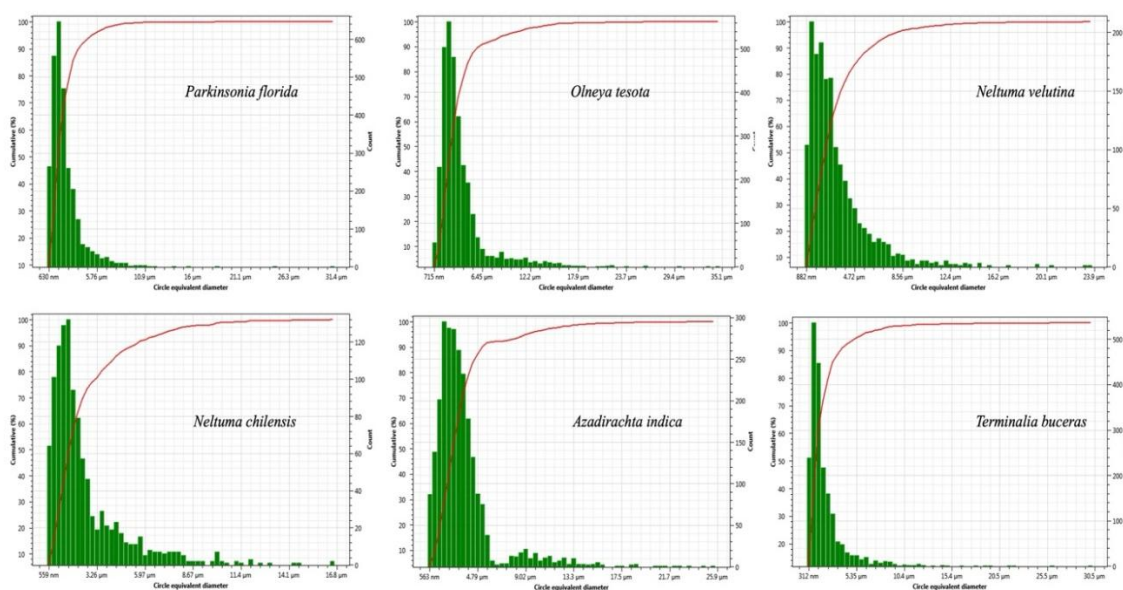

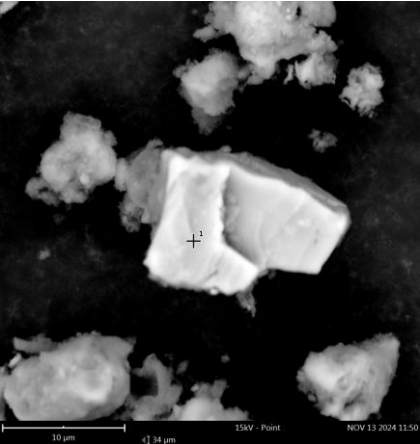


Figura 25. Distribución del tamaño de partículas (PS) capturadas por las distintas especies de estudio, análisis realizado en SEM. **Fuente:** Elaboración propia.

- *Neltuma velutina*. De la especie *N. velutina* tomada en Panteón Yáñez, se encontraron partículas mayormente con un diámetro entre 882 nm y 8.56 μm (Figura 25), se encontraron los elementos enlistados en la Tabla 7, destacando algunos poco comunes o EPT como el Bromo (Br), Cromo (Cr) Níquel (Ni) y Bario (Ba).

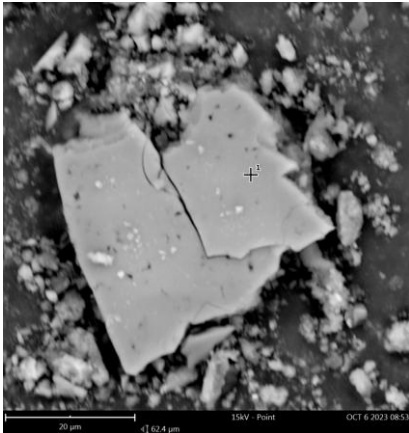
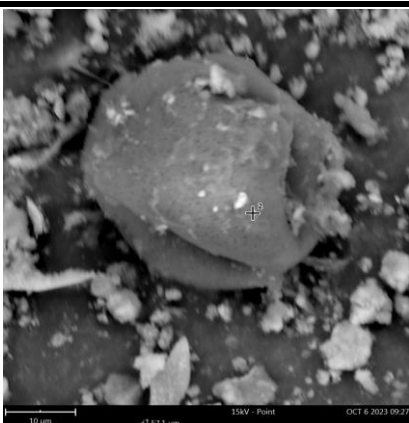
Tabla 7. Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de *N. velutina* en Panteón Yáñez.

Partícula analizada	Elemento	Símbolo	Peso (μm)
	Silicio	Si	18.8
	Fierro	Fe	24.9
	Bromo	Br	12.7
	Oxígeno	O	12.7
	Cromo	Cr	5.2
	Magnesio	Mg	2.5
	Carbon	C	17.6
	Potasio	K	1.1
	Calcio	Ca	0.9
	Níquel	Ni	3.6
	Silicio	Si	21.9
	Potasio	K	9.9
	Aluminio	Al	9.8
	Oxígeno	O	17.5
	Bario	Ba	40.8

Fuente: Elaboración propia con datos e imágenes arrojados por SEM.

- ***Parkinsonia florida*.** De la especie *P. florida* tomada en Panteón Yáñez, se encontraron partículas mayormente con un diámetro entre 630 nm y 5.76 μm (Figura 25), se encontraron los elementos enlistados en la Tabla 8, destacando algunos poco comunes o raros como el circonio (Zr), itrio (Y) e indio (In).

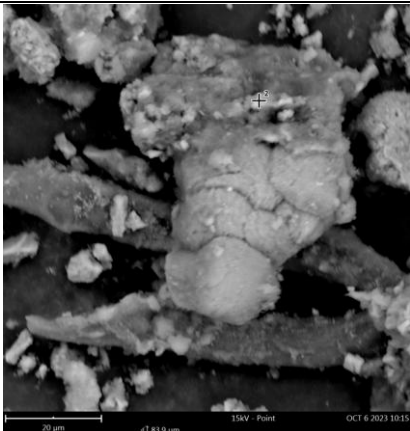
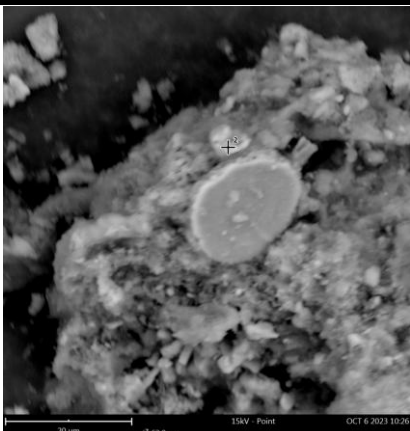
Tabla 8. Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de *P. florida* en Panteón Yáñez.

Partícula analizada	Elemento	Símbolo	Peso (μm)
	Calcio	Ca	27.5
	Oxígeno	O	34.1
	Carbono	C	26.5
	Silicio	Si	2.1
	Cloro	Cl	1.7
	Aluminio	Al	1.7
	Potasio	K	1.7
	Magnesio	Mg	1.7
	Azufre	S	0.9
	Circonio	Zr	1.0
	Itrio	Y	1.3
	Carbono	C	54.1
	Oxígeno	O	39.5
	Calcio	Ca	4.2
	Magnesio	Mg	0.8
	Silicio	Si	0.4
	Aluminio	Al	0.4
	Indio	In	0.6

Fuente: Elaboración propia con datos e imágenes arrojados por SEM.

- ***Olneya tesota*.** De la especie *O. tesota* tomada en UNISON, se encontraron partículas mayormente con un diámetro entre 715 nm y 6.45 μm (Figura 25), se encontraron los elementos enlistados en la Tabla 9, destacando algunos poco comunes o raros como el estroncio (Sr) y plutonio (Pu).

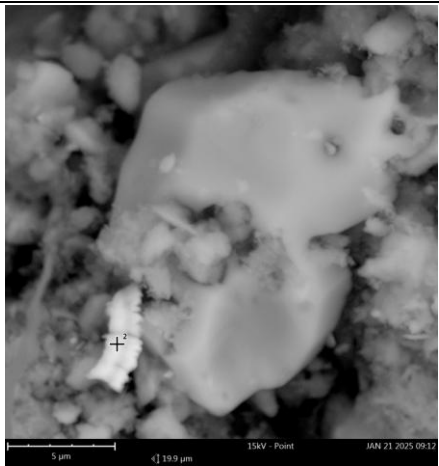
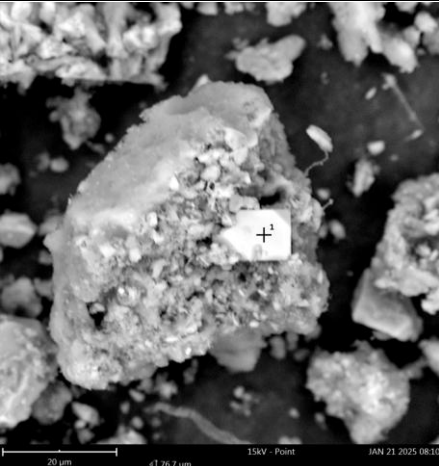
Tabla 9. Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de *O. tesota* en UNISON.

Partícula analizada	Elemento	Símbolo	Peso (μm)
	Silicio	Si	5.9
	Oxígeno	O	37.7
	Estroncio	Sr	1.5
	Carbono	C	29.3
	Calcio	Ca	3.1
	Nitrógeno	N	18.3
	Cloro	Cl	0.8
	Magnesio	Mg	0.8
	Sodio	Na	1.1
	Bromo	Br	1.4
	Calcio	Ca	46.8
	Silicio	Si	3.0
	Oxígeno	O	25.7
	Carbono	C	11.5
	Aluminio	Al	1.9
	Cloro	Cl	1.1
	Fósforo	P	0.6
	Molibdeno	Mo	1.8
	Plutonio	Pu	7.6

Fuente: Elaboración propia con datos e imágenes arrojados por SEM.

- *Azadirachta indica*. De la especie *A. indica* tomada en UNISON, se encontraron partículas mayormente con un diámetro entre 563 nm y 4.79 µm (Figura 25), se encontraron los elementos enlistados en la Tabla 10, destacando algunos poco comunes o EPT como el Cromo (Cr) y Cloro (Cl).


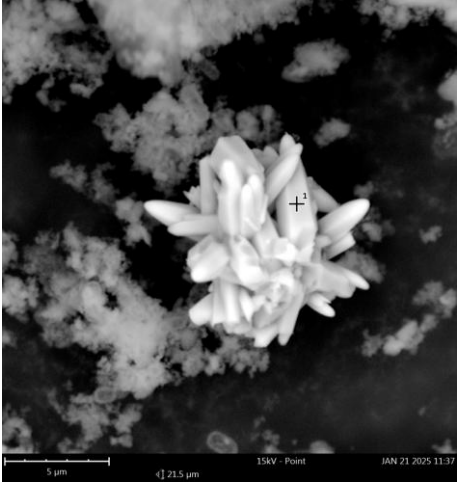
Tabla 10. Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de *A. indica* en UNISON.

Partícula analizada	Elemento	Símbolo	Peso (µm)
	Fierro	Fe	58.2
	Silicio	Si	6.6
	Manganeso	Mn	13.9
	Oxigeno	O	8.7
	Cromo	Cr	7.4
	Aluminio	Al	1.7
	Calcio	Ca	1.2
	Cloro	Cl	0.8
	Magnesio	Mg	1.4
	Cloro	Cl	55.8
	Sodio	Na	44.2

Fuente: Elaboración propia con datos e imágenes arrojados por SEM.

- ***Terminalia buceras*.** De la especie *T. buceras* tomada en UNISON, se encontraron partículas mayormente con un diámetro entre 312 nm y 5.35 μm (Figura 25), se encontraron los elementos enlistados en la Tabla 11, destacando algunos poco comunes o EPT como el Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Zinc (Zn).

