



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**CARRERA BIOLÓGÍA**

Establecer el Índice de Rendimiento Anticipado (API) y el Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) en *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus benjamina*, *Fraxinus uhdei*, *Jacaranda mimosifolia*, *Quercus rugosa* *Taxodium mucronatum* de tres Bosques urbanos de la Ciudad de México

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGO**

PRESENTA:

**FERNANDO HAZAEL PALACIOS CARRANZA**

**JURADO DE EXAMEN**

**DIRECTOR: M. EN C. GERMAN CALVA VASQUEZ**

**ASESOR: DRA PATRICIA RIVERA GARCIA**

**ASESOR: M. EN C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL**

**SINODAL: M. EN C. MARICELA ARTEAGA MEJÍA**

**SINODAL: DRA. EN C. ALBERTA LOURDES CASTILLO GRANADA**



**CIUDAD DE MEXICO, 16 ENERO 2024.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por haberme brindado la oportunidad de formarme como Biólogo durante estos años.

Al Laboratorio de Contaminación Atmosférica, mi segundo hogar, agradezco por proporcionarme todas las herramientas esenciales para mi formación.

A mi director de tesis, el M. en C. Germán Calva Vásquez, le estoy enormemente agradecido por brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación. Su dedicación, paciencia, consejos y empatía han sido invaluable. Pero, sobre todo, agradezco su valiosa amistad y su continua confianza en mí. Siempre estaré agradecido.

A mis sinodales, la Dra. Patricia Rivera García, la Dra. Alberta Lourdes Castillo Granada, el M. en C. Armando Cervantes Sandoval y la M. en C. Maricela Arteaga Mejía, les agradezco por sus valiosas contribuciones, consejos y apoyo profesional en la realización de este trabajo.

Agradezco también a los alumnos del Laboratorio de Contaminación Atmosférica, especialmente a Angélica, Andrea, Dafne, Lorena y Sandra, por el apoyo brindado tanto en el campo como en el laboratorio durante la ejecución de este proyecto. Su colaboración ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.

Cada uno de ustedes ha dejado una marca indeleble en mi experiencia académica y profesional, y estoy profundamente agradecido por ello.

.

## AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en este logro. Pido disculpas de antemano si dejo a alguien sin mencionar, ya que son muchos los que han contribuido a mi éxito.

Comienzo agradeciendo a mis abuelas, quienes me brindaron el regalo más valioso para un nieto: su amor incondicional y tiempo inquebrantable. Agradezco a mi madre por sus sacrificios y esfuerzos, que hicieron posible que pudiera perseguir mis sueños. A mi padre, le agradezco por sus consejos y por inculcarme los valores que me han moldeado en la persona que soy hoy. Gracias, papá, por permitirme elegir, equivocarme y aprender.

A mis queridos hermanos, quienes siempre gastaban sus ahorros en regalarme un libro o un cuaderno. A Joel, cuyo constante apoyo y presión han sido fundamentales para que hoy este dónde estoy. A Melisa, quien siempre me animó y estuvo a mi lado. A mis cuñados, Denis y Rodrigo, por regalarme dos tesoros invaluable en forma de niños.

A mi equipo de laboratorio "Good Soup", los elegiría una y otra vez por encima de cualquier otro. Ha sido un honor y un privilegio formar parte de ustedes. Gracias por hacerme sentir la persona más feliz del mundo.

A Sandra, quien siempre creyó en mí y me hizo valorarme en los momentos más difíciles. A Lorena y Dafne, gracias por compartir momentos increíbles, pláticas y risas. A Angélica y Andrea, quienes se han convertido en unas de mis mejores amigas.

A Yami y Karina, un claro ejemplo de que las personas adecuadas llegan en los momentos menos esperados. A Daniela y Fernando, amigos desde el inicio de la carrera, gracias por los momentos inolvidables en la FES

Siempre he tenido la certeza de que, sin importar mis acciones, nunca podré corresponderles en la misma medida. Hoy, lo reafirmo, sea cual sea mi contribución, queda pequeña por el inmenso cariño que todos ustedes me han brindado. Estoy profundamente agradecido por todo el amor y apoyo que he recibido de cada uno de ustedes

*Los quiero mucho*

## ÍNDICE GENERAL

<u>Siglas</u> .....	vii
<u>elementos y formulas</u> .....	vii
<u>Resumen</u> .....	viii
<u>I. Introducción</u> .....	9
<u>II. Antecedentes</u> .....	11
<u>III. Marco teórico</u> .....	12
<u>Los árboles y la contaminación atmosférica</u> .....	12
<u>El índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI)</u> .....	16
<u>Parámetros de APTI y la Contaminación atmosférica</u> .....	17
<u>Ácido Ascórbico (AA)</u> .....	17
<u>Contenido total de clorofila</u> .....	19
<u>pH de la hoja</u> .....	19
<u>Contenido Relativo de Agua (CRA)</u> .....	20
<u>La fórmula APTI y clasificación arbórea</u> .....	21
<u>El API y la integración del APTI</u> .....	23
<u>Los rasgos biológicos de los árboles en entornos urbanos</u> .....	24
<u>Carácter Biológico: Habito, estructura del dosel y tipo de hoja</u> .....	25
<u>Estructura Laminar: Tamaño, Textura y robustez</u> .....	27
<u>La vegetación arbórea de la CDMX</u> .....	27
<u>Casuarina equisetifolia</u> .....	28
<u>Cupressus lusitanica</u> .....	28
<u>Eucalyptus camaldulensis</u> .....	28
<u>Ficus benjamina</u> .....	29
<u>Fraxinus uhdei</u> .....	29
<u>Jacaranda mimosifolia</u> .....	29
<u>Quercus rugosa</u> .....	32
<u>Taxodium mucronatum</u> .....	32
<u>IV. Planteamiento del problema</u> .....	34
<u>V. Objetivo general</u> .....	35
<u>Objetivos particulares</u> .....	35
<u>VI. Material y método</u> .....	36
<u>Zona de estudio</u> .....	36
<u>Colecta y análisis del laboratorio</u> .....	38

<u>Contenido Relativo de Agua</u> .....	38
<u>pH de la hoja</u> .....	38
<u>Contenido total de clorofila</u> .....	39
<u>Ácido Ascórbico</u> .....	40
<u>Fórmula para el cálculo APTI</u> .....	40
<u>Registro del Índice de rendimiento anticipado</u> .....	41
<u>VII. Resultados y discusión</u> .....	42
<u>Contenido Relativo de agua</u> .....	42
<u>pH de la hoja</u> .....	45
<u>.Contenido Total de Clorofila</u> .....	48
<u>Ácido Ascórbico</u> .....	51
<u>Índice de Tolerancia a la Contaminación de Aire</u> .....	55
<u>Clasificación de Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire</u> .....	60
<u>Índice de Rendimiento Anticipado</u> .....	62
<u>VIII. Conclusiones</u> .....	72
<u>Referencia</u> .....	74

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Daño provocado por el SO <sub>2</sub> .....	14
Figura 2 Daño provocado por el fluoruro de hidrógeno.....	14
Figura 3 Daño provocado por el peroxiacetilo .....	15
Figura 4 La evolución del metabolismo de las especies reactivas del oxígeno.....	18
Figura 5 Ejemplo de diferentes usos del arbolado en la CDMX.....	26
Figura 6 <i>Casuarina equisetifolia</i> .....	30
Figura 7 <i>Cupressus lusitanica</i> .....	30
Figura 8 <i>Eucalyptus camaldulensis</i> .....	30
Figura 9 <i>Ficus benjamina</i> .....	30
Figura 10 <i>Fraxinus uhdei</i> .....	31
Figura 11 <i>Jacaranda mimosifolia</i> .....	31
Figura 12 <i>Quercus rugosa</i> .....	33
Figura 13 <i>Taxodium mucronatum</i> .....	33
Figura 14 Ubicación de los bosques urbano en relación con la Ciudad de México.....	36
Figura 15 Promedios estacionales del CRA en ocho especies arbóreas.....	44
Figura 16 Promedios estacionales de pH en ocho especies arbóreas.....	47
Figura 17 Promedios estacionales de contenido total de clorofila en ocho especies arbóreas.....	50
Figura 18 Promedios estacionales de AA en ocho especies arbóreas.....	53
Figura 19 Promedios estacionales de APTI en ocho especies arbóreas.....	56
Figura 20 Promedio de los valores de APTI tomando los resultados obtenidos de verano, otoño 2021 y primavera de 2022 de los bosques de Chapultepec, Nativitas y Tlalpan.....	58
Figura 21 Hoja de <i>Jacaranda mimosifolia</i> .....	62
Figura 22 Hoja de <i>Eucalyptus camaldulesis</i> .....	63
Figura 23 Hoja de <i>Fraxinus uhdei</i> .....	65
Figura 24 Recomendaciones de las especies arbóreas para el bosque de Chapultepec.....	69
Figura 25 Recomendaciones de las especies arbóreas para el bosque de Nativitas.....	70
Figura 26 Recomendaciones de las especies arbóreas para el bosque de Tlalpan.....	71

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Lista de Trabajos de APTI y API.....	11
Tabla 2 Categorización por rangos de APTI.....	22
Tabla 3 Gradación para obtener el API en árboles basada en APTI caracteres biológicos y socioeconómicos.....	24
Tabla 4. Características de las zonas de estudio.....	37
Tabla 5 Porcentaje obtenido de las categorías.....	41
Tabla 6 Correlación general.....	59
Tabla 7 Correlaciones Parciales.....	59
Tabla 8 Clasificación de APTI para las especies del bosque de Chapultepec.....	60
Tabla 9 Clasificación de APTI para las especies del bosque de Nativitas.....	61
Tabla 10 Clasificación de APTI para las especies del bosque de Tlalpan.....	61
Tabla 11 Tabla de valores para el Rendimiento Anticipado de las especies seleccionadas para el bosque de Chapultepec.....	64
Tabla 12 Tabla de valores para el API de las especies del bosque de Nativitas.....	64
Tabla 13 Tabla de valores para el API de las especies del bosque de Tlalpan.....	64
Tabla 14 Categorías para plantaciones de árboles basado en API y APTI.....	64



## **SIGLAS**

AA. Ácido ascórbico

API. Índice de rendimiento anticipado

APTI. Índice de tolerancia a la contaminación del aire

AVU. Áreas verdes urbanas

BVOCs. Compuestos orgánicos volátiles biogénicos

CDMX. Ciudad de México

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

COVs. Compuestos orgánicos volátiles

DHAR. Dehidroascorbato reductasa

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía

ONU. Organización de las Naciones Unidas

PM<sub>2.5</sub>. Material particulado suspendido en el aire con un diámetro de menos de 2.5 micras

PM<sub>10</sub>. Material particulado suspendido en el aire con un diámetro de menos de 10 micras

Ppb. Partes por billón

CRA. Contenido relativo de agua

ROS. Especies reactivas de oxígeno

SEDEMA. Secretaría del Medio Ambiente

ZMVM. Zona Metropolitana del Valle de México

## **ELEMENTOS Y FORMULAS**

Ca. Calcio

Cd. Cadmio

CO. monóxido de carbono

CO<sub>2</sub>. Dióxido de carbono

HNO<sub>3</sub>. Ácido nítrico

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Ácido sulfúrico

Mg. Magnesio

Mn. Manganeseo

Ni. Níquel

NO<sub>x</sub>. Óxidos de nitrógeno

NO<sub>2</sub>. Dióxido de nitrógeno

O<sub>3</sub>. Ozono

Pb. Plomo

SO<sub>x</sub>. Óxidos de azufre

SO<sub>2</sub>. Dióxido de azufre.

SO<sub>3</sub>. Trióxido de azufre

## RESUMEN

La selección de especies arbóreas con criterios ecofisiológicos y urbanísticos, tiene un comienzo con la aplicación de los índices de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI), pondera la capacidad bioquímica y fisiológica de las plantas para resistir la contaminación, en ciudades de India, Arabia Saudí, Pakistán, Turquía, Filipinas, Hungría, África, y oeste de Asia. El Índice de Rendimiento Anticipado (API) considera aspectos biológicos y socioeconómicos del arbolado a fin de categorizar la eficacia en la captura de contaminantes en un entorno urbano.

Se eligieron los bosques de Nativitas (verano de 2021) y Tlalpan (otoño de 2021 y primavera de 2022) por ubicarse en el área de suelo de conservación de la Ciudad de México y el de Chapultepec, por estar en la urbe (verano y otoño de 2021 y primavera de 2022). Se realizó una comparación de tres especies comunes en los bosques con un evidente estrés atmosférico.

El APTI y el API se determinó de acuerdo con lo descrito por Singh et al. (1991) y por Goswami et al. (2022), respectivamente. Cabe destacar que la colecta de hojas fue sin que presentaran daños, al igual que los árboles analizados para determinar el API.

De los resultados APTI se determinó que *Eucalyptus camaldulensis* y *Ficus benjamina*, son tolerantes, y *Quercus rugosa* sensible en el Bosque de Chapultepec. Así mismo *Eucalyptus camaldulensis* resulto también tolerante en los Bosques de Tlalpan y Nativitas.

Respecto al API se clasificó a *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus benjamina* y *Quercus rugosa* como "Buenos", mientras que *Cupressus lusitanica* alcanzó la categoría de "Muy Bueno" en el Bosque de Chapultepec. En contraste, *Fraxinus uhdei* no se recomendó para proyectos que pretendan la reducción de contaminación, debido a su bajo API.

En el Bosque de Nativitas, *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus camaldulensis* se consideraron árboles adecuados, obteniendo una clasificación de "Buenos". Por otro lado, *Fraxinus uhdei* y *Jacaranda mimosifolia* mostraron un rendimiento deficiente. En el Bosque de Tlalpan, los árboles con el mejor desempeño fueron *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus benjamina* y *Quercus rugosa*, todos clasificados como "Buenos". En esta zona se observó el valor más bajo de API entre todos los bosques, correspondiente a *Fraxinus uhdei*, catalogado como "Muy Pobre".

Se concluyó con la investigación directrices en la selección de árboles en proyectos de restauración y reforestación, basados en el potencial de APTI y API de las especies para actuar como filtros naturales, y también informa sobre el estado actual de los bosques.

## I. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México (CDMX) emitió elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos durante el año 2020, para PM<sub>2.5</sub> fueron de 14,939 t/año; PM<sub>10</sub> de 31,135 t/año, NO<sub>x</sub> equivalentes a 134,174 t/año, para CO a 974,037 t/año, SO<sub>2</sub> fue de 2,996 t/año y por último en COVs se emitieron 434,752 t/año. En su mayoría, estos contaminantes tienen origen en fuentes vehiculares, industriales, de construcción, quema de biomasa y emisiones naturales. Las condiciones geográficas de la CDMX estancan los contaminantes en el periodo seco<sup>1</sup> (SEDEMA, 2023, pp. 18-41).

Los árboles, actúan como filtros naturales, capturando partículas suspendidas en el aire, como polvo y humo, así como absorbiendo y reteniendo gases tales como el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno. contribuyendo a reducir la presencia de dichos contaminantes en la atmósfera (Nowak et al., 2006, p. 115). La eficacia de esta acción puede variar de acuerdo de las condiciones ambientales, la especie en cuestión y el tipo de contaminante.

Para abordar esta problemática, estudios previos (Ghosh et al., 2023; Rai, 2020; S. K. Singh et al., 1991; Sulistijorini et al., 2008) se han centrado en la selección de especies arbóreas adecuadas. En este contexto, una búsqueda documental reveló dos herramientas de selección: APTI y API. Los índices combinan la capacidad de las plantas para tolerar la contaminación atmosférica con su desempeño en un entorno urbano.

El APTI (S. K. Singh et al., 1991) y el API (Shannigrahi\* et al., 2004) se emplearon en diversos países, como India, China, Irak y naciones de la Unión Europea, aunque su uso en el

---

<sup>1</sup> La Ciudad de México es de tipo monzónico con dos periodos bien diferenciados, uno cálida y húmedo, (de mayo a octubre) y otro frío y seco (de noviembre a abril). El 80% de la lluvia ocurre durante el verano y el resto durante el invierno

contexto mexicano sigue siendo limitada. Su aplicación es de gran importancia para abordar la problemática de la alta contaminación atmosférica y proteger la salud de los árboles en los bosques urbanos de la CDMX.

La evaluación de APTI y API de las especies previamente plantadas en la CDMX proporcionará una guía fundamentada en aspectos bioquímicos, fisiológicos y fenológicos para tolerar y eliminar contaminantes, que ayudará en la selección de especies en proyectos de restauración y programas de reforestación.

## II. ANTECEDENTES

La mitigación con árboles, del efecto dañino de la contaminación del aire en las ciudades más pobladas del mundo, según buscadores documentales (Pro Quest y Eseriver) con la palabra APTI vs árbol, arrojaron 544 documentos (1970 al 2022), de ellos 518 son de revistas científicas, y la década con mayor producción fue de 2010-2019.

El APTI y API proporcionan la evidencia científica de la tolerancia y del rendimiento para capturar contaminantes y en la adaptabilidad que tengan las especies al entorno. En la Tabla 1 se enlista el primer artículo publicado de APTI y API, así como el primer trabajo en México y los que se han realizado en el mundo, considerando las especies que se estudian en la presente investigación.