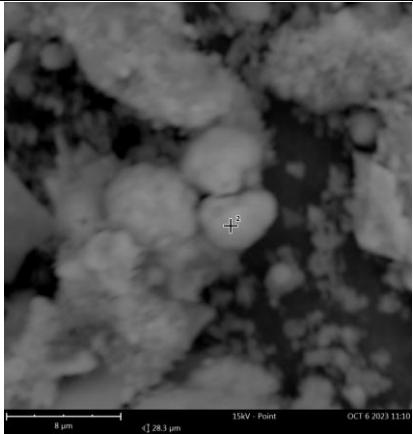
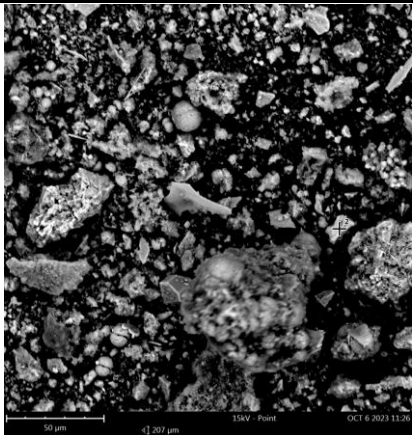
Tabla 11. Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de *T. buceras* en Panteón Yáñez.

Partícula analizada	Elemento	Símbolo	Peso (μm)
	Silicio	Si	9.4
	Oxígeno	O	33.5
	Estaño	Sn	19.8
	Plomo	Pb	25.2
	Magnesio	Mg	2.9
	Aluminio	Al	2.2
	Cobre	Cu	7.0
	Oxígeno	O	31.9
	Zinc	Zn	65.8
	Silicio	Si	2.2

Fuente: Elaboración propia con datos e imágenes arrojados por SEM.

- *Neltuma chilensis*. De la especie *N. chilensis* tomada en UNISON, se encontraron partículas mayormente con un diámetro entre 559 nm y 3.26 μm (Figura 25), se encontraron los elementos enlistados en la Tabla 12, destacando algunos poco comunes o raros como el telurio (Te) y rodio (Rh).

Tabla 12. Composición geoquímica de las PS en muestra tomada de un individuo de *N. chilensis* en UNISON.

Partícula analizada	Elemento	Símbolo	Peso (μm)
	Calcio	Ca	27.1
	Telurio	Te	7.5
	Oxígeno	O	39.0
	Carbono	C	15.8
	Silicio	Si	1.9
	Molibdeno	Mo	3.3
	Cloro	Cl	1.1
	Magnesio	Mg	1.2
	Fósforo	P	0.8
	Bromo	Br	2.2
	Cloro	Cl	24.9
	Sodio	Na	25.4
	Silicio	Si	15.0
	Rodio	Rh	8.3
	Magnesio	Mg	5.7
	Oxígeno	O	18.4
	Calcio	Ca	2.3

Fuente: Elaboración propia con datos e imágenes arrojados por SEM.

Absorción de CO₂

Mediciones Bajo Condiciones de Estrés Hídrico

De acuerdo con los valores obtenidos (Anexo 2), se pueden observar unas diferencias en cuanto a la fijación de CO₂ y aprovechamiento del agua. Destacando que las especies *N. neltuma* y *N. chilensis* fueron las especies que absorbieron la mayor cantidad de CO₂, pero con la mayor pérdida de agua también. Algo interesante de mencionar es el comportamiento de la especie *O. tesota*, la cual presentó valores muy bajos en absorción de CO₂ en comparación a las demás especies, pero constantes en el tiempo, sin cambios abruptos relacionados con la cantidad de agua disponible en el suelo, a su vez, fue la especie que perdió la menor cantidad de agua durante su actividad fotosintética, tal y como se alcanza a apreciar más claramente en la Figuras 26 y 27.

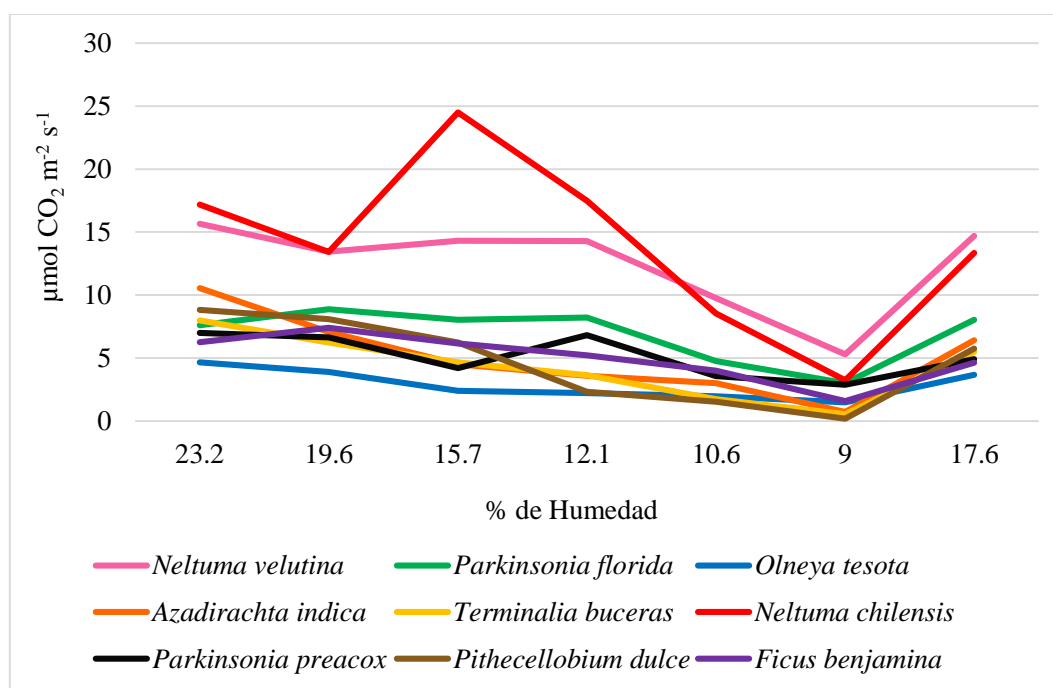


Figura 26. Cantidad de CO₂ absorbido (Ai) por las especies de estudio. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

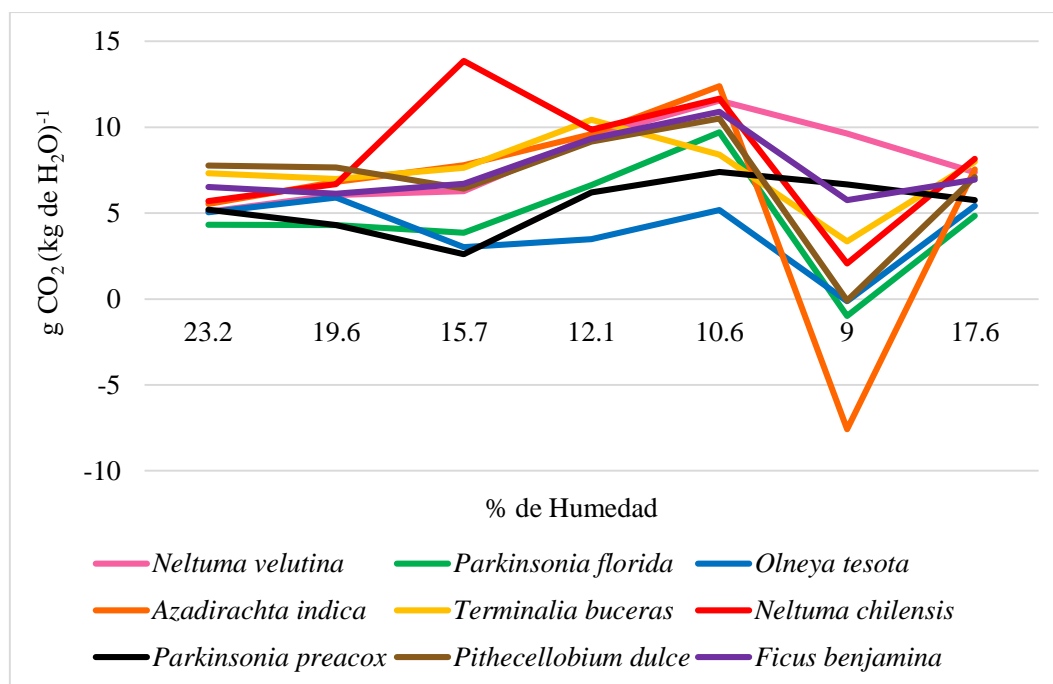


Figura 27. Cantidad de CO₂ absorbido por kg de agua perdida (UEA) de las especies de estudio. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

En cuanto a los valores promedio de A_i , las especies que presentaron significativamente una mayor fijación de CO₂ fueron *N. chilensis* ($13.957 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *N. velutina* ($12.490 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Seguido por las especies *P. florida* ($6.930 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *P. preacox* ($5.143 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *A. indica* ($5.116 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *F. benjamina* ($5.028 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *P. dulce* ($4.696 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *T. buceras* ($4.322 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Mientras que la especie *O. tesota* presentó la menor fijación de CO₂ con un valor de $2.891 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 28).

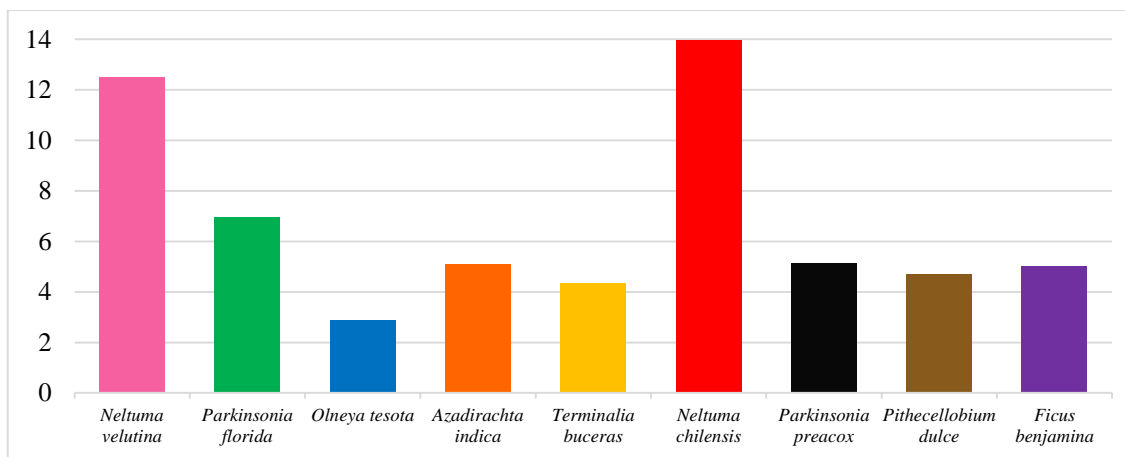


Figura 28. Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

En el caso de la transpiración de agua (E), *N. velutina* ($4.3976 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *N. chilensis* ($4.0405 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fueron las especies que presentaron los valores más altos en cuanto a pérdida de agua, siendo estos similares entre sí. Seguidos de *P. florida* ($3.4433 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *P. precox* ($2.3481 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Luego tenemos *A. indica* y *F. benjamina* con el mismo valor de $1.7829 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, finalmente *P. dulce* ($1.5838 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *T. buceras* ($1.3829 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *O. tesota* ($1.3476 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con valores también muy similares entre sí (Figura 29).

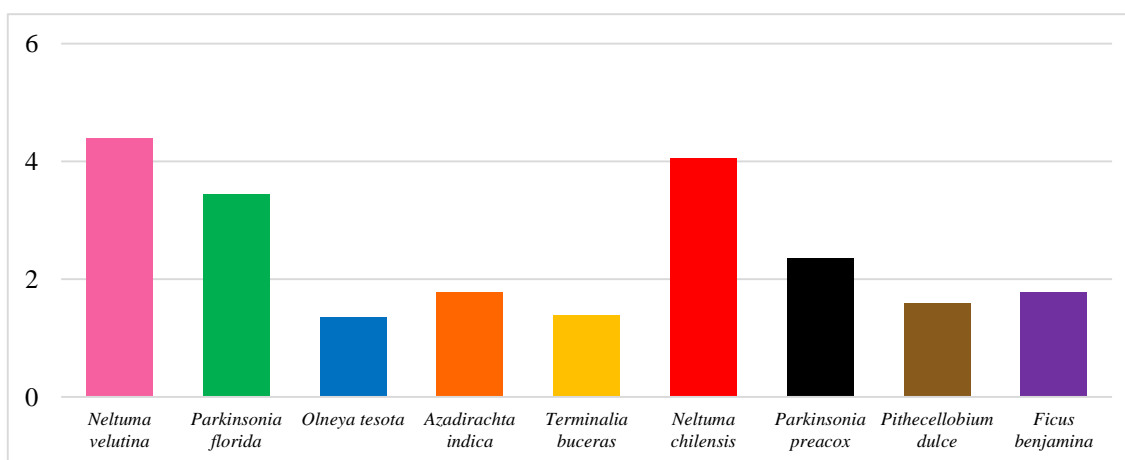


Figura 29. Valores promedio de E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

Finalmente, en cuanto al uso eficiente del agua (UEA), los resultados muestran que *O. tesota* fue la especie que, significativamente, fijó menos gramos de CO₂ por kilogramo de agua perdida con un valor de 3.990 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹. Por otro lado, *N. chilensis* fue la especie con la mayor pérdida de agua por gramo de CO₂ fijado con un valor de 8.287 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹, seguido por *N. velutina* con 7.921 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹, *F. benjamina* con 7.471 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹, *T. buceras* con 7.445 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹, *P. dulce* con 6.933 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹, *A. indica* con 6.011 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹, *P. preacox* con 5.450 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹ y *P. florida* con 4.671 g CO₂ (kg H₂O)⁻¹ (Figura 30).

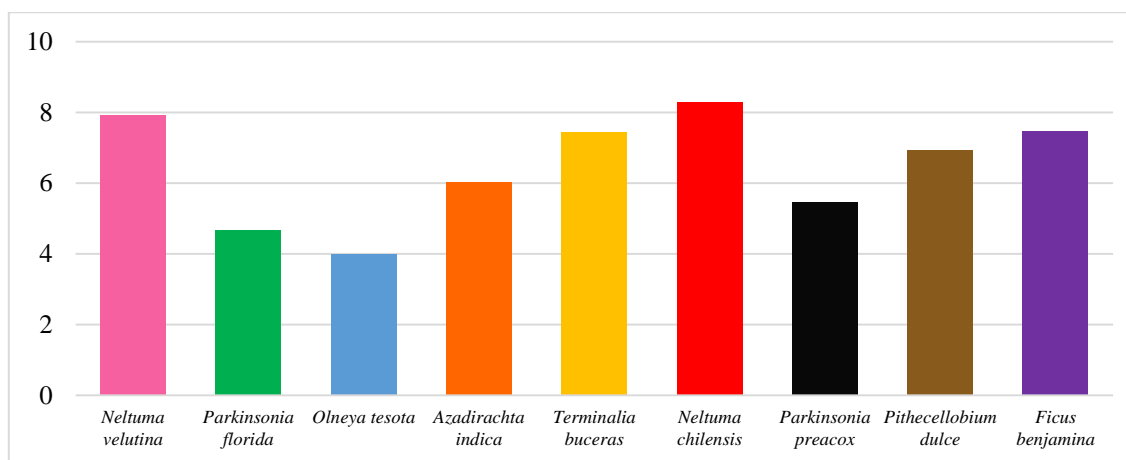


Figura 30. Valores promedio de UEA (g CO₂ (kg H₂O)⁻¹) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

Mediciones Estacionales

En relación con los promedios de *Ai* durante cada estación de las especies de estudio, se obtuvo lo siguiente:

- **Otoño.** De acuerdo con los valores obtenidos, las especies que presentaron una mayor absorción de CO₂ durante el otoño fueron *O. tesota* (9.6600 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y *N. chilensis* (9.0567 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) con valores muy similares entre sí. Seguido de *P. preacox* (7.5867 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), *N. velutina* (6.2767 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), *A. indica* (4.6933 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), *P. dulce* (4.5500 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), *F. benjamina* (3.6500 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y *P. florida* (2.5867 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). Mientras que, *T. buceras*

($1.7600 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fue la especie con la menor actividad fotosintética durante la estación de otoño (Figura 31).

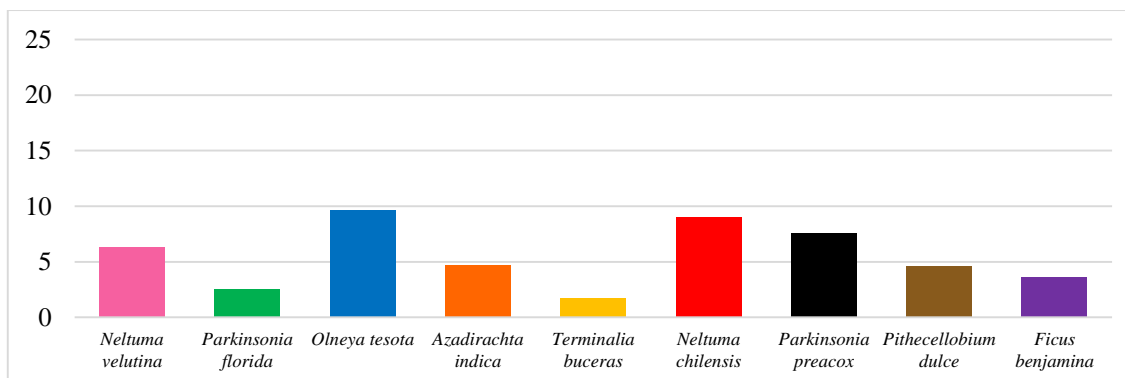


Figura 31. Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en otoño.
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

- **Invierno.** De acuerdo con los valores obtenidos, las especies que presentaron una mayor absorción de CO_2 durante el invierno fueron *N. velutina* ($12.8967 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *P. preacox* ($10.5100 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Continúa con *O. tesota* ($8.3100 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *P. dulce* ($6.5333 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *T. buceras* ($6.1900 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *N. chilensis* ($5.6600 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *F. benjamina* ($4.2067 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Seguido de *A. indica* ($2.9367 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *P. florida* ($2.1667 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), siendo estas dos últimas las especies con la menor actividad fotosintética durante la estación de invierno (Figura 32).

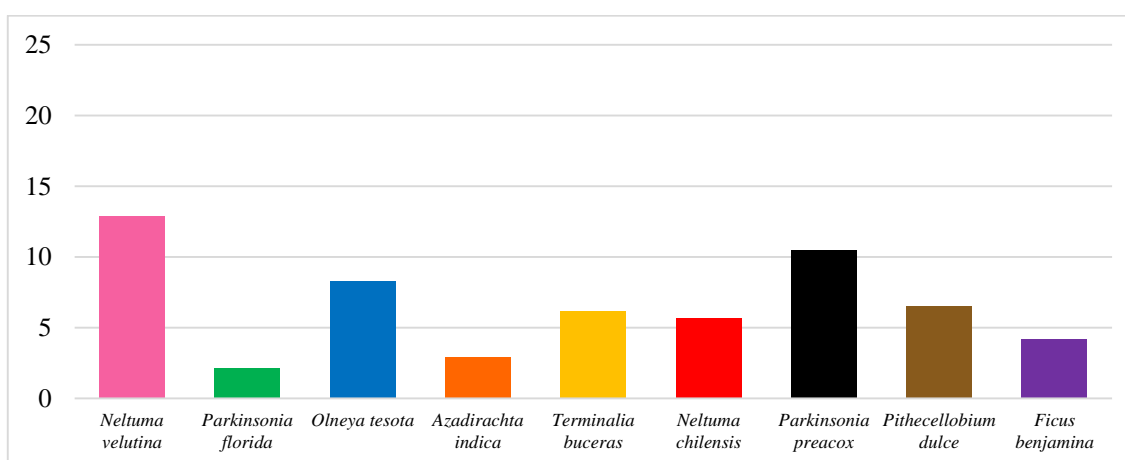


Figura 32. Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en invierno. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

- **Primavera.** De acuerdo con los valores obtenidos, la especie que presentó una mayor absorción de CO_2 durante la primavera también fue *N. velutina* ($14.1667 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Seguido de *P. preacox* ($9.6200 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *P. dulce* ($6.5767 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *O. tesota* ($5.5533 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *T. buceras* ($4.5100 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Luego se encuentran *A. indica* ($3.9900 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *N. chilensis* ($3.6400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *P. florida* ($3.0567 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con valores similares entre sí. Finalmente se encuentra *F. benjamina* ($2.6800 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con la menor actividad fotosintética durante la estación de primavera (Figura 33).

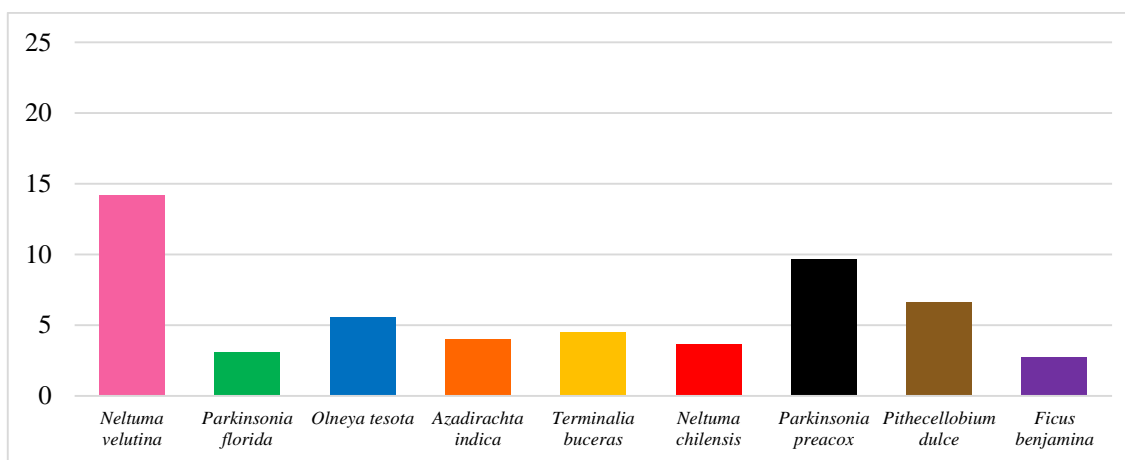


Figura 33. Valores promedio de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en primavera. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

- **Verano.** De acuerdo con los valores obtenidos, la especie que presentó una mayor absorción de CO_2 durante el verano de nueva cuenta fue *N. velutina* = $22.1667 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Seguido de *O. tesota* ($15.3067 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *N. chilensis* ($13.7500 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *P. dulce* ($12.0267 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *P. preacox* ($11.8233 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *P. florida* ($11.0333 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Continúa con *A. indica* ($6.7300 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), *T. buceras* ($5.4367 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *F. benjamina* ($3.5367 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), presentando los valores más bajos de actividad fotosintética durante la estación de verano (Figura 34).

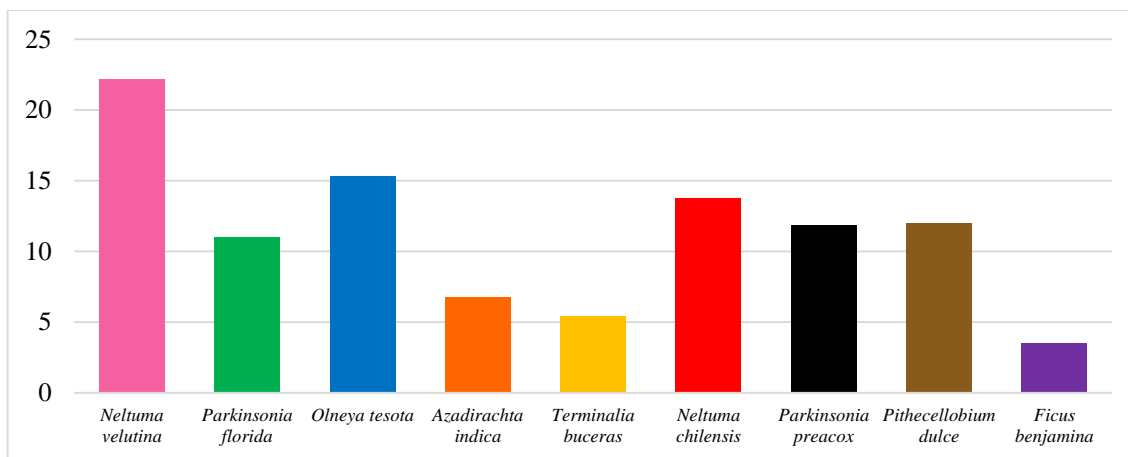


Figura 34. Valores promedio de Ai ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de las especies de estudio en verano. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

A continuación, se muestran los promedios de Ai en las cuatro estaciones por especie (Tabla 13):

Tabla 13. Promedios de Ai ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en las cuatro estaciones por especie.