**Tabla 1**

*Lista de Trabajos de APTI y API*

<b>Autor / año</b>	<b>País</b>	<b>Aporte</b>
Singh et al, 1991	India	Se estimaron los valores de APTI para 69 especies de plantas, abarcando hierbas, arbustos y árboles.
Shannigrahi et al, 2004	India	Se evaluó el índice el APTI y API de 30 especies de plantas para el desarrollo de zonas verdes en y alrededor de un área urbana industrial en India.
Ramírez et al, 2017	México	Se determinó la capacidad de <i>Musa paradisiaca</i> y <i>Mangifera indica</i> como biomonitores de contaminación atmosférica por la quema de biomasa con APTI
Alotaibi, et al, 2020	Arabia Saudí	El valor de APTI para <i>E. camaldulensis</i> fue de 18.9 a 21.8 y con un API bueno.
Datta et al, 2021	India	Este estudio reportó a <i>C. equisetifolia</i> con 6.9, <i>F. benjamina</i> 13.7 y <i>E. camaldulensis</i> con 13.6 en el valor de APTI.
Watson y Sudha Bai, 2021	India	APTI de <i>F. benjamina</i> es de 9.68 y de <i>J. mimosifolia</i> obtuvo un valor de 5.96 con una categoría de API de moderado para <i>F. benjamina</i> y no recomendado para <i>J. mimosifolia</i> .
Correa-Ochoa et al, 2022	Colombia	Reportó valores de <i>J. mimosifolia</i> 9-11. y <i>F. uhdei</i> de 8-12 y un rendimiento anticipado de pobre y moderado respectivamente.
Elawa et al, 2022	Egipto	<i>F. benjamina</i> , <i>E. camaldulensis</i> y <i>C. equisetifolia</i> con valores de APTI de 9.85, 9.55 y 9.24 y para API su rendimiento fue muy bueno, excelente y muy bueno respectivamente.
Barjoe et al, 2023	Irán	<i>E. camaldulensis</i> (10.69) obtuvo la clasificación de tolerante y su rendimiento fue excelente.

### III. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Los árboles y la contaminación *atmosférica*

Los árboles actúan como filtros de gases y partículas emitidas por la industria y el parque vehicular, reduciendo los peligros para la ciudadanía. Su capacidad se basa en factores anatómicos y fisiológicos, micro y macroestructura de las hojas (tricomas y forma de estomas), arquitectura de la copa, textura cuticular y el hábito (Steinparzer et al., 2023, p. 2).

La *World Wild Foundation* publicó que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) refiere que un árbol adulto absorbe 150 kg/año de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) las hojas y la corteza de los árboles captura las partículas microscópicas de Co, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Cd, Ni, y Pb, reduciendo también en un 40% la contaminación acústica.

Martins, el 7 de marzo de 2017 publicó para la *British Broadcasting Corporation* (BBC) que Abdullahi, con monitores portátiles, registró 120 ppb de NO<sub>2</sub> en avenidas y bajo los árboles 100 ppb; esto sugiere una eliminación por parte de los árboles. Por su parte, Nowak, con más de 20 años estudiando la remoción, explicó a Crowdsience que los contaminantes se incorporan por las estomas y, al disolverse dentro de la hoja, pueden utilizarse como fertilizantes de nitrógeno y azufre. A su vez, concluye que las coníferas (pinos y abetos) son mejores para remover, debido a que son perennes y porque las ceras adhieren las moléculas de los contaminantes. En contraste, los olmos (caducos) tienen hojas grandes con textura rugosa; por ello, son buenas captadoras de partículas, con la desventaja de emitir muchos compuestos orgánicos volátiles (COVs). La remoción típica oscila entre 1 y 15 toneladas de partículas por año.

Estudios en bosques jóvenes de pinos y abetos, con aproximadamente 40 metros de altura y 60 centímetros de diámetro, captan 4 t/año de CO<sub>2</sub>, mientras que los pinos logran 5 t/año. Por su parte, las caducifolias como el roble capturan 6 t/año de CO<sub>2</sub> y el haya alcanza 7 t/año (Nowak

et al., 2006, p. 121). La selección de especies aptas para reducir la contaminación es vital para las ciudades, incluyendo a México.

Ghosh et al., (2023) informaron que las aperturas estomáticas, encargadas del intercambio gaseoso, son la entrada de los contaminantes a las hojas. Estos contaminantes se depositan en los espacios intercelulares, afectando gradualmente las actividades fisiológicas y bioquímicas, como la clorofila, la filotaxia y el ácido ascórbico (AA). Además, pueden alterar la distribución de las estomas, el contenido relativo de agua (CRA) y el pH.

El SO<sub>2</sub>, una vez oxidado a trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) dentro de la hoja, forma ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), de ahí la importancia del registro de la acidez y de la turgencia. El ácido en el interior de la planta impacta las actividades metabólicas, disminuyendo la productividad. Los síntomas morfológicos son: manchas de color marrón rojizo en las coníferas (Figura 1) y, en concentraciones elevadas, las hojas se esqueletizan y se necrosan. En bajas concentraciones, hay blanqueo clorótico intervenal de las hojas. El color clorótico o marrón-rojizo se debe a sus propiedades reductoras que causan toxicidad. Aunque no se vean lesiones, el SO<sub>2</sub> reduce la producción de materia seca (Rao y Dubey, 1990, p. 56; Varshney et al., 1979, p. 4).

Los fluoruros inhiben la fotosíntesis, de ahí la importancia del registro de la clorofila y del ácido ascórbico. Estos ingresan por las raíces y llegan a las hojas o penetran a través de las estomas, acumulándose en los márgenes de las hojas. El daño primario es la necrosis en los bordes de las hojas (Figura 2), con tono amarillo pálido o marrón rojizo, y podría llevar a la sequedad, ya que requieren cofactores como los iones. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Mn<sup>2+</sup>. Su toxicidad reduce la longitud de las raíces y los brotes (Sutton et al., 2020, p. 16).

El peroxiacetilo, causa clorosis y senescencia temprana, inhibe el crecimiento y el bronceado del área inferior de las hojas, especialmente afectando a las hojas jóvenes (Figura 3) Ingresa a través de las estomas y colapsa las células del tejido esponjoso, inhibe reacciones

metabólicas de oxidación del grupo sulfhídrico en varias enzimas (OKANO et al., 1990, p. 143).

**Figura 1**

*Daño provocado por el fluoruro de hidrógeno*



Nota. Necrosis de la aguja de pino blanco oriental expuestas a fluoruro de hidrogeno Tomada de *Diagnosing Injury to Eastern Forest Trees* [Fotografía]. Skelly, et al., 1987.

**Figura 2**

*Daño provocado por el SO<sub>2</sub>*



Nota. Necrosis marginal e intervenal en hojas de haya americana expuesta a SO<sub>2</sub>. Tomada de *Diagnosing Injury to Eastern Forest Trees* [Photography]. Skelly, et al., 1987.



### Figura 3

*Daño provocado por el peroxiacetilo*



Nota. Punteado pigmentado oscuro en el haz de la hoja y clorosis general de las hojas de álamo amarillo expuestas a peroxiacetilo Tomada de *Diagnosing Injury to Eastern Forest Trees* [Fotografía]. Skelly, et al., 1987.

El estrés ambiental causa síntomas semejantes a los producidos por daño por contaminación p. ej. la sequía, herbicidas, hongos, insectos y fertilizantes. El que un árbol sucumba o no a la contaminación atmosférica dependerá de la combinación de lo ambiental y de adaptabilidad y de la genética de las especies (Ghafari et al., 2021, p. 1580; S. K. Singh et al., 1991, p. 45).

La Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agropecuario (COCODA) reportó en 1986 que los árboles disminuyen la contaminación del aire y solucionan problemas ambientales de la ciudad, por ejemplo:

- i)** Las hojas absorben el sonido y retienen la pérdida de humedad, amortiguan el golpe directo de la lluvia en el suelo, evitando su erosión.
- ii)** Las hojas y ramas disminuyen el ruido y la velocidad de los vientos de erosión.
- iii)** El follaje denso bloquea la luz y el poco denso la filtra regulando la radiación.
- iv)** El color del follaje y las flores proporcionan ambientes con sensaciones agradables.
- v)** Las copas de los arbustos y árboles humedecen el suelo, y son hábitat de la fauna.

### 3.2. *El índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI)*

El APTI es útil para evaluar la capacidad de las plantas para resistir la contaminación del aire. Roa (1990) planteó la posibilidad de controlar la contaminación por SO<sub>2</sub> utilizando vegetación, midiendo el área foliar fotosintética, la clorofila y el contenido de ácido ascórbico, ya que son parámetros de una medida precisa de la respuesta de las plantas y su capacidad para resistir los efectos negativos de los contaminantes. En 1983, Singh y Rao publican el índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire en el *Symposium on Air Pollution Control*, profundizando los atributos del ácido ascórbico, clorofila, contenido relativo de agua y pH del extracto de hoja.

Singh y Rao (1983) reúnen los criterios bioquímicos en la fórmula APTI, evaluando la tolerancia de las plantas a la contaminación atmosférica. Singh y colaboradores (1991) estudiaron los niveles de susceptibilidad de 69 especies de plantas (23 árboles caducifolios, 19 perennifolias, 13 especies de arbustos y 14 especies de hierbas) de una región urbano-industrial de Lahartara, en Varanasi, India.

Los resultados revelaron que los valores bajos de APTI generalmente corresponden a plantas sensibles a los contaminantes, mientras que los valores altos se observan en plantas tolerantes. Concluyeron que las herbáceas son más sensibles a los contaminantes, a diferencia de los arbustos y árboles. Entre estos últimos, los árboles de hoja caduca son más sensibles en comparación con los de hoja perenne (S. K. Singh et al., 1991, p. 51).

En México, se registró un estudio (Ramírez et al., 2017), que examinó la sensibilidad de *Mangifera indica* (mango) y *Musa paradisiaca* (plátano) a los contaminantes del aire, derivados de la quema de biomasa en la comunidad de Tocooy, en San Luis Potosí.