Especie	Ai
<i>Neltuma velutina</i>	13.8767
<i>Parkinsonia florida</i>	4.7108
<i>Olneya tesota</i>	9.7075
<i>Azadirachta indica</i>	4.5875
<i>Terminalia buceras</i>	4.4742
<i>Neltuma chilensis</i>	8.0267
<i>Parkinsonia preacox</i>	9.8850
<i>Pithecellobium dulce</i>	7.4217
<i>Ficus benjamina</i>	3.5183

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

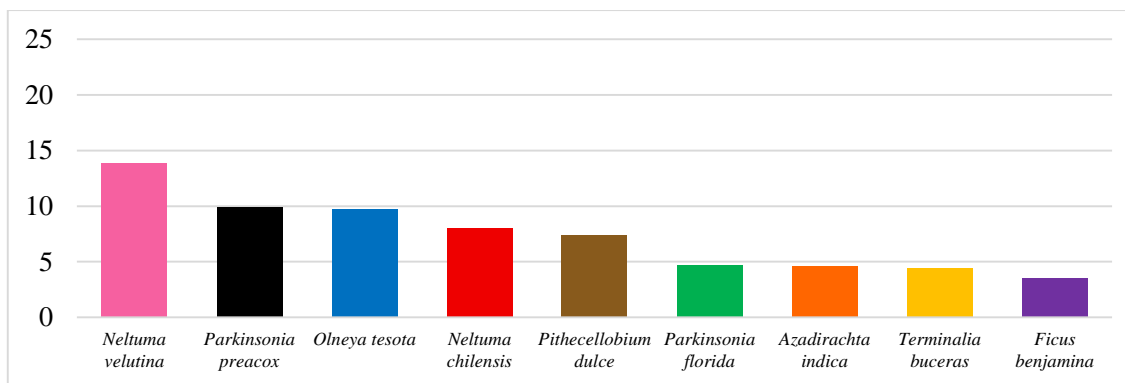


Figura 35. Promedios del mayor al menor de A_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en las cuatro estaciones de las especies de estudio. **Fuente:** Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

Comparación de Medias en la Absorción de CO_2

- **Evaluación bajo condiciones de estrés hídrico.**
 - **Fotosíntesis instantánea (A_i).** Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.0001$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de A_i de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico (Tabla 14).

Tabla 14. Comparación de medias de la fotosíntesis instantánea (A_i) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico mediante la prueba de Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Especie	Comparación	Media
<i>Neltuma chilensis</i>	A	13.957
<i>Neltuma velutina</i>	A	12.490
<i>Parkinsonia florida</i>	B	6.930
<i>Parkinsonia preacox</i>	B	5.143
<i>Azadirachta indica</i>	B	5.116
<i>Ficus benjamina</i>	B	5.028
<i>Pithecellobium dulce</i>	B	4.696
<i>Terminalia buceras</i>	B	4.322
<i>Olneya tesota</i>	C	2.891

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

- **Transpiración (E).** Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.0001$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de E de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico (Tabla 15).

Tabla 15. Comparación de medias de la transpiración (E) de las especies de estudio bajo condiciones de estrés hídrico mediante la prueba de Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Especie	Comparación	Media
<i>Neltuma velutina</i>	A	4.3976
<i>Neltuma chilensis</i>	A	4.0405
<i>Parkinsonia florida</i>	A	3.4433
<i>Parkinsonia preacox</i>	B	2.3481
<i>Azadirachta indica</i>	B	1.7829
<i>Ficus benjamina</i>	B	1.7829
<i>Pithecellobium dulce</i>	B	1.5838
<i>Terminalia buceras</i>	B	1.3829
<i>Oleña tesota</i>	B	1.3476

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en invernadero y el software SAS.

- **Uso eficiente del agua (UEA).** No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.0428$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de UEA de las especies de estudio.

- **Evaluación estacional.**

- **Fotosíntesis instantánea (Ai).** Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.0001$, prueba Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$) entre las medias de Ai de las especies de estudio en las diferentes estaciones del año (Tabla 16).

Tabla 16. Comparación de medias de la fotosíntesis instantánea (Ai) de las especies en las diferentes estaciones del año mediante la prueba de Tukey-Kramer de $p \leq 0.05$.

Especie	Comparación			Media
<i>Neltuma velutina</i>	A			13.8767
<i>Parkinsonia preacox</i>	A	B		9.8850
<i>Oleña tesota</i>	A	B		9.7075
<i>Neltuma chilensis</i>		B	C	8.0267
<i>Pithecellobium dulce</i>		B	C D	7.4217
<i>Parkinsonia florida</i>			C D	4.7108
<i>Azadirachta indica</i>			C D	4.5875
<i>Terminalia buceras</i>			C D	4.4742
<i>Ficus benjamina</i>			D	3.5183

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.

DISCUSIONES

Capacidad de los Árboles para Mitigar la Contaminación del Aire en Zonas Urbanas

En general se obtuvo una buena captación de PS en las hojas de las diferentes especies de estudio, notándose algunas variaciones influenciadas por las características propias de las especies y por las condiciones ambientales de los diferentes sitios de muestreo. Lo anterior es importante de considerar, ya que los sitios de muestreo de este estudio se encontraban en zona limitadas, por lo que se tenía que trabajar con lo que había presente y eso provocó que las características de los individuos y del ambiente fueran diferentes, lo cual pudo influir en los resultados. Se tuvieron que realizar ajustes en los datos obtenidos en la captura de PS de algunos sitios debido a la pérdida de algunas muestras porque los árboles fueron podados y se tuvo que proceder a calcular promedios con datos de otros individuos. Esta fue la problemática principal a la cual se tuvo enfrentar, dado a que todos los árboles estuvieron en zonas públicas y los esfuerzos por evitar la poda durante los meses de colecta de PS no surtieron efecto en algunos casos. No obstante, este estudio es útil para conocer la capacidad individual de las especies trabajadas para capturar partículas contaminantes del aire.

Algunos de los factores determinantes para la captación de PS a través de los árboles, son las características del dosel y hojas, las cuales influyen en su capacidad de retención, resuspensión y lavado de las partículas; características como la densidad de la copa, el tamaño y forma de las hojas, rugosidad, vello y contenido de cera en la superficie foliar, así como la madurez, son determinantes en la cantidad de PS que pueden capturar las diferentes especies de árboles (Lindén, J. *et al.*, 2023).

Las especies nativas evaluadas en este estudio tienen la particularidad de presentar hoja pequeña -microfila- (a excepción del *P. dulce*), sin embargo, en el caso de *O. tesota*, demostró tener una alta capacidad de captación de PS, incluso mayor que algunas de las especies introducidas cuya superficie foliar es mayor, como *T. buceras*, *F. benjamina* y *C. aurantium* (Figura 24). Chávez-García y González-Méndez (2021) mencionan que los árboles de hoja ancha son los que presentan una mayor capacidad de retención de PS solo después de que la hoja está completamente desarrollada, debido a que la superficie de la hoja (p. ej., el ángulo de la hoja, el contenido y la estructura de cera, etc.) cambia conforme se va desarrollando, a

su vez, los cambios en las características de las hojas a lo largo del año (p. ej., el deterioro de la cutícula o la caída de las hojas) provoca variaciones estacionales en la acumulación de PS en las hojas, lo cual concuerda con lo obtenido en este estudio, ya que se registró una variación en la cantidad de PS obtenidas por las especies de estudios durante las dos estaciones de muestreo.

Durante la primavera, las especies nativas obtuvieron los valores más altos de captación de PS, teniendo a *P. florida* (0.5335 g) en primer lugar, seguido a *O. tesota* (0.3443 g) y *N. velutina* (0.2989 g) en segundo y tercer lugar, respectivamente. Mientras que, los valores de captación de PS más bajos fueron los de *A. indica* (0.1512 g) y *N. chilensis* (0.1550 g), ambas especies introducidas. Los patrones cambiaron durante el invierno, ya que ahora fue *A. indica* (0.5969 g) la especie con la mayor captación de PS, seguido de *N. chilensis* (0.5233 g) y *T. buceras* (0.4583 g), esta última también una especie introducida. Después tenemos las especies nativas *O. tesota* (0.4517 g), *N. velutina* (0.3910 g) y *P. florida* (0.1944 g), siendo esta última la especie que había obtenido los valores más altos de captación de PS en primavera. En todos los casos se obtuvo un incremento en la cantidad de PS capturadas en invierno, a excepción de *P. florida* debido a pérdida de gran parte de su follaje (Schuch y Kelly, 2008) en invierno, lo cual concuerda con el incremento de las concentraciones de PS en el aire característico de la estación de invierno en Hermosillo (Figura 36) (Meza-Figueroa *et al.*, 2024).

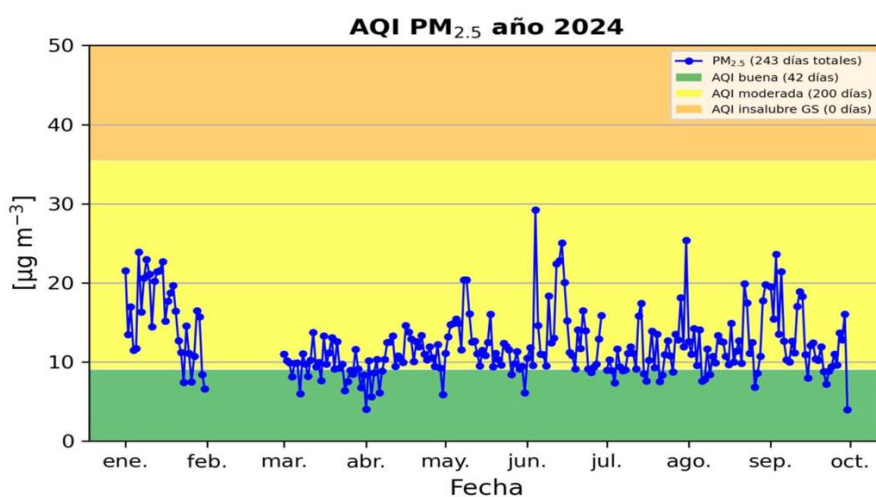


Figura 36. Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo, Sonora, periodo enero a septiembre del 2024 para partículas suspendidas PM_{2.5}, promedios diarios. Valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA. **Fuente:** Meza-Figueroa *et al.*, 2024.

En cuanto a la captación total por especie en ambas estaciones, se registró que *A. indica* (0.7481 g) y *P. florida* (0.7279 g) fueron las especies más eficientes en capturar partículas, seguido de *N. velutina* (0.6899 g), *N. chilensis* (0.6783 g) y *T. buceras* (0.6663 g). No existen datos en otras ciudades sobre estas mismas especies, sin embargo, un trabajo realizado en la ciudad de Chihuahua (Alcalá *et al.*, 2008) con otras especies arbóreas encontraron que el *Fraxinus spp.* (fresno) pudo retener 0.520 g de polvo atmosférico, mientras *Platanus Occidentalis* (sicoromo) retuvo 4.316 g, *Melia azedarach* (lila) retuvo 0.1547 g, *Morus spp* (árbol de moro) retuvo 0.190 g y *Cupressus arizonica* (ciprés) retuvo 6.28 g. Nótese que los rangos de valores no difieren mucho a los registrados en esta investigación a pesar de las grandes diferencias en cuanto a las condiciones climáticas y que las especies son de mayor densidad y área foliar que las evaluadas en este estudio.

La carga de PS en las hojas también depende de los niveles de contaminación ambiental local, lo cual depende de la cantidad y frecuencia de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, la meteorología (la velocidad del viento y la precipitación son los factores meteorológicos más importantes), la topografía urbana y los patrones estacionales que afectan la composición y distribución de las PS (Chávez-García y González-Méndez, 2021). En este sentido se presentaron diferencias en los distintos sitios de muestreo, la zona donde los árboles tuvieron una mayor captación de PS fue en el centro de la ciudad (UNISON = 0.8980 gr) y zona norte (Panteón Yáñez = 0.8027 g). Ambas zonas se encuentran muy cercanas a vialidades de gran importancia y mucha afluencia vehicular (Meza-Figueroa *et al.*, 2024) por lo que se puede asociar a que existe mayor concentración de PS en esas zonas. Además, la UNISON es la universidad más grande y concurrida de la ciudad y se encuentra rodeada por cuatro de los principales bulevares, por lo que hay grandes emisiones provenientes del tráfico vehicular y actividades antropogénicas. En el caso de Panteón Yáñez, también se encuentra a lado de un bulevar importante, sin embargo, en este caso, la cantidad de PS se puede deber principalmente al polvo y tierra suelta.

Con respecto a la estimación de la captación total en el dosel por individuo de las distintas especies de estudio, se incluyeron las especies evaluadas en la tesis de licenciatura de Rodríguez-Becerra (En proceso) debido a que el periodo de muestreo y la metodología fueron muy similares, y con la intención de enriquecer los resultados obtenidos. En este caso se obtuvo que, en promedio, los árboles con mayor capacidad de captación de PS por individuo fueron *A. indica* (4.2682 kg) y *P. dulce* (3.9306 kg), siendo ambas de las especies con mayor masa foliar, seguido de *O. tesota* (1.8515 kg), aun cuando su masa foliar es menor.