Al obtener valores promedio de APTI para *Mangifera indica* de 7.05 y *Musa paradisiaca* de 6.62, se concluyó que ambas especies fueron consideradas sensibles a los contaminantes de la zona.

### 3.3. *Parámetros de APTI y la Contaminación atmosférica*

#### 3.3.1. *Ácido Ascórbico (AA)*

Desempeña varias funciones según Smirnoff y Wheeler, (2000), actúa como antioxidante, cofactor enzimático y precursor en la síntesis de oxalato y tartrato. También participa en procesos biológicos como: la fotosíntesis, protección contra la radiación solar, crecimiento, expansión y permeabilidad celular, da resistencia a condiciones ambientales adversas, y participa en la síntesis de etileno, giberelinas, antocianinas e hidroxiprolina.

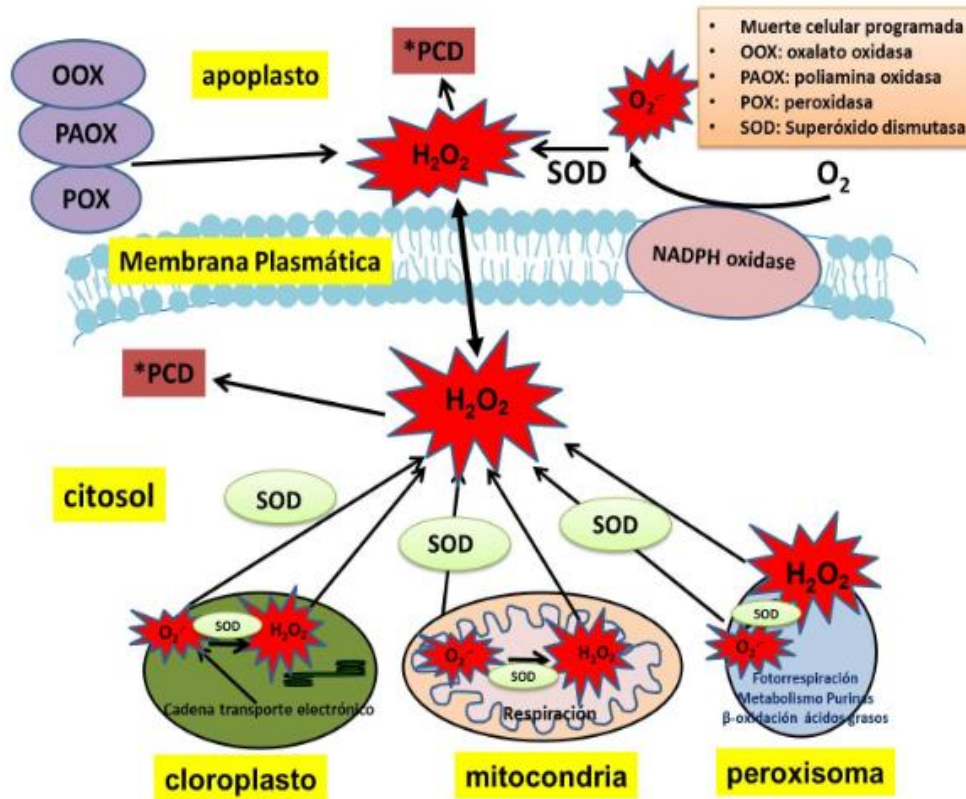
En las hojas, el ascorbato almacenado está influenciado por la cantidad de luz disponible, debido a la fotosíntesis y a la protección contra la radiación solar. Las hojas adaptadas a altas intensidades de luz presentan mayores concentraciones de ascorbato, en similitud con las cultivadas en baja intensidad lumínica, p. ej. la cebada y *A. thaliana*, se observó una disminución en la reserva de ascorbato en condiciones de oscuridad, efecto que puede ser revertido mediante el suministro de sacarosa o glucosa (Smirnoff y Wheeler, 2000, p. 241).

El ácido ascórbico desempeña la función de defensa contra las especies reactivas de oxígeno (ROS) generadas por el ozono ( $O_3$ ), por lo que no es sorprendente que los niveles totales de AA, se correlacionen con la resistencia al  $O_3$  en una amplia variedad de especies vegetales.

Dentro del apoplasto, la captura y desintoxicación del  $O_3$  y/o los reactivos intermedios del oxígeno, son los principales mecanismos defensivos que determinan la resistencia de las plantas al  $O_3$ . Se estima que aproximadamente el 10% de la reserva de AA se localiza en el apoplasto (Conklin, 2001, p. 384). Las plantas han desarrollado estrategias que permiten limitar el daño por estrés abiótico y biótico causado por los ROS, reduciendo su difusión en el interior de las hojas, mediante el cierre estomático o mediante la desintoxicación cuando ingresan (Figura 4).

**Figura 4**

*La evolución del metabolismo de las especies reactivas del oxígeno.*



Nota. Durante el proceso de crecimiento de las plantas, el estrés oxidativo emerge como una de las principales causas que impactan negativamente en su desarrollo. Plantas expuestas a tensiones bióticas o abióticas generan ROS dentro de los cloroplastos. Tomada de *Oxidative stress and antioxidative responses in plant-virus interactions* [ Imagen]. Hernández et al., 2016, p. 136.

La sobreexpresión de la enzima dehidroascorbato reductasa (DHAR), aumenta los niveles de AA en las hojas y células protectoras, lo que disminuye la capacidad de respuesta de las células ante el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Por otro lado, la supresión de la expresión de DHAR tiene el efecto contrario. Un alza en los niveles de AA en las hojas permite una mayor difusión de ROS en su interior, aumentando la capacidad de las células para desintoxicarse (mayor tolerancia).

La disminución en los niveles de AA en las hojas limita la difusión de ROS, al aumentar la respuesta de las células, disminuye la capacidad de la hoja para desintoxicar las ROS que ingresan, resultando en una tolerancia reducida (Chen y Gallie, 2005, p. 1673).

### 3.3.2 *Contenido total de clorofila*

La biosfera recibe radiación de longitudes de onda que va de 290 nm a 3000 nm), la de onda corta es filtrada por la capa de ozono y por el oxígeno atmosférico, la parte que llega a la superficie terrestre se absorbe por el agua y el anhídrido carbónico. Entre el 40-45% de la energía emitida por el sol, corresponde a los 380-720 nm (radiación fotosintéticamente activa) debido a que los pigmentos clorofílicos absorben en esa región (Larcher, 1977, p. 68). La vegetación transfiere la energía a el oxígeno del CO<sub>2</sub>, generando ROS (singletes, peróxido, peróxido de hidrogeno y radicales oxidrilos), pudiendo inhibir la biosíntesis o degradación de la clorofila, regulado por la producción de ROS, al coste del deterioro celular (Hörtensteiner y Kräutler, 2011, p. 976).

Los NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y COVs, crean especies ROS en las plantas, induciendo daño oxidativo en los tejidos, afectando los cloroplastos y la clorofila (Goyal et al., 2020, p. 121). El autor cita que la exposición al SO<sub>2</sub> y al O<sub>3</sub> reducen la tasa fotosintética, afectando el F-I y F-II, se inhibe el sistema de transporte de electrones y se reduce la fotofosforilación, y por tal efecto, la disminución en la tasa de fotosíntesis.

### 3.3.3. *pH de la hoja*

La capacidad de amortiguar (Scholz y Reck, 1977, p. 41) la precipitación ácida es un indicador de vitalidad en las plantas. Scholz y Stephan (1981) hallaron una relación entre la capacidad de amortiguación y la resistencia a hongos. Los SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, reaccionan con el agua de la atmósfera y forman ácidos, como el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>2</sup> y el ácido nítrico<sup>3</sup> (HNO<sub>3</sub>). Los ácidos se depositan en la superficie de las hojas y puede degradar las ceras cuticulares, la actividad enzimática y la absorción de nutrientes.

---

<sup>2</sup> El SO<sub>2</sub> se oxida a SO<sub>3</sub> mediante reacciones con radicales libres y oxígeno. A su vez reacciona con el agua (H<sub>2</sub>O) formando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

<sup>3</sup> El óxido nítrico (NO) se oxida en la atmósfera a dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Luego, el NO<sub>2</sub> reacciona con el agua formando el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Como se observan las reacciones corresponden a periodos de humedad estacional, pero no así para la seca.

#### 3.3.4. *Contenido Relativo de Agua (CRA)*

La capacidad de regular la conductancia foliar es crucial en el equilibrio hídrico de las plantas, especialmente en las hojas que han alcanzado pleno desarrollo, donde hay número determinado de estomas. Estos órganos sensoriales son asombrosamente versátiles, ya que detectan cambios en diversos factores del entorno aéreo y responden a señales de las raíces que están influenciadas por la humedad del suelo (Mansfield, 1998, p. 3).

La relación entre la contaminación atmosférica y el contenido relativo de agua en las hojas de los árboles es compleja y multifacética. A lo largo del tiempo, las plantas desarrollaron mecanismos altamente sofisticados que permiten a las estomas responder a una amplia gama de factores ambientales, buscando un equilibrio entre la captación de carbono para la fotosíntesis y la conservación del agua (Mansfield, 1998, p. 4).

Las plantas que están expuestas a niveles tóxicos de contaminación atmosférica, en el entorno natural a menudo muestran signos de estrés hídrico. Un estudio realizado en 1996 por Godzik y Piskornik, permitió concluir que la contaminación afecta la apertura y cierre de las estomas. Investigaciones posteriores en varias especies de plantas confirmaron que el SO<sub>2</sub>, puede perturbar el funcionamiento de las estomas, manteniéndolas abiertas por horas. Black y Black, (1979) corroboraron los hallazgos y demostraron que la mayor apertura estomática se asociaba con el daño a las células epidérmicas cercanas a las estomas, sugiriendo que el efecto mecánico explica de manera sencilla la mayor apertura de las estomas, ya que las células epidérmicas ofrecen una resistencia eléctrica, reducida a la deformación de las células guardianas, lo cual es necesario para abrir el poro estomático.

Hellmuth, (1970) detalló los métodos para la medición estomática en condiciones ambientales áridas y semiáridas, específicamente en situaciones de estrés natural. Se centró en el método para determinar el déficit hídrico foliar.

Estos métodos se basan en la medición del déficit de agua en hojas, y son los propuestos por Stocker, (1929) denominado “**déficit hídrico**” (ecuación 1) y Weatherley, (1950) “**turgencia relativa**” (ecuación 2). El término "**turgencia relativa**" fue cambiado por (Barrs y Weatherley, 1962, p. 413) a “**contenido relativo de agua**”. El método de Stocker se le conoce como "método de la hoja entera" y el de Weatherley' como del “disco flotante”; ambos requieren: **de peso húmedo inicial (fwt), peso húmedo después de la saturación (swt), y el peso seco al horno (dwt)**. Los déficits de agua se calculan con los porcentajes, utilizando la ecuación (1):

$$WD = \frac{stw - fwt}{swt - dwt} \times 100 \quad (1)$$

Y para el contenido relativo de agua o turgencia relativa:

$$RT = \frac{fwt - dwt}{swt - dwt} \times 100 \quad (2)$$

La contaminación del aire modifica la función estomática, perdiendo el control hídrico de la planta. Cada planta puede tener una sensibilidad única a las condiciones ambientales y a la presencia de contaminantes, lo que ayuda a la diversidad de respuestas observadas (Sun et al., 2020, p. 1).

### 3.3.5. *La fórmula APTI y clasificación arbórea*

APTI es un atributo específico de cada especie, cuya capacidad le permite enfrentar el estrés causado por la contaminación (Tiwari et al., 1993, p. 282). Singh y Rao, (1983) propusieron la ecuación (3) para calcular el APTI, evaluando la resistencia o tolerancia de las plantas mediante la relación de los parámetros bioquímicos y fisiológicos descritos.

$$APTI = \frac{AA (CT + P) + CRA}{10} \quad (3)$$

Nota. Donde AA (Acido Ascórbico), CT (Clorofila Total), P (pH) y CRA (Contenido relativo de agua)

Singh et al., (1991) destacaron el papel del ácido ascórbico como protector de los cloroplastos contra los compuestos ROS, preservando a las enzimas para la fijación del CO<sub>2</sub> y evitando la inactivación de la clorofila. Además, el pH de las hojas y la concentración de AA juegan un papel crucial en la determinación de la sensibilidad de las plantas al SO<sub>2</sub>. El AA tiene un mayor poder reductor en valores de pH alcalinos, sugiriendo una protección a los cloroplastos y a las funciones de la clorofila. Por lo tanto, la parte de la fórmula AA (CT+P), abarca el potencial de los cloroplastos para afrontar los contaminantes ingresados a la planta.

Con la inclusión del CRA, en el término de la fórmula AA (CT+ P) \* CRA se considera la permeabilidad de la membrana celular para mantenerse estable, hasta en condiciones contaminadas. Por tanto, la combinación de los cuatro parámetros representa el índice más efectivo para evaluar los niveles de susceptibilidad de las plantas en condiciones de campo.

Las especies de plantas analizadas con APTI se clasifican en intervalos (ver Tabla 2), y cabe destacar que esta clasificación cubre una gran parte del mundo. Tiene la versatilidad de aplicarse en diversas condiciones de campo, y con datos provenientes del monitoreo ambiental.

**Tabla 2**

*Categorización por rangos de APTI*

<b>Clasificación</b>	<b>Valor de APTI</b>
Sensible (S)	≤ 12
Intermedio (I)	13 - 16
Moderadamente tolerante (MT)	17 - 20
Tolerante (T)	≥ 21

Las especies de alta sensibilidad al estrés provocado por la contaminación atmosférica podrían utilizarse como bioindicadores, indicando la calidad del aire y el tipo de contaminantes. Aunado a ello, las especies con mayor tolerancia podrían utilizarse como sumideros, debido a su capacidad de absorber y reducir la concentración de los contaminantes atmosféricos (Rai, 2016, p.



125). El uso del APTI permite identificar especies sensibles y tolerantes, para distintos fines como: plantaciones forestales y urbanas, anillos verdes, humedales y simultáneamente la calidad del aire.

Recientemente se reportan métodos complementarios para aumentar su precisión y aplicabilidad, como es la *Tasa de Crecimiento Relativo* (RGR), Sulistijorini et al., (2008), el *Índice de Tolerancia al Dióxido de Azufre* (STI), Murthy et al., (1991), el *Índice de Tolerancia al Dióxido de Nitrógeno* (NTI), Verma, (2003) y el *Índice de Rendimiento Anticipado* (API) Shannigrahi\* et al., (2004).

#### 3.4. *El API y la integración del APTI*

Shannigrahi\* et al., (2004) reportaron que el APTI proporciona una clasificación de especies sensibles, intermedias y tolerantes, identificando aquellas que puedan mitigar el impacto de la contaminación del aire. Integrando al APTI, con aspectos biológicos, socioeconómicos, p.e., el hábito de crecimiento, la estructura de las hojas y del dosel, el valor económico asociado denominado como, Índice de Rendimiento Anticipado. Cada parámetro referido recibe una asignación de grados (+ o -), expresados en la Tabla 3 (Goswami et al., 2022, p. 696).

Las calificaciones negativas son para las plantas de hábitat reducido, con copa dispersa e irregular, hojas caducas, textura blanda y baja dureza. Por el contrario, los puntos positivos se les dan aquellos árboles de hábitats medianos y grandes, con copa abierta y extendida, densidad foliar alta o media, hojas perennes, tamaño mediano o grande, textura coriácea y alta dureza; indicando que son adecuados para el desarrollo de cinturones verdes (Hozhabralsadat et al., 2022, p. 68568).

Ambos índices APTI y API evalúan el rendimiento y permite seleccionar las especies a plantar en áreas verdes (Kaur y Nagpal, 2017, p. 18883).

**Tabla 3**

*Gradación para obtener el API en árboles basada en APTI caracteres biológicos y socioeconómicos.*

Carácter de calificación		Patrón de evaluación	Grado asignado
<b>(a) Tolerancia</b>	APTI	9.0–12.0	+
		12.1–15.0	++
		15.1–18.0	+++
		18.1–20.0	++++
		20.1–24.0	+++++
<b>(b) Biológico</b>	Hábito de la planta	Pequeño	–
		Medio	+
		Grande	++
	Estructura del dosel	Escaso/irregular/globular	–
		Copa extendida/abierta/semidensa	+
		Esparciendo denso	++
Tipo de planta	Caduco	–	
	Hojas perennes	+	
<b>c) Estructura laminar</b>	Tamaño	Pequeño	–
		Medio	+
		Grande	++
Textura	Liso	–	
	Coriáceo	+	
Robustez	Delinear	–	
	Resistente	+	
<b>d) Socio- económico</b>	Valor económico	Menos de tres usos	–
		Tres o cuatro usos	+
		Cinco o más usos	++

### 3.5. *Los rasgos biológicos de los árboles en entornos urbanos*

La reducción de la contaminación atmosférica en entornos urbanos es fundamental analizar las respuestas individuales de cada especie considerando la sinérgica de los contaminantes, y los costos económicos por el daño ocurrido en las plantaciones. Los rasgos funcionales y las características

de los árboles son cruciales en la evaluación de la respuesta y tolerancia en entornos urbanos (Mukherjee y Agrawal, 2018, p. 44).

Las características biológicas a considerarse del árbol en corredores verdes, parques y bosques son: la tolerancia o resistencia a la contaminación, alto kilaje de liberado de oxígeno y/o captura carbono, estructura del dosel (tamaño y extensión de copa, forma y densidad) y follaje (forma de la hoja, tipo de superficie y fisiología) (Grote et al., 2016, p. 544).

#### *Carácter Biológico: Habito, estructura del dosel y tipo de hoja*

El tamaño del árbol desempeña es relevante en la capacidad de reducir la contaminación, el calor, la radiación y la temperatura interna de los edificios. Así mismo la altura y estructura del dosel (Figura 5), la ubicación y altura de las fuentes de emisión son factores que influyen en su capacidad de mitigación (Prusty et al., 2005, p. 229).

En áreas donde los automóviles son la principal fuente de polvo y contaminantes gaseosos, las plantas más bajas están directamente expuestas a estas emisiones a nivel del suelo. Por otro lado, las emisiones de las fábricas suelen ser liberadas a mayores alturas; en ese caso, los árboles más altos serían los expuestos (Prusty et al., 2005, p. 233).