Salmond *et al.* (2016) menciona que los árboles urbanos no proporcionan un beneficio generalizado bajo todos los contextos, por ello, al momento de realizar una reforestación urbana, es necesario realizar un análisis sobre la ubicación que tendrán los árboles, los beneficios que se busca obtener de ellos, la diversidad de especies (tamaño, forma, crecimiento, fenología), su mantenimiento y si cumple con los objetivos de planificación urbana. El autor también menciona que enfatizar excesivamente un solo proceso para justificar el arbolado urbano (como la reducción de la contaminación atmosférica o la mitigación del cambio climático) puede tener consecuencias imprevistas, por ejemplo, la selección de especies arbóreas para mitigar la contaminación atmosférica y la producción de polen que, en el caso de Hermosillo, Sonora, es un tema importante. Cabe recalcar que la vegetación no es inmune a la contaminación, a veces las PS reaccionan formando nuevos compuestos que pueden dañar o penetrar los tejidos foliares con mayor facilidad provocando que las hojas puedan presentar áreas necróticas, cambios en la pigmentación o en su grosor (Chávez-García y González-Méndez, 2021).

El uso de los árboles urbanos como estrategia de mitigación de la contaminación del aire debe ser vista como una medida preventiva, siendo la reducción de las fuentes de emisión la acción principal y más eficaz; el segundo mejor método es extender la distancia entre las fuentes contaminantes y los receptores, mejorando la dilución y la dispersión y, por lo tanto, reduciendo las concentraciones en un receptor determinado, los árboles pueden ser útiles en este caso, por ejemplo, cuando se utilizan como barreras para separar el tráfico de los peatones; por último, la tercera mejor opción de mitigación es proteger a los receptores, lo cual implica introducir intervenciones directas que reduzcan las concentraciones de

contaminación en el lugar del receptor, en este caso los árboles pueden utilizarse considerando todos los factores y características mencionadas anteriormente (Hewitt *et al.* 2020).

Capacidad de los Árboles para Mitigar el Cambio Climático y Uso Eficiente del Agua en Zonas Urbanas

Las ciudades son la forma más radical de transformación del paisaje natural, pues su impacto no se limita solo a cambiar la morfología del terreno con la construcción de edificios y calles, sino que, dichas estructuras urbanas, también modifican las condiciones climáticas y ambientales, como el aumento de la temperatura (islas de calor) y radiación local, la degradación de los suelos al haber menos infiltración del agua pluvial y mayor escorrentía superficial, y disminuyendo la velocidad del viento; por ello, los árboles dentro de las ciudades están expuestos a presiones y desafíos para su supervivencia a los cuales los árboles en entornos rurales o naturales no lo están (Guillén-Mena, V. y Orellana, D.; Salmond *et al.*, 2016).

En la actualidad, la ciudad de Hermosillo lleva dos años (2023 y 2024) consecutivos en estado de sequía extrema con temperaturas récord durante los meses de julio a octubre, siendo esto el resultado de la sobreexplotación de las fuentes de agua, la degradación de ecosistemas y una administración deficiente (López-Ivich, K., 2025).

Las SbN, como la reforestación, ha demostrado ser efectiva para mejorar la disponibilidad de agua, los árboles de las calles interceptan y almacenan el agua de lluvia, filtran la escorrentía en el dosel y en la zona radicular, y extraen la humedad del suelo, por lo que recuperar la vegetación no solo favorece la recarga de acuíferos, sino que también reduce la erosión y mejora la calidad del agua (Salmond *et al.*, 2016, López-Ivich, K., 2025).

Las reforestaciones urbanas deben de realizarse de manera estratégica, haciendo buen uso de los espacios disponibles y haciendo una correcta selección de especies de árboles que permitan un ahorro en el consumo de agua, permitiendo que se incremente la cubierta vegetal sin que implique un gasto excesivo en su mantenimiento.

Los resultados de las mediciones de las especies de estudio en cuanto a su UEA para su crecimiento y actividad fotosintética, nos indican que existen variaciones importantes entre las especies, siendo *N. chilensis* ($13.957 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y *N. velutina* ($12.490 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), las especies que presentaron los valores más altos de A_i , sin embargo, dichas especies también fueron las que presentaron mayor pérdida de agua por CO_2 fijado con los valores de 8.287 y $7.921 \text{ g CO}_2 (\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$, respectivamente.

Las demás especies obtuvieron valores similares entre sí tanto en la fijación de CO_2 como en el consumo de agua, a excepción de *O. tesota*, con un valor de A_i de $2.891 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y UEA de $\text{g CO}_2 (\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$, siendo en ambos casos la especie con los valores más bajos. Algo interesante a destacar de dicha especie es que, si bien los valores de A_i fueron los más bajos, estos fueron constantes en el tiempo sin tener efecto o diferencia significativa por la falta de agua, esto se debe a que algunas especies de regiones secas disminuyen su apertura estomática para evitar la transpiración excesiva, aunque eso disminuya su captación de CO_2 , y así incrementar su capacidad de sobrevivencia durante largos períodos de sequía (Acuña-Acosta *et al.*, 2021).

En cuanto a los promedios obtenidos de las mediciones estacionales de fotosíntesis, *N. chilensis* presentó un valor de $13.8767 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ siendo la especie con el valor más alto. Algo interesante a notar es que, en condiciones al aire libre, todas las especies de la familia de las leguminosas (Anexo 1, incluyendo *P. preacox* y *P. dulce*), fueron las que mayor asimilación de CO_2 presentaron. Se observa una diferencia para *P. florida*, la cual pudo haber ocurrido por la pérdida de hojas en otoño e invierno, sin embargo, no se debe de pasar por alto la adaptación fisiológica de todas las especies del género *Parkinsonia*, que es poseer un tronco verde que les permite realizar la fotosíntesis, siendo otra de las adaptaciones importantes que les permite sobrevivir en ambientes áridos (Ávila-Lovera *et al.*, 2024).

Debido al cambio climático, el peligro de que ocurran sequías severas está aumentando, por la disminución de la lluvia y el aumento de la temperatura y la evaporación en gran parte de México, sobre todo en los estados del norte, en donde ya se espera una disminución de -10% a -20% en la precipitación (Ortega-Gaucin, Cruz-Bartolón y Castellano-Bahena, 2018;

UNESCO, 2020). En este sentido, la manera en la que la población hace frente a las consecuencias de la sequía depende de la gestión, uso y manejo del agua, es decir, de la administración del recurso, por lo que es muy importante tener una percepción apropiada del fenómeno para lograr que la gestión del agua permita afrontar la sequía con más éxito, con base en una asignación apropiada del agua existente y del déficit (Velasco, Ochoa y Gutiérrez, 2005). Por lo que se deben utilizar especies de árboles en la reforestación de las ciudades, cuyas adaptaciones les permitan vivir de manera óptima en condiciones de extrema aridez y de altas temperaturas, como es el caso de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Especies más Eficientes para Reforestar y Mejorar el Ambiente Urbano en Hermosillo, Sonora

Con los datos obtenidos sobre la capacidad de los árboles estudiados para capturar PS, absorción de CO₂ (Ai) y uso eficiente del agua (UEA), se realizó una ponderación (Tabla 17) entre los valores promedio, con la finalidad de realizar un ranking (Tabla 18) de las especies relacionado a su eficacia para mejorar el ambiente urbano y cuya utilización en las actividades de reforestación dentro de la ciudad de Hermosillo sería más eficiente para reducir la contaminación del aire y hacer frente al cambio climático.

Tabla 17. Ponderación de especies para utilizar en la reforestación de Hermosillo, Sonora.

Especies	A	B	C	D	Sumatoria
<i>Neltuma velutina</i>	1	3	1	1	6
<i>Parkinsonia florida</i>	1	2	2	1	6
<i>Olneya tesota</i>	2	1	3	1	7
<i>Azadirachta indica</i>	3	2	1		6
<i>Terminalia buceras</i>	1	2	1		4
<i>Neltuma chilensis</i>	1	3	1		5
<i>Parkinsonia preacox</i>	1	2	2	1	6
<i>Pithecellobium dulce</i>	3	2	1	1	7
<i>Ficus benjamina</i>	1	2	1		4
<i>Citrus aurantium</i>	1				1

Fuente: Elaboración propia

Notas:

A: Captación de PS por individuo al mes (menos de 1 kg = 1 punto; entre 1 y 2 kg = 2 puntos; más de 3 kg = 3 puntos)

B: Fotosíntesis instantánea (Ai) (menos de 4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = 1 punto; entre 4 y 8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = 2 puntos; mayor a 9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = 3 puntos)

C: Consumo de agua (UEA) (mayor a 5 $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = 1 punto; entre 4 y 5 $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = 2 puntos; menor a 4 $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = 3 puntos)

D: Especie nativa (1 punto)

Tabla 18. Ranking de especies para utilizar en la reforestación de Hermosillo, Sonora.

Especie	Ranking para reforestación
<i>Olneya tesota</i>	1
<i>Pithecellobium dulce</i>	2
<i>Parkinsonia florida</i>	3
<i>Parkinsonia preacox</i>	4
<i>Neltuma velutina</i>	5
<i>Azadirachta indica</i>	6
<i>Neltuma chilensis</i>	7
<i>Terminalia buceras</i>	8
<i>Ficus benjamina</i>	9
<i>Citrus aurantium</i>	10

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, los motivos que hacen a los criterios evaluados variar de especie a especie son diversos; sin embargo, el consumo de agua y el origen de la especie, son de suma importancia, así como la capacidad que tienen para retener partículas en su follaje.

En el caso de la ciudad de Hermosillo, y de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda el uso de las especies posicionadas en los lugares del 1 al 5 del ranking para reforestación (Tabla 18). Algo en común de todas estas especies es que son nativas y pertenecen a la familia de las leguminosas (Fabaceae o Leguminosae), denominadas así por su fruto, que en la mayoría de las especies es una legumbre (vaina) (Dimmit, 2021).

Las leguminosas se encuentran dentro de las especies dominantes en Las Planicies de Sonora (vegetación exclusiva de Sonora) y de la mayoría de los árboles comunes del desierto sonorense (Dimmitt, 2021; Van-Devender y Reina-Guerrero, 2021). Toleran muy bien la sequía y son una de las familias más diversas debido a la gran variabilidad morfológica, fisiológica y ecológica (Aguilar *et al.*, 2021). Estas se caracterizan porque, en la mayoría de los casos, tienen una asociación simbiótica en sus raíces con bacterias fijadoras de nitrógeno (N_2) atmosférico en el suelo (Dimmitt, 2021). Dichas bacterias aportan a la planta el N_2 necesario para su desarrollo, por lo que no necesitan fertilizantes, y cuando las hojas se descomponen, liberan el N_2 y enriquecen el suelo (Aguilar *et al.*, 2021).

En el caso del *O. tesota* que ocupó el primer lugar dentro del ranking, es un árbol (en algunos casos arbusto) clave, icónico y longevo (hasta 800 años) del Desierto de Sonora; su nombre común es Palo Fierro, en alusión a la madera anciana, dura y pesada en el centro del árbol, que puede durar hasta 1600 años dada su fuerte capacidad para resistir la putrefacción; al ser uno de los pocos árboles de hoja perenne del desierto, puede proyectar una densa sombra durante todo el año y dar refugio a muchas especies; vive mejor en ambientes cálidos y es bastante resistente a las sequías; es un importante "árbol nodriza" del cactus saguaro (*Carnegiea gigantea*) y otras especies; además de mejorar el suelo por tener una asociación simbiótica con la bacterias fijadoras de N_2 en el suelo (McCoy, 2021; Arizona-Sonora Desert Museum, sin fecha).

En el segundo lugar, tenemos a *P. dulce*, poco reconocido en la ciudad de Hermosillo. De nombre común Guamúchil, es una especie nativa de México distribuida en las zonas de climas cálidos, resistente a la sequía; es un árbol perenne, frondoso y robusto, altamente resistente a diversas condiciones climática y tipos de suelo, de crecimiento rápido, que puede llegar hasta los 20 m de altura; su fruto es alimento para la fauna y humanos; es una especie con múltiples usos, considerado como un mejorador de suelo debido a su capacidad para fijar N_2 , controlar la erosión y mejorar la filtración de agua a través del sistema radical (CONABIO, sin fecha; Monroy y Colín, 2004; Datiles y Acevedo-Rodríguez, 2022).

En tercer lugar, se encuentra *P. florida*, conocida comúnmente como Palo Verde Azul, dada la tonalidad verde azulada del tallo, ramas y hojas; y, aunque esta especie, por ser caducifolia, pierde el follaje durante la mayor parte del año, cayendo después de la lluvia, la fotosíntesis se realiza mediante las ramas y tronco, independientemente de la ausencia de hojas; sus flores color amarillo brillante crean un espectáculo paisajístico y atraen a polinizadores; es resistente a la sequía, aunque su necesidad de agua sea moderada, y tolera diversos tipos de suelo (The Arizona Native Plant Society, sin fecha).