Por lo tanto, la altura de los árboles en relación con las fuentes de emisión determina la cantidad de contaminantes que pueden capturar (Figura 5). Los árboles más altos tienen la capacidad de interceptar y retener una mayor cantidad de contaminantes, mientras que los árboles más bajos son más efectivos en la captura de partículas de polvo y emisiones a nivel del suelo. La geometría de la copa y la distribución del follaje de los árboles, influyen en la velocidad del viento y su desaceleración, y eso resulta difícil de evaluarse universalmente, debido a la compleja relación fenológica, meteorología y la infraestructura urbana (Amorim et al., 2013, p. 550).

**Figura 5**

*Ejemplo de diferentes usos del arbolado en la CDMX*



Según estudios publicados por Harris y Manning, (2010) un dosel denso con baja turbulencia aumenta el tiempo de residencia del aire con contaminantes gaseosos reactivos y con COVs, originando las reacciones químicas entre los emitidos, con los fotoquímicos. Las especies perennes y caducas representan dos estrategias de vida; las primeras experimentan transformaciones fisiológicas durante el desarrollo de las hojas, alcanzando sus capacidades máximas durante la primavera y el verano, dependiendo de la disponibilidad de agua.

La humectabilidad de las hojas jóvenes es mayor que la de las hojas maduras, acumulando lesiones cuticulares a lo largo del tiempo (Grote et al., 2016, p. 548). Las especies perennes ofrecen sombra constante y protección contra el viento durante todo el año, en espacios abiertos, contribuye a la conservación del suelo y a la regulación del clima local por el follaje persistente.

En el caso de las especies caducas, los rasgos biológicos varían durante la temporada de crecimiento, con el incremento del área foliar, el contenido de nitrógeno y con la posible emisión de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (BVOCs) durante el desarrollo de las hojas. Estos cambios están relacionados con necesidades específicas, como la comunicación o la mitigación del estrés, para atraer polinizadores o depredadores de parásitos (Grote et al., 2016, p. 545). Las caducas favorecen la penetración de luz solar en el suelo durante las estaciones de crecimiento, lo que estimula el desarrollo de otras plantas y enriquece la diversidad del ecosistema.

### 3.6. Estructura Laminar: Tamaño, Textura y robustez

Baraldi et al., (2019) publicaron que las características estructurales de las hojas (cutícula, epidermis, cera epicuticulares, estomas y tricomas), área foliar total, influyen en la eficiencia de los árboles y arbustos para la eliminación de partículas contaminantes de la atmósfera urbana. En general, se considera que las coníferas son más efectivas en la captura de PM que las especies de hoja ancha, contrario a lo dicho por (Nowak et al., 2006, p. 121).

Entre los árboles de hoja ancha, las especies con superficies foliares rugosas son más eficientes en la captura de PM, debido a la superficie corrugada que interactúa con partículas finas y ultrafinas, por el efecto de la difusión browniana (Hwang et al., 2011, p. 6987). En términos generales, las hojas con superficies rugosas o con tricomas tienden a tener una mayor capacidad para capturar partículas contaminantes, debido a que ofrecen más áreas de captura y retención. Asimismo, Hwang et al., (2011) reportó que las hojas grandes tienen una mayor superficie de captura en comparación con las hojas más pequeñas (Jamil et al., 2009, p. 273). Algunas especies de árboles, cuyas hojas pueden capturar una cantidad significativa de partículas y contaminantes son: **i)** Árboles con hojas grandes y rugosas: son la *Macadamia integrifolia* y el *Platanus spp.* (plátano de sombra). **ii)** Árboles con hojas con tricomas, es el *Quercus rugosa*, y el *Salix spp.*, (saúce) y *Buddleja cordata* (tepozán).

### 3.7. La vegetación arbórea de la CDMX

“La Ciudad de México es testigo mudo de la improvisación irracional, de la carencia de planeación, en lo referente a áreas verdes” (COCODA 1986). La selección de especies inadecuadas para el entorno urbano y el manejo inapropiado o incluso la falta de gestión. La amplia variedad de especies de árboles plantados en la CDMX son el fresno (*Fraxinus udhei*), el eucalipto

(*Eucalyptus camaldulenses* y *E. globulus*), el aligustre (*Ligustrum lucidum*), la jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*), el liquidámbar (*Liquidambar styraciflua*), la casuarina (*Casuarina equisetifolia*) y el colorín (*Erythrina coralloides*). Es preocupante que alrededor del 70% de especies sean exóticas, y un bajo porcentaje de nativas del valle de México. Las especies producidas en viveros no debe responder a una moda o por gusto personal de los dirigentes (Benavides, 1992, p. 34).

#### *Casuarina equisetifolia*

Es un árbol perennifolio (Figura 6), las hojas de la casuarina no son hojas verdaderas, sino filocladios, estructuras similares a hojas modificadas en forma de aguja, son pequeños y escamosos, con un aspecto similar al follaje del pino. Puede alcanzar alturas de 15 a 30 m, por ello, se utilizan como barrera rompevientos en las costas y cultivos agrícolas, es una opción efectiva para proteger los campos del efecto del viento (Potgieter et al., 2014, p. 617).

#### *Cupressus lusitanica*

Árbol perennifolio (Figura 7) con hojas en forma de escama, de tamaño muy reducido, dispuestas en pares opuestos y rodeando los tallos, creando una apariencia frondosa y densa. Alcanzan alturas de 20 a 40 m (Chacalo et al., 2009, p. 401; González y Lezama, 2008, p. 178).

#### *Eucalyptus camaldulensis*

Es un árbol perennifolio (Figura 8), de hojas lanceoladas, de color verde oscuro, aromáticas y colgantes. Las flores son blancas o cremosas formando grupos (umbelas). Es grande, alcanza alturas de hasta 45 metros. Tiene una copa amplia y abierta (González y Lezama, 2008, p. 391).

### *Ficus benjamina*

Es un árbol perennifolio (Figura 9) de hojas brillantes y lanceoladas, son simples, alternas y de color verde oscuro, de 6 a 13 cm de longitud y puntas agudas., con forma elíptica y su nervadura central prominente (Chacalo et al., 2009, p. 366).

### *Fraxinus uhdei*

Es un árbol caducifolio (Figura 10), las hojas son opuestas, compuestas y pinnadas, con hojuelas de bordes dentados y generalmente de color verde oscuro. Las flores son pequeñas y de color verde o amarillo pálido. Los frutos son sámaras que contienen una sola semilla alada, lo que facilita su dispersión por el viento. La corteza es de color grisáceo a marrón y rugosa. Puede alcanzar alturas de 20 a 30 metros (Chacalo et al., 2009, p. 299).

### *Jacaranda mimosifolia*

Es un árbol caducifolio (Figura 11), con hojas bipinnadas. Están formadas por pequeñas hojuelas de hasta 5 cm de longitud, lo que le da un aspecto plumoso. Las flores son de forma tubular, de color azul o lila intenso, y se agrupan en racimos de hasta 30 cm de longitud (González y Lezama, 2008, p. 217). La corteza del árbol es de color grisáceo y suele tener un aspecto rugoso a medida que el árbol envejece y pueden alcanzar alturas de hasta 15 metros, con una copa amplia y extendida.

**Figura 6**

*Casuarina equisetifolia.*



**Figura 7**

*Cupressus lusitanica*



**Figura 8**

*Eucalyptus camaldulensis*





**Figura 9**

*Ficus benjamina*



**Figura 10**

*Fraxinus uhdei*



**Figura 11**

*Jacaranda mimosifolia*



### *Quercus rugosa*

Es un árbol caduco, las hojas son simples, alternas y de forma lobulada, de color verde oscuro, con márgenes dentados y con una superficie rugosa, volviéndose de colores cálidos (amarillo o rojo) en otoño. (Figura 12) Es de tamaño mediano a grande que puede alcanzar alturas de hasta 25 metros (Chacalo et al., 2009, p. 251).

### *Taxodium mucronatum*

Es un árbol de hoja perenne, pequeñas y escamosas, dispuestas en espiral a lo largo de las ramas, persisten todo el año. Los conos son de aproximadamente 1 cm de diámetro y contienen escamas con dos semillas aladas (Figura 13). El ahuehuete supera los 40 metros de altura en su madurez (Chacalo et al., 2009, p. 411).

**Figura 12**

*Quercus rugosa*



**Figura 13**

*Taxodium mucronatum*



#### **IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Según el INEGI, la CDMX, tiene 8.9 millones de personas, con una población flotante de aproximadamente 5 millones, Potapov et al., (2022) reportó que, durante los años 2001 y 2022, la CDMX perdió 225 hectáreas de cobertura arbórea, equivalente a una disminución del 0.54%, contribuyendo con un total de 127kt de emisiones de CO<sub>2</sub>. Durante el mismo periodo, se perdieron 29 ha de bosque primario, representando el 15% del total de la pérdida de cobertura arbórea en la CDMX. Como resultado, el área total de bosque primario se redujo en un 1.5%. Es una realidad que las Áreas Verdes Urbanas (AVUs) no aumentaran en superficie, pero en la selección de especies sí.

Los criterios de selección de especies a plantar en AVUs se basa en aspectos estéticos, como: **i)** el tamaño forma, color, floración ornamental y efectos visuales a largo plazo (Ramírez-Hernández et al., 2012, p. 72). **ii)** Los urbanísticos son: *diversidad de especies, carga de mantenimiento* (poda, riego, y limpieza de hojas), *accesibilidad, tamaño, escala, requerimientos de sombra, culturales, patrimoniales y resiliencia al cambio climático* (López, 2006, p. 129). Las funciones bioquímicas junto con los aspectos biológicos y socioeconómicos que le confieren a los árboles características como la tolerancia y retención de contaminantes no han sido consideradas como criterios fundamentales en la selección de especies, a raíz de esta situación surge la siguiente interrogante de investigación:

***¿En Ciudad de México APTI y API puede ser métricas a considerar eligiendo a partir de los árboles plantados, las especies adecuadas en bosques urbanos?***

## V. OBJETIVO GENERAL

Establecer el potencial de tolerancia y de captura de contaminantes atmosféricos de *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lusitánica*, *Eucalyptus camaldulesis*, *Ficus benjamina*, *Fraxinus uhdei*, *Jacaranda mimosifolia*, *Quercus rugosa* y *Taxodium mucronatum* de los bosques aplicando el APTI y API, para la selección de árboles que puedan resistir y retener mejor la contaminación, contribuyendo a mantener entornos urbanos más saludables.

### *Objetivos particulares*

- Evaluar los atributos bioquímicos para el APTI de las ocho especies de árboles urbanos en la Ciudad de México, para medir su capacidad para resistir o tolerar la presencia de contaminantes.
- Determinar la habilidad de retener contaminantes mediante API para crear entornos más sostenibles y resistentes a las presiones ambientales.
- Obtener una escala APTI específica para Ciudad de México de cada uno de los bosques.
- Destacar las especies con un mayor potencial para ser plantadas en zonas contaminadas, basándose en los resultados de APTI y API.

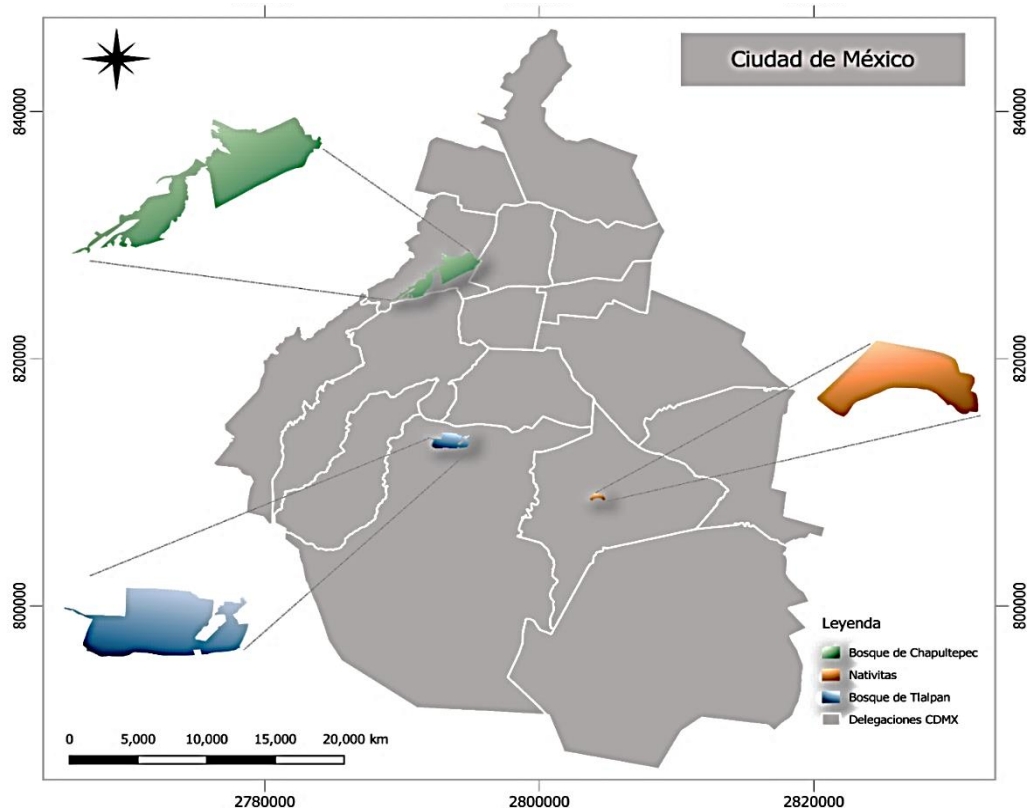
## VI. MATERIAL Y MÉTODO

### 6.1. Zona de estudio

Los bosques de Chapultepec, Tlalpan y de Nativitas son urbanos (Figura 14) con características ambientales descritas en la Tabla 4, destacando el clima, humedad y niveles de contaminación. La composición arbórea de cada uno de ellos es muy variada y solo se seleccionaron para el estudio las comunes en los tres bosques, con el fin de comparar los índices APTI y API. El suelo de la 1ra y 2da sección del bosque Chapultepec es antrosol y Litosol (origen volcánico) para Tlalpan: Respecto al bosque de Nativitas son suelos de brecha volcánica (volcán Teuhtli), con textura franco arenosas y arcillosa.

**Figura 14**

*Ubicación de los bosques urbano en relación con la Ciudad de México*



**Tabla 4.**

*Características de las zonas de estudio*

Alcaldía	Superficie (km <sup>2</sup> )	Clima	Bosque	Superficie (ha)	Promedio anual de contaminantes emitidos	Especies seleccionadas
Miguel Hidalgo	46.8	<p><i>C(w2)</i>. Estas se ubican al suroeste. La superficie que cubre este tipo de clima es de 819 hectáreas.</p> <p><i>C(w1)</i>. Se ubica al centro y noroeste de la demarcación y es clima predominante en la alcaldía con 3521 hectáreas del territorio</p> <p><i>C(w0)</i>. se encuentra en la parte noreste, únicamente 296 hectáreas del territorio</p>	Chapultepec	686.05	<p>SO<sub>2</sub>: 3.9 ppb</p> <p>NO<sub>x</sub>: 38.9 ppb</p> <p>NO<sub>2</sub>: 23 ppb</p> <p>NO: 15.9 ppb</p> <p>CO: 0.36 ppm</p> <p>O<sub>3</sub>: 246 horas &gt; 95 ppb</p>	<i>C. equisetifolia</i> , <i>C. lusitánica</i> , <i>E. camaldulensis</i> , <i>F. benjamina</i> , <i>F. uhdei</i> , <i>J. mimosifolia</i> , <i>T. macronatum</i> y <i>Q. rugosa</i>
Xochimilco	125.178	<p>A lo largo del territorio tiene un clima <i>C (W)wb(e)</i></p> <p>Se presentan cinco subtipos de climas el templado subhúmedo:</p> <p><i>C(Wo)(w)b(I)</i>. Se ubica al noroeste y únicamente cubre el 1% del territorio</p> <p><i>C (W1)(w)b(I)</i>. El 10.5 % de territorio presenta este clima</p> <p><i>C(w2) (w)bi</i>. El segundo clima presente en la demarcación con 26.4</p> <p><i>C(w2) (w)b'l</i>. Es clima predominante en la alcaldía con 49.1 % de la superficie</p> <p><i>Cb'(w2) (w)ig</i>. La superficie que cubre este tipo de clima es del 13%2.34</p>	Nativitas	26	<p>SO<sub>2</sub>: 1.7 ppb</p> <p>NO<sub>x</sub>: 17.3 ppb</p> <p>NO<sub>2</sub>: 12.4 ppb</p> <p>NO: 4.9 ppb</p> <p>CO: 0.31 ppm</p> <p>O<sub>3</sub>: 187 horas &gt; 95 ppb</p>	<i>C. lusitánica</i> , <i>E. camaldulensis</i> , <i>F. uhdei</i> , <i>J. mimosifolia</i> y <i>T. macronatum</i>
Tlalpan	304.49	<p><i>C(Wo)(w)b(I)</i>. Se ubica al noroeste y únicamente cubre el 1% del territorio</p> <p><i>C (W1)(w)b(I)</i>. El 10.5 % de territorio presenta este clima</p> <p><i>C(w2) (w)bi</i>. El segundo clima presente en la demarcación con 26.4</p> <p><i>C(w2) (w)b'l</i>. Es clima predominante en la alcaldía con 49.1 % de la superficie</p> <p><i>Cb'(w2) (w)ig</i>. La superficie que cubre este tipo de clima es del 13%2.34</p>	Tlalpan	253	No datos	<i>C. equisetifolia</i> , <i>C. lusitánica</i> , <i>F. benjamina</i> , <i>F. uhdei</i> , <i>E. camaldulensis</i> y <i>Q. rugosa</i>

Nota. A raíz de la pandemia que se vivió en el mundo por **COVID-19**, no se permitió el acceso al sitio, por lo que fueron excluidas de algunos análisis Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) para Tlalpan (Ajusco Medio). La Alcaldía Miguel Hidalgo fue reportada como la zona más contaminada (SEDEMA, 2023).