Enseguida tenemos a *P. preacox* en cuarto lugar, de nombre común Palo Brea, originaria del norte de México y del Desierto de Sonora. Esta especie, a veces llamada Palo Verde Sonorense, también es caducifolia pero, posee un tallo de color verde-lima que le permite realizar fotosíntesis; su corteza está cubierta con una capa cerosa para reducir la pérdida de agua y reflejar la luz; alcanza una altura de aproximadamente 7 m; dada su copa ancha, abierta y extendida, puede proporcionar muy buena sombra; tolera muy bien la sequía, ya que se adapta fácilmente a suelos desérticos y con baja disponibilidad hídrica, de hecho, pueden dañarse o hasta morir en sitios con una irrigación excesiva; es una especie que puede colonizar en ambientes degradados (IMPLAN, 2020; The University of Arizona, sin fecha).

Y por último tenemos a *N. velutina* en quinto lugar. Su nombre común es Mezquite Terciopelo, dada la presencia de pubescencia en hojas, ramas jóvenes y vainas que dan una apariencia aterciopelada; está adaptada a ambientes secos y climas desérticos; aunque se considera una especie invasora agresiva y dañina en los lugares fuera de su área de distribución natural, juega un papel vital en la ecología del Desierto de Sonora; es una especie mejoradora de suelo, ya que el follaje, flores y vainas que desprenden son ricos en N₂ y puede utilizarse como abono; muchos animales se alimentan de sus vainas, de hecho, la germinación de las semillas se ve favorecida después de pasar por el sistema digestivo de los animales que las consuman, de lo contrario, tardarían incluso años en germinar; el follaje proporciona sombra y refugio, y es una importante especie nodriza (The Arizona Native Plant Society, sin fecha; Pasiecznik, 2016; Jardín Etnobiológico Comunitario de Sonora, 2021).

En definitiva y para el caso de la ciudad de Hermosillo, Sonora, las mejores alternativas seguirán siendo las especies nativas. Cada vez es mayor la apreciación hacia dichas especies, las actividades de divulgación científica y educación ambiental han incrementado en los últimos años, siendo un esfuerzo que empezó por los académicos e investigadores. Poco a poco la ciudadanía se ha ido sensibilizando, al punto de que, en la actualidad, existen múltiples grupos y organizaciones civiles dedicadas a la conservación de los espacios naturales y públicos de la ciudad, llevando la información a más personas. Las instancias gubernamentales también realizaron un cambio y ahora se promueve arduamente la utilización de especies nativas para la reforestación de la ciudad y los esfuerzos en el reverdecimiento de la ciudad se incrementaron.

La información generada en este trabajo busca motivar e impulsar aún más el uso de especies nativas para la reforestación urbana, generando evidencia contundente de que su adaptación y eficiencia es indiscutible frente a las especies introducidas. Si bien, el reverdecimiento urbano con cualquier tipo de especies proporcionará servicios ambientales, hacerlo con el mayor respeto hacia los ecosistemas naturales hará que las actividades de mitigación y adaptación a la crisis planetaria y climática sea más efectiva.

CONCLUSIONES

1. Las diferencias entre las cantidades de PS capturadas en las hojas de los árboles fueron causadas por la variación de las características propias de las especies, las condiciones ambientales y el impacto de la actividad humana, sin embargo, este estudio sienta las bases para seguir realizando estudios del mismo tipo y así complementar y enriquecer la información generada.
2. Los árboles que en promedio capturaron más PS por individuo fueron el *A. indica*, *P. dulce* y *O. tesota*.
3. Se registró una variación entre la captación de PS por las distintas especies de estudio en los distintos sitios de muestreo, siendo la zona centro (UNISON) y la zona norte (Panteón Yáñez), donde más PS se capturaron en total.
4. La especie con el mejor aprovechamiento de agua para llevar a cabo su actividad fotosintética fue el *O. tesota*.
5. El promedio de A_i por las especies de estudio en las distintas estaciones del año nos muestra que las especies leguminosas (*Neltuma spp.*, *Parkinsonia spp.*, *O. tesota* y *P. dulce*) son más eficientes para capturar CO_2 .
6. Las especies introducidas evaluadas en este estudio están bien adaptadas a las condiciones áridas y cálidas de la ciudad de Hermosillo, sin embargo, el uso de especies nativas en las actividades de reforestación reforzará aún más los servicios ambientales que se buscan obtener, a la vez de contribuir en la conservación de la biodiversidad del Desierto Sonorense.

RECOMENDACIONES

1. Reducir las fuentes de contaminación ambiental dentro de la ciudad de Hermosillo.
2. Realizar reforestaciones estratégicas con especies de bajo requerimiento hídrico.
3. Evaluar la capacidad en la reducción de la contaminación del aire en más especies utilizadas dentro de la ciudad de Hermosillo.
4. Profundizar la investigación para determinar que especies de árboles son las más adecuadas en Hermosillo según sea el sector.
5. Realizar este estudio en un punto específico de la ciudad de Hermosillo en donde haya una fuente de contaminación fija, medir los niveles de contaminación en un área con vegetación (evaluar las especies presentes a una misma distancia de la fuente) y otra donde no, para comparar la calidad del aire y reforzar la evidencia de los servicios ambientales proporcionado por la vegetación.
6. Planificar nuevas y más extensas áreas verdes en Hermosillo, sobre todo en los sectores con los mayores niveles de contaminación, como en el noroeste de la ciudad.
7. Evaluar la capacidad fotosintética de las especies de estudio fuera de la ciudad de Hermosillo para conocer el impacto que el estrés urbano les genera en su fisiología.

LITERATURA CITADA

- Acuña-Acosta, D. M., Castellanos-Villegas, A. E., Llano-Sotelo, J. M., Romo-León, J. R. (2021). Respuestas de los atributos fotosintéticos y estequiométricos a la aridez en las especies y tipos funcionales de dos comunidades del desierto sonorense. *Botanical Sciences*, 99(2), 257-278. <https://doi.org/10.17129/botsci.2708>
- Aguilar, M., León, G., Mejía, F. (2021). Botánica aplicada: Fabaceae. *Revista Iztacala*. Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Iztacala. https://www.researchgate.net/profile/Dafne-Mejia/publication/348788324_Familia_Fabaceae/links/6010744aa6fdcc071b947269/Familia-Fabaceae.pdf
- Amaya, C. A. (2005). El ecosistema urbano: Simbiosis espacial entre lo natural y lo artificial. *Revista Forestal Latinoamericana*. 37, 1-16.
- Arizona-Sonora Desert Museum. (Sin fecha). Biological survey of ironwood forest national monument: Natural history of the desert ironwood tree (*Olneya tesota*). Consultado el 17 de agosto de 2025. https://www.desertmuseum.org/programs/ifnm_ironwoodtree.php
- Arroyave-Maya, M. del P., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., Hoehn, R. E. (2018). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia forestal*, 22(1), 5–16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>
- Ávila-Lovera, E., Haro, R., Choudhary, M., Acosta-Rangel, A., Pratt, B. R. Santiago, L. S. (2024). The benefits of woody plant stem photosynthesis extend to hydraulic function and drought survival in *Parkinsonia florida*. *Tree Physiology*, 44(3), tpae013. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpae013>
- Baca-Santini, C. E., Vázquez-Gálvez, F. A. (2015). Estudio comparativo de la influencia de las zonas arboladas urbanas en la calidad del aire de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 9(3), 171-179. México. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/589>

- Barrios, J. C. (2012). Ecosistemas Urbanos en Secretaría General Técnica Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Ed). Evaluación de los ecosistemas del milenio en España. *Ambienta*. 98, 144-153.
- Bernal-Grijalva, M. M., Navarro-Navarro, L.A., Moreno-Vázquez, J. L. (2019). Adopción de especies nativas en la gestión de espacios verdes públicos sostenibles: El caso de Hermosillo. *Frontera norte*, 31, e2049. Epub. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2049>
- Borderías-Uribeondo, M. P., Martín-Roda, E. M. (2012). Medio ambiente urbano. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. <https://elibro.net/es/ereader/ues/48543?page=96>
- Chávez-García, E., González-Méndez, B. (2021). Particulate matter and foliar retention: current knowledge and implications for urban greening. *Air Qual Atmos Health* 14, 1433–1454. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01032-8>
- Chianucci, F. (2019). An overview of in situ digital canopy photography in forestry. *Canadian Journal of Forest Research*. 50(3), 227-242. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0055>
- Chianucci, F., Ferrara, C., Puletti, N. (2022). coveR: An R package for processing Digital Cover Photography images to retrieve forest canopy attributes. *bioRxiv* 2022.01.13.475850. <https://doi.org/10.1101/2022.01.13.475850>
- Ciudades Verdes. (Sin fecha). *Neltuma chilensis* (Molina) C.E.Hughes & G.P.Lewis. Árboles para ciudades. Consultado el 3 de septiembre de 2025. <https://ciudadesverdes.com/arboles/neltuma-chilensis/>
- Dátiles, M., Acevedo-Rodriguez, P. (2022). *Pithecellobium dulce* (Manila tamarind). *CABI Compendium*, 41187. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.4118>
- Díaz-Caravantes, R. E., Castro-Luque, A. L., Aranda-Gallegos, P. (2014). Mortalidad por calor natural excesivo en el noroeste de México: Condicionantes sociales asociados a esta causa de muerte. *Frontera norte*, 26(52), 155-177. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73722014000200007&lng=es&tln=es

- Dimmitt, M. A. (2021). Fabaceae (legume family). Arizona-Sonora Desert Museum. Consultado el 26 de agosto de 2025. https://www.desertmuseum.org/books/nhsd_fabaceae.php
- Duarte-Tagles, H. (2020). Diagnóstico de salud ambiental del centro de la población de Hermosillo, Sonora: Agua, aire, residuos y su efecto en la salud en el Hermosillo del siglo XXI (2000-2017). Universidad de Sonora. <https://doi.org/10.47807/UNISON.20>
- Duran-Rivera, B., Alzate-Guarin, F. (2009). Intercepción de partículas suspendidas totales (PST) por cinco especies de árboles urbanos en el Valle de Aburrá. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (47), 59-66. Universidad de Antioquia Medellín, Colombia. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43004706>
- Escolástico-León, C. (2015). Medio ambiente y espacios verdes. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. <https://elibro.net/es/ereader/ues/48818?page=18>
- Hewitt, C.N., Ashworth, K., MacKenzie, A.R. (2020). Using green infrastructure to improve urban air quality (GI4AQ). *Ambio* 49, 62–7. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01164-3>
- Figueroa-Montes, G. J. (2018). Cambio climático en la región de la Costa de Hermosillo, Sonora, México: y su efecto en el acuífero: análisis de su impacto utilizando el cultivo de la vid (*Vitis vinifera*). Tesis de maestría. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/776>
- Gay-García, Ca., Ortiz-Espejel, B., Muñoz, N., Le-Bail, M. (2015). Reporte Mexicano de Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. Grupo II. INFONAVIT, SEDATU, ONU-Hábitat. (2016). Índice básico de las ciudades prósperas / City Prosperity Index (CPI). Hermosillo, Sonora, México. Informe Final Municipal (107 pp).
- García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Guillén-Mena, V., Orellana, D. (2016). La influencia de la vegetación arbórea urbana para disminuir el nivel de polución y alcanzar el confort climático. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, Ed. especial, 67-75.
- Gutiérrez-Ruacho, O. G., Brito-Castillo, L., Ortega-Rosas, C. I., Villarruel-Sahagún, L., Macías-Duarte, A., Jiménez-Lagunes, A., Casanovas-García, L. C. (2018). Análisis de la variabilidad de las temperaturas y lluvias en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México para la evaluación del riesgo ambiental local y regional en Audefroy, F. y Padilla-Lozoya, R. Desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos. 1, 91-117. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/1749>
- IME. (2017). Informe de resultados. Programa de evaluación y mejoramiento de la calidad del aire (PEMCA) de Hermosillo, Sonora. H. Ayuntamiento de Hermosillo.
- IMPLAN. (2017). Programa de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo (360 pp.). Instituto Municipal de Planeación Urbana, H. Ayuntamiento de Hermosillo. Gobierno del Estado de Sonora. Secretaría de Desarrollo Urbano y Territorial. Boletín Oficial del Estado CXCVIII, No. 22.
- IMPLAN. (2018). Programa Municipal de ordenamiento territorial de Hermosillo. http://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2018/05/PMOT_2018.pd
- IMPLAN. (2020). Paleta Vegetal Hermosillo. H. Ayuntamiento de Hermosillo. <https://www.implanhermosillo.gob.mx/paleta-vegetal-hmo/>
- INECC, SEMARNAT, EPA. (2004). Adaptación al cambio climático: Hermosillo, Sonora, un caso de estudio. *Stratus Consulting, Inc.*, Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de Sonora.
- INECC, SEMARNAT. (2018). Sexta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2017. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/SON_ANUARIO_PDF.pdf
- Jardín Etnobiológico Comunitario de Sonora. (2021). *Prosopis velutina* (Wooton) o mezquite. Renaturasonora.

<https://redescubramossonora.mx/renaturasonora/plantas-renatura/prosopis-velutina-wooton-o-mezquite/>

Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación 6 de junio de 2012. Última reforma DOF 01-04-2024.

Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación 28 de enero de 1988. Última reforma DOF 01-04-2024.

Lindén, J., Gustafsson, M., Uddling, J., Håkan Pleijel, Å. W. (2023). Air pollution removal through deposition on urban vegetation: The importance of vegetation characteristics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 81, 127843. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127843>

López-González, F. M., Navarro-Navarro, L. A., Díaz-Caravantes, R. E., Navarro-Estupiñán, J. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera Norte*, 33. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2088>

López-Romero, C, Huerta-Romero, J, Frías-Mendivil M. (2017). Sensibilización a alérgenos en pacientes pediátricos mayores de 2 años en el Hospital Infantil del Estado de Sonora. *Bol Clin Hosp Infant Edo Son*. 34(2), 90–96.

López-Ivich, K. (2025). Generación de Agua para Hermosillo: El Papel Clave de la Rehabilitación de Ecosistemas. Hermosillo ¿Cómo Vamos? Consultado el 21 de agosto de 2025. <https://hermosillocomovamos.org/2025/04/14/generacion-de-agua-para-hermosillo-el-papel-clave-de-la-rehabilitacion-de-ecosistemas/>

Marincic-Lovriha, I. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (12), 9–25. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.196>

Martínez-Yrizar, A., Felger, R. S., Búrquez, A. (2009). Los ecosistemas terrestres de Sonora: Un diverso capital natural en Molina-Freaner R. S. y Van-Devender, T. R. (Editores), *Diversidad biológica de Sonora*, 129 – 156. UNAM.

Maass, M. Díaz-Delgado, R., Balvanera, P., Castillo, A., Martínez-Yrizar, A. (2010). Redes de investigación ecológica y socio-ecológica a largo plazo (LTER y LTSE) en Iberoamérica: Los casos de México y España. *Revista chilena de historia natural*, 83(1), 171-184. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2010000100010>

- McCoy, K. M. (2021). El guardián del desierto. The Arizona Native Plant Society. Consultado el 14 de agosto de 2025. <https://aznps.com/2021/05/31/palo-fierro/>
- Mejía-Mojica, H., Luna-Figueroa, J. (2021). Especies no nativas, el riesgo ambiental y la alternativa económica. *Inventio*, 10(22), 25–31. <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/295>
- Mercado-Maldonado, L., Marincic-Lovriha, I. (2017). Morfología de isla de calor urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable. *Biotechnia*, 19(0), 27-33. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v19i0.407>
- Meza-Figueroa, D., González-Grijalva, B., Del Río-Salas, R., Coimbra, R., Ochoa-Landín, L., Moreno-Rodríguez, V. (2016). Traffic signatures in suspended dust at pedestrian levels in semiarid zones: Implications for human exposures. *Atmospheric Environment*, 138, 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.005>
- Meza-Figueroa, D. M., Schiavo, B., Berrellez-Reyes, F., Mazón-García, A. I. (2024). INFORME ETAPA 4. Estación de la Red Universitaria de Observatorios Ambientales (RUOA). Enero – Octubre del 2024. Proyecto 317557. Ciudades resilientes al cambio climático: colaboración interdisciplinaria para la recuperación y restauración del ecosistema del desierto. CONAHCYT.
- Monroy, R., Colín, H. (2004). El guamúchil *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, un ejemplo de uso múltiple. *Madera y Bosques*, 10(1), 35-53. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710103>
- n+. (2023). Hermosillo, la ciudad más caliente del mundo con 50 grados centígrados. *Tritón Comunicaciones*. Consultado el 22 de agosto de 2025. <https://www.nmas.com.mx/estados/clima-hermosillo-sonora-alcanza-50-grados-de-temperatura-por-ola-de-calor-2023/>
- National Parks Board. (Sin fecha). *Terminalia buceras* (L.) C. Wright. Flora and Fauna Web. Consultado el 3 de septiembre de 2025. <https://www.nparks.gov.sg/florafaunaweb/flora/2/7/2761>
- Navarro-Estupiñán, J., Robles-Morua, A., Díaz-Caravantes, R., Vivoni, E. R. (2020). Heat risk mapping through spatial analysis of remotely-sensed data and socioeconomic

- vulnerability in Hermosillo, México. *Urban Climate*, 31, 100576.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100576>
- Nina-Quispe, A. (2022). Reserva de carbono y retención de material particulado en árboles del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/5425>
- OMM. (2021). Boletín de la OMM sobre la calidad del aire y el clima. N° 1 – septiembre de 2021. Ginebra, Suiza. <https://library.wmo.int/idurl/4/58167>
- OMS. (Sin fecha). Contaminación atmosférica. Consultado el 13 de febrero de 2024.
https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- OMS. (2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Consultado el 25 de febrero de 2024. <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- OMS. (2021). Cambio climático. Consultado el 26 de febrero de 2024.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- OMS. (2022a). Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS. Consultado el 25 de febrero de 2024.
<https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
- OMS. (2022b). Contaminación del aire ambiente (exterior). Consultado el 25 de febrero de 2024. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- ONU. (Sin fecha). ¿Qué es el cambio climático? Consultado el 13 de febrero de 2024.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- ONU. (2022). La Tierra se enfrenta a una triple crisis planetaria. Consultado el 10 de marzo de 2024. <https://unric.org/es/la-tierra-se-enfrenta-a-una-triple-crisis-planetaria/>
- ONU Cambio climático. (2022). La calidad del aire disminuye a medida que se acelera el cambio climático. Comunicado de prensa externo. <https://unfccc.int/es/news/la-calidad-del-aire-disminuye-a-medida-que-se-acelera-el-cambio-climatico>

- ONU Hábitat. (2020). La nueva agenda urbana ilustrada. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- ONU Hábitat. (2022). Reporte Mundial de las Ciudades 2022: Visualizando el futuro de las ciudades. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- OPS. (Sin fecha). Cambio climático y salud. Organización Mundial de la Salud. Consultado el 19 de marzo de 2024. <https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud>
- Ortega-Gaucin, D., Cruz-Bartolón, J. D. L., Castellano-Bahena, H. (2018). Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2192>
- Ortega-Rosas, C. I., Calderón-Ezquerro M.C., Gutiérrez-Ruacho O. G. (2019). Fungal spores and pollen are correlated with meteorological variables: effects in human health at Hermosillo, Sonora, Mexico, *International Journal of Environmental Health Research*, <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1625031>
- Ortega-Rosas, C. I., Enciso-Miranda, C., Macías-Duarte, A., Morales-Romero, D., Villarruel-Sahagun, L. (2020). Urban vegetation cover correlates with environmental variables in a desert city: insights of mitigation measures to climate change. *Urban Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00982-8>
- Ortega-Rosas, C. I., Meza-Figueroa, D., Vidal-Solano, J. R., González-Grijalva, B., Schiavo, B. (2021). Association of airborne particulate matter with pollen, fungal spores, and allergic symptoms in an arid urbanized area. *Environmental Geochemistry and Health*. 43: 1761–1782. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00752-7>
- Ortega-Rosas, C. I., Martínez-Salido, J., Sánchez-Duarte, N. E., Morales-Romero, D. (2022). Cobertura y composición arbórea en las áreas verdes de Hermosillo, Sonora: Aportaciones al urbanismo sustentable. *Región y sociedad*, 34, e1610. <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1610>
- Parrotta, John A.; Chaturvedi, A.N. (1994). *Azadirachta indica* A. Juss. Neem, margosa. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. New Orleans, LA. U.S.

- Pasiecznik, N. (2016). *Prosopis velutina* (velvet mesquite). CABI Compendium, 44457. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.44457>
- PIR. (2019). Panorama de los recursos globales 2019: Recursos naturales para el futuro que queremos. Panel Internacional de Recursos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nairobi, Kenia.
- PIR. (2024). Global resources outlook 2024 summary for policymakers: Bend the trend – pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel. United Nations Environment Programme. Nairobi.
- PNUMA. (2019). Manifiesto de las soluciones basadas en la naturaleza para el clima. Cumbre por la Acción Climática. https://www.unep.org/nature-based-solutions-climate?_ga=2.107671554.1671870026.1710088043-897442305.1709871043
- PNUMA. (2021). Hacer las paces con la naturaleza: Plan científico para hacer frente a las emergencias del clima, la biodiversidad y la contaminación. Nairobi.
- PNUMA. (2023). Soluciones Basadas en la Naturaleza para ciudades resilientes al cambio climático – Perspectivas y experiencias de América Latina. Panamá.
- Reynolds, C., Escobedo, F., Clerici, N., Zea-Camaño, J. (2017). Does “greening” of neotropical cities considerably mitigate carbon dioxide emissions? The case of Medellin, Colombia. *Sustainability*. 9(5) 785. <https://doi.org/10.3390/su9050785>
- Rodríguez-Becerra, L. (En proceso). Retención de partículas suspendidas totales y captura de CO₂ por especies arbóreas comunes de Hermosillo, Sonora. Tesis de Licenciatura en Ecología. Universidad Estatal de Sonora.
- Rojas-Bracho, L., Garibay-Bravo, V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*, (69), 29-44.
- Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, M. L., Castrejón-Godínez, M. L. (2014). Contaminación urbana del aire: Aspectos fisicoquímicos, microbiológicos y sociales. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. 189 p. ISBN 978-607-8332-59-5. México.
https://www.uaem.mx/dgds/files/libros/2014_LIBRO_CONTAMINACIÓN%20

URBANA%20DEL%20AIRE.%20ASPECTOS%20FISICOQUÍMICOS%2C%20MICROBIOLÓGICOS%20Y%20SOCIALES.pdf

SEDATU, CONAPO, INEGI. (2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. Primera edición: febrero 2018. México. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bv_inegi/productos/nueva_estruc/702825006792.pdf

Schuch, U. K., Kelly, J. J. (2008). Palo verde trees for the urban landscape. Bulletin of The Desert Legume Program of The Boyce Thompson Southwestern Arboretum and The University of Arizona. *Aridus*, 20(1). <https://cales.arizona.edu/desertlegumeprogram/sites/cals.arizona.edu.desertlegumeprogram/files/aridus20-1.pdf>

The Arizona Native Plant Society. (Sin fecha). The Plant List: Blue Palo Verde. Consultado el 17 de agosto de 2025. <https://aznps.com/the-plant-list/?species=parkinsonia+florida>

The Arizona Native Plant Society. (Sin fecha). The Plant List: Mesquite, Velvet Mesquite. Consultado el 19 de agosto de 2025. <https://aznps.com/the-plant-list/?species=prosopis+velutina>

The University of Arizona. (Sin fecha). *Parkinsonia precox*. Campus Arboretum. Consultado el 17 de agosto de 2025. <https://apps.cals.arizona.edu/arboretum/taxon.aspx?id=6>

UICN. (2020). Estándar global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza: Un marco sencillo para la verificación, el diseño y la extensión de SbN. Primera edición. Gland, Suiza. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.es>

UNESCO. (2020). Agua y cambio climático: Datos y cifras. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. ONU-Agua.

UNFCCC. (2007). Unidos por el clima. Guía de la Convención sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto. https://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate_spa.pdf

- Van-Devender, T. R., Reina-Guerrero, A. L. (2021). The vegetation of Sonora, Mexico. *Phytoneuron*. 67, 1–22. <http://wildsonora.com/research-paper/vegetation-sonora-mexico>
- Velasco, I., Ochoa, L., Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300002&lng=es&tlng=es

ANEXOS

Anexo 1. Fichas técnicas de las especies de estudio.

Neltuma velutina (Wooton) Britton & Rose (Mezquite terciopelo)

Sinonimias: *Prosopis velutina*; *Prosopis juliflora* var. *velutina*; *Prosopis chilensis* var. *velutina*



Familia:	Fabaceae o Leguminosae	Estado de conservación:	Preocupación menor (LC)
Distribución:	Sur de EE.UU. y Norte de México		
Hábitat:	Desierto de Sonora; Mezquitales; Matorrales; Común a lo largo de cauces, en tierras bajas, laderas		
Morfología:	Arbusto o Árbol de 9-17 m de altura, copa de 7-13 m; ramas pubescentes con espinas de 1-4 cm de largo <i>Tronco</i> : rugoso de 0.60 m de ancho <i>Hojas</i> : pubescentes bipinnadas con 9-30 pares de folíolos de 4-13 mm de largo; color verde opaco <i>Flores</i> : inflorescencia en forma de espiga de 5-12 cm de largo, color amarillo pálido verdoso <i>Frutos</i> : vainas pubescentes de 7-20 cm de largo <i>Raíz</i> : Pivotal o profunda		
Fenología:	<i>Tiempo de vida</i> : hasta 100 años; crecimiento medio <i>Follaje</i> : caducifolio <i>Floración</i> : abril-junio		
Ecología:	La sombra de sus ramas ofrece protección para mamíferos pequeños, especialmente los animales de madriguera; sus polinizadores son principalmente las abejas; altamente resistente a sequías; mejora el suelo por su capacidad de fijar nitrógeno; especie invasiva en donde ha sido introducida		
Usos:	La madera es dura, atractiva y muy demandada para muebles de calidad; la goma que exuda el tallo se utiliza para la fabricación de caramelo; se hace harina con las vainas (péchita); es un excelente combustible (carbón vegetal); alimento para ganado y fauna silvestre		

***Parkinsonia florida* (Benth. ex A.Gray) S.Watson (Palo verde azul)**

Sinonimias: *Cercidium floridum*, *Cercidium torreyanum*, *Parkinsonia torreyana*, *Cercidium microphyllum*



Familia:	Fabaceae o Leguminosae	Estado de conservación:	Preocupación menor (LC)
Distribución:	Suroeste de EE. UU, Noroeste de México		
Hábitat:	Desierto de Sonora; Matorral xerófilo; Bosque espinoso; Asociaciones ribereñas desérticas		
Morfología:	Árbol o arbusto de 8-12 m de altura, copa de 6-10 m; ramas con espinas rectas <i>Tronco:</i> de 0.40 m de ancho, liso, color verde azulada <i>Hojas:</i> bipinnadas con 2-4 pares de folíolos de 4-8 mm de largo; color verde azulado <i>Flores:</i> racimos de 1-17 mm de largo, color amarillo brillante <i>Frutos:</i> vainas de 4-10 cm de largo <i>Raíz:</i> Pivotal o profunda		
Fenología:	<i>Tiempo de vida:</i> hasta 100 años; crecimiento rápido <i>Follaje:</i> caducifolio <i>Floración:</i> marzo-abril		
Ecología:	En condiciones naturales sirve de planta nodriza de cactáceas; sus polinizadores son principalmente las abejas; es refugio para aves; se establece en planicies arenosas, arroyos secos, ocasionalmente sobre laderas secas y colinas poco arboladas; extremadamente resistente al calor; requiere moderadas cantidades de agua; no presenta asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno		
Usos:	Vainas y semillas se utilizan para cocinar alimentos; de uso ornamental y forrajero		

***Olneya tesota* A. Gray** (Palo fierro)

Sinonimias: ninguna



Familia:	Fabaceae o Leguminosae	Estado de conservación:	Sujeta a protección especial (Pr)
Distribución:	Sur de EE.UU. y Norte de México		
Hábitat:	Desierto de Sonora; Matorral xerófilo y crasicaule; Riberas de ríos, arroyos y laderas		
Morfología:	Árbol de 5-8 m de altura, copa de 7.50 m; ramas con espinas de 5-10 m de largo <i>Tronco:</i> rugoso de 0.60 m de ancho <i>Hojas:</i> coriáceas, pinnadas de 3-10 cm de largo con 4-12 pares de folíolos de 5-10 mm de largo; color verde grisáceo <i>Flores:</i> racimos de 2-6 cm de largo, color lila o rosa, con blanco y matices amarillos <i>Frutos:</i> vainas de 8-9 mm de grosor y 3-6 cm de largo		
Fenología:	<i>Tiempo de vida:</i> hasta 800 años; crecimiento lento <i>Follaje:</i> perenne <i>Floración:</i> marzo a junio		
Ecología:	En condiciones naturales sirve de planta nodriza para una gran variedad de especies; sus polinizadores son principalmente las abejas; animales endémicos como el berrendo sonorense (<i>Antilocapra americana</i>), el borrego cimarrón (<i>Ovis canadensis</i>) y la codorniz mascarita (<i>Colinus virginianus</i>) dependen de su sombra; altamente resistente a sequías; mejora el suelo		
Usos:	Importancia etnobotánica para la comunidad Comcaac; su madera se utiliza para hacer artesanías y combustible; vainas sirven de alimento en comunidades indígenas; ocasionalmente se utiliza como planta de ornato		

Azadirachta indica A. Juss. (Neem)

Sinonimias: *Antelaea azadirachta*, *Melia azadirachta*



Familia:	Maliaceae	Estado de conservación:	Introducida
Distribución:	Sur de Asia		
Hábitat:	Bosque tropical caducifolio; Bosque tropical subcaducifolio; Zonas áridas		
Morfología:	Árbol de 15-20 m de altura; copa de 7-14 m <i>Tronco:</i> rugoso de 250 cm de ancho, color marrón oscuro a gris <i>Hojas:</i> pinadas de 20-40 cm de largo; color verde oscuro <i>Flores:</i> racimo de 5-15 cm de largo color blanco <i>Frutos:</i> drupa de 10-15 mm de ancho y 14-28 mm de largo. <i>Raíz:</i> Pivotante o profunda, sistema radical lateral extenso.		
Fenología:	<i>Tiempo de vida:</i> 100-200 años; crecimiento rápido <i>Follaje:</i> perenne, solo pierde sus hojas en condiciones muy extremas <i>Floración:</i> abril-mayo <i>Fructificación:</i> mayo-agosto		
Ecología:	Estos árboles compiten agresivamente por la humedad disponible en el suelo; las raíces finas se ven a menudo asociadas con hongos micorrizos; notable resistencia a la sequía		
Usos:	En México esta especie es cultivada. Se utiliza para la reforestación y como cerca viva; útil para mejorar la fertilidad del suelo en los sitios secos degradados, debido a la calidad de su hojarasca y a la tasa de descomposición foliar relativamente rápida; ornato; medicinal; insecticida; plaguicida		

Terminalia buceras (L.) C.Wright (Olivo negro)

Sinonimias: *Bucida buceras*; *Bucida wigginsiana*



Familia:	Combretaceae	Estado de conservación:	Preocupación menor (LC)
Distribución:	Sur y Centro América; Sur de México		
Hábitat:	Bosque tropical caducifolio; Bosque tropical subperennifolio; Bosque espinoso		
Morfología:	Árbol de hasta 35 m de altura; copa de 14 m; ramas a veces mezcladas con espinas de 6 a 4 cm de largo <i>Tronco</i> : escamoso de 20 a 40 cm de ancho, color gris amarillento a pardo amarillento <i>Hojas</i> : simples, 4.5-9.0 cm de largo, 2.5-4.5 cm de ancho; color verde oscuro <i>Flores</i> : inflorescencias, 5-10 cm de largo, color blanco-crema-verde. <i>Frutos</i> : drupa, color pardo-verdoso <i>Raíz</i> : extendidas, superficiales		
Fenología:	<i>Tiempo de vida</i> : más de 60 años; crecimiento medio-lento <i>Follaje</i> : perenne <i>Floración</i> : marzo-junio <i>Fructificación</i> : julio-septiembre		
Ecología:	Atrae abejas; tolerante a la sequía; pueden presentar clorosis en suelos con pH alto; resistente a las plagas y fuertes vientos		
Usos:	Ornamental; maderable		

***Neltuma chilensis* (Molina) C.E.Hughes & G.P.Lewis** (Mezquite chileno)

Sinonimias: *Prosopis chilensis*; *Ceratonia chilensis*



Familia:	Fabaceae o Leguminosae	Estado de conservación:	Introducida
Distribución:	Sudamérica		
Hábitat:	Zonas áridas		
Morfología:	<p>Árbol de 3-12 m de altura, copa de 12-15 m; ramas con espinas de hasta 6 cm de largo <i>Tronco:</i> hasta 1 m de ancho, color café pálido-rojizo <i>Hojas:</i> bipinnadas compuestas, hasta 20 cm de largo; color verde amarillento <i>Flores:</i> inflorescencia en forma de espiga, 5 a 10 cm de largo y 1 cm de ancho, color amarillo <i>Frutos:</i> vainas de 1.3-1.5 cm de grosor y 9-18 cm de largo, color amarillo claro <i>Raíz:</i> Pivotante o profunda, también extendidas</p>		
Fenología:	<p><i>Tiempo de vida:</i> 100-200 años, crecimiento rápido <i>Follaje:</i> caducifolio <i>Floración:</i> octubre-diciembre <i>Fructificación:</i> febrero-abril</p>		
Ecología:	Atrae abejas; es muy resistente a la sequía; mejora el suelo por su capacidad de fijar nitrógeno		
Usos:	Forrajero; maderable; frutos comestibles; medicinal		

Anexo 2. Valores de absorción de CO₂, transpiración y uso eficiente del agua por porcentaje de humedad en el sustrato de las macetas de las especies de estudio.

Ai (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹)

% H	<i>N. velutina</i>	<i>P. florida</i>	<i>O. tesota</i>	<i>A. indica</i>	<i>T. buceras</i>	<i>N. chilensis</i>	<i>P. preacox</i>	<i>P. dulce</i>	<i>F. benjamina</i>
23.2	15.6600	7.5967	4.6567	10.5433	7.9733	17.1733	6.9933	8.8167	6.2567
19.6	13.4567	8.8767	3.8867	7.0667	6.2400	13.4300	6.6333	8.0767	7.3900
15.7	14.3167	8.0300	2.4000	4.5100	4.6533	24.4967	4.1900	6.2233	6.1467
12.1	14.2733	8.2200	2.2033	3.5867	3.6367	17.4900	6.8233	2.3200	5.2167
10.6	9.7667	4.7433	1.9567	2.9900	1.7367	8.5400	3.5667	1.5167	3.9933
9.0	5.2767	3.0033	1.4733	0.7067	0.5333	3.2367	2.8800	0.1667	1.5667
17.6	14.6833	8.0367	3.6600	6.4067	5.4833	13.3333	4.9167	5.7533	4.6233

E (mmol H₂O m⁻² s⁻¹)

% H	<i>N. velutina</i>	<i>P. florida</i>	<i>O. tesota</i>	<i>A. indica</i>	<i>T. buceras</i>	<i>N. chilensis</i>	<i>P. preacox</i>	<i>P. dulce</i>	<i>F. benjamina</i>
23.2	7.6367	4.5167	2.1933	4.6200	2.6667	7.4400	3.5067	2.7667	2.3900
19.6	5.4067	4.9033	1.6200	2.5367	2.2167	4.9100	3.3400	2.6600	3.1233
15.7	5.5800	5.0600	1.5900	1.4100	1.5000	4.1967	2.8500	2.3867	2.3133
12.1	3.7633	2.8500	1.1400	0.9033	0.8400	4.5733	2.3867	0.6333	1.3167
10.6	2.0867	1.2667	0.7167	0.5900	0.4133	1.7967	1.1933	0.3533	0.8967
9.0	1.3300	1.5567	0.7133	0.3300	0.3433	1.2133	1.1400	0.1933	0.7500
17.6	4.9800	3.9500	1.4600	2.0900	1.7000	4.1533	2.0200	2.0933	1.6900

EUA (g CO₂ (kg de H₂O)⁻¹)

% H	<i>N. velutina</i>	<i>P. florida</i>	<i>O. tesota</i>	<i>A. indica</i>	<i>T. buceras</i>	<i>N. chilensis</i>	<i>P. preacox</i>	<i>P. dulce</i>	<i>F. benjamina</i>
23.2	5.0800	4.3167	5.0467	5.5333	7.3300	5.7100	5.1933	7.7733	6.5300
19.6	6.0600	4.3067	5.9100	6.8233	6.9800	6.6867	4.3067	7.6633	6.1300
15.7	6.2833	3.8667	3.0133	7.7833	7.6367	13.8667	2.6033	6.4200	6.7133
12.1	9.4733	6.6300	3.4767	9.5900	10.4300	9.8533	6.2067	9.1600	9.3333
10.6	11.5567	9.7167	5.1833	12.3900	8.3967	11.6600	7.4067	10.516 7	10.8933
9.0	9.6267	-0.9800	-0.1267	-7.5833	3.3500	2.0633	6.6733	- 0.1000	5.7533
17.6	7.3700	4.8400	5.4267	7.5433	7.9933	8.1667	5.7600	7.0967	6.9467

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo y el software SAS.