## 6.2. *Colecta y análisis del laboratorio*

Se seleccionó al azar tres árboles por especie en los Bosques Nativitas y Chapultepec, de ellos se colectó 12 muestras de hojas (200 g c/u), de cuatro puntos cardinales de las copas, el procedimiento se repitió en *Cupressus lusitánica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Fraxinus uhdei*, *Jacaranda mimosifolia* y *Taxodium mucronatum*.

Para el análisis se estacional se complementaron con datos de los registros del programa "Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) de los Árboles de los Bosques Urbanos de la Ciudad de México en el Contexto del "Programa Remoción Biótica de Contaminantes del Aire" del Laboratorio de Contaminación Atmosférica de la FES Zaragoza de las especies *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lusitánica*, *Ficus benjamina*, *Fraxinus uhdei*, *Eucalyptus camaldulensis* y *Quercus rugosa*, de los bosques de Chapultepec y Tlalpan durante el verano de 2021, a fin de completar estacionalidad (primavera, verano y otoño).

Las muestras colectadas se etiquetaron y conservaron en bolsas ziplock con toallas de papel húmedas dentro de hieleras, evitando el decaimiento fotosintético. En el laboratorio, se aplicaron los procedimientos para determinar pH (Alotaibi et al., 2020, p. 29159), CRA (S. K. Singh et al., 1991, p. 46), clorofila total (Joshi y Swami, 2009, p. 296) y Ácido Ascórbico (Hussain et al., 2010, p. 802). Toda vez que se obtuvieron los parámetros bioquímicos, se recopilaron datos morfológicos y socioeconómicos de las ocho especies de los tres bosques, con el propósito de calcular API.

### 6.2.1. *pH de la hoja*

Se aplicó el procedimiento de Alotaibi et al., (2020), homogenizaron cinco gramos de hojas en 10 ml de agua desionizada. Tras la maceración se registró el pH de la solución, con un potenciómetro HANNA (HI 2550), calibrado con buffers de pH 4, 7 y 10 (METREPAK).



### 6.2.2. Contenido Relativo de Agua

El procedimiento (Singh et al., 1991) indica que se tomaron dos gramos de hojas (FW) de cada punto cardinal y de cada árbol. Las muestras se sumergieron en agua de grifo durante 24 horas, se eliminó el agua de la muestra y se pesó la biomasa obteniendo el peso turgente (TW). Las mismas muestras fueron ingresadas al horno de secado ECOSHEL (mod. 9023) a una temperatura de 70°C durante 24 horas para eliminar toda la humedad absorbida. Pasado el periodo de secado, se pesaron nuevamente las muestras para obtener el peso seco (DW) final. Y con la ecuación (4) se determinó el CRA.

$$CRA = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100 \quad (4)$$

### 6.2.3. Contenido total de clorofila

La técnica aplicada (Joshi y Swami, 2009) plantea pesar tres gramos de hojas agregando 18 mL de acetona al 80%. La mezcla se decantó utilizando una centrífuga VELAB mod. VE-4000 a una velocidad de 2,500 rpm durante tres minutos. Se tomaron tres mililitros del sobrenadante a fin de registrar la absorbancia, con el espectrofotómetro JENWAY serie 67 (modelo 6715), previamente calibrado a 645 nm y a 663 nm utilizando una solución blanca. Se calcularon los valores de **clorofila a** (ecuación 5) y **clorofila b** (ecuación 6). Finalmente, se obtuvo la cantidad total de clorofila (clorofila total) sumando los valores de clorofila *a* y clorofila *b* (ecuación 7).

$$Clorofila\ a = \frac{(12.7_{D663} - 2.69_{D645})}{W(1000)} \times v \quad (5)$$

$$Clorofila\ b = \frac{(22.9_{D645} - 4.68_{D663})}{W(1000)} \times v \quad (6)$$

$$Clorofila\ total = Clorofila\ a + Clorofila\ b \quad \left(\frac{mg}{g}\right) \quad (7)$$

#### 6.2.4. *Ácido Ascórbico*

Para determinar la concentración de ácido ascórbico en las hojas conectadas se siguió el procedimiento sugerido por Hussain et al., (2010). Se pesaron un gramo de hojas mezclándose con 10 ml de una solución de ácido oxálico de concentración 0.05 M. El mezclado se dejó en oscuridad por 24 horas, extrayendo el AA. Después, se procedió a la preparación de las soluciones descritas en Hussain et al., (2010). Una vez preparadas las muestras, se midió la absorbancia con un espectrofotómetro JENWAY a una longitud de onda inicial (760 nm) y final (762 nm). La curva estándar con concentraciones de ácido ascórbico conocido para el cálculo de las muestras se realizó previamente.

#### 6.3. *Fórmula para el cálculo APTI.*

Fue determinado siguiendo el método de Singh et al., (1991) mediante la ecuación (3).

$$APTI = \frac{AA (CT + P) + CRA}{10} \quad (8)$$

Nota. Donde AA (Acido Ascórbico), CT (Clorofila Total), P (pH) y CRA (Contenido relativo de agua en %)

Los valores obtenidos por la ecuación APTI se calificaron en los niveles de sensibilidad/tolerancia de las especies arbóreas (Tabla 2), escala propuesta por Singh et al., (1991). Posteriormente, se categorizó las especies utilizando una propia escala con el método (Liu y Ding, 2008, p. 336) y se calculó de la siguiente manera: **i)** Tolerante:  $APTI > \text{media de APTI} + \text{desviación estándar (SD)}$ . **ii)** Moderadamente tolerante:  $\text{media de APTI} < APTI < \text{media de APTI} + \text{SD}$ . **iii)** Intermedio:  $\text{media de APTI} - \text{SD} < APTI < \text{media de APTI}$ . **iv)** Sensible:  $APTI < \text{media de APTI} - \text{SD}$ . Se calculó por separado la media de APTI y con su desviación estándar para las especies árboles.

#### 6.4. Registro del Índice de rendimiento anticipado

Con el APTI determinado para cada especie, se registraron las características biológicas y socioeconómicas (Tabla 3) asignándoles una puntuación con un valor máximo de 16 puntos. Estas evaluaciones se llevaron a cabo siguiendo las referencias proporcionadas por: *i*) Árboles y arbustos para ciudades de Chacalo et al., 2009, y *ii*) Árboles y áreas verdes urbanas de la Ciudad de México y su zona metropolitana de González y Lezama, 2008. Posteriormente, utilizando la puntuación obtenida en la Tabla 3, se aplicó la ecuación (8) para calcular el rendimiento anticipado de las especies, clasificándolas en categorías como mejores, excelentes, buenas, moderadas y malas (Goswami et al., 2022, p. 696; Shannigrahi\* et al., 2004, p. 131).

$$\% = \frac{\text{puntos obtenidos por la especie} \times 100}{\text{puntos máximo (16)}} \quad (8)$$

Los criterios específicos para esta clasificación se detallan en la Tabla 5 (Shannigrahi\* et al., 2004, p. 130)

**Tabla 5**

*Porcentaje obtenido de las categorías*

<b>% Porcentaje</b>	<b>Categoría obtenida de la especie</b>
Menos de 30	No Recomendada
31 – 40	Muy Pobre
41 – 50	Pobre
51 – 60	Moderado
61 – 70	Bien
71 – 80	Muy Bien
81 – 90	Excelente
91 – 100	Mejor

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Contenido Relativo de agua

En el bosque de Chapultepec, se registró un 96.86% de CRA en *Cupressus lusitánica*, mientras la mínima fue para *Fraxinus uhdei*, con un 41.10%, en las estaciones de primavera y verano, respectivamente (Figura 15). *Fraxinus uhdei* experimentó un aumento del 108.12% en otoño y un 127.28% en primavera, en comparación con los registros del verano, *Cupressus lusitánica*, y *Eucalyptus camaldulensis* incrementaron las reservas de agua en 28.17% y 5.74% en otoño, a un 52.46% y 15.70% para primavera respectivamente, en relación con el periodo estival.

En el bosque de Nativitas el CRA presentó estacionalmente diferencias, exhibiendo un cambio del 3.97% al 14.80% desde el otoño hasta la primavera en *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitánica* y *Eucalyptus camaldulensis*. En contraste, *Jacaranda mimosifolia* y *Taxodium mucronatum* experimentaron una disminución del 9.94% y 5.52%, respectivamente, durante el mismo periodo. Por otro lado, el bosque de Tlalpan mostró valores altos de CRA, *Ficus benjamina* destacó como la especie con el mayor (80.97%), contenido relativo de agua, mientras que *Fraxinus uhdei* arrojó el menor porcentaje con un 54.75%.

Comparando CRA entre bosques, se observa que *Eucalyptus camaldulensis* (5.62%), *Cupressus lusitanica* (3.40%), *Ficus benjamina* (6.50%), *Fraxinus uhdei* (33.20%) y *Quercus rugosa* (1.31%) experimentaron variaciones, con un aumento general y una disminución específica en *Cupressus lusitanica* del 11.27% en Tlalpan en comparación con Chapultepec.

En la comparación entre los bosques de Chapultepec y Nativitas durante el otoño, se registró una disminución del 12.92% en *Cupressus lusitanica*, un 16.39% en *Eucalyptus camaldulensis*, y un 4.58% en *Fraxinus uhdei*. En contraste, se observó un crecimiento del 22.10%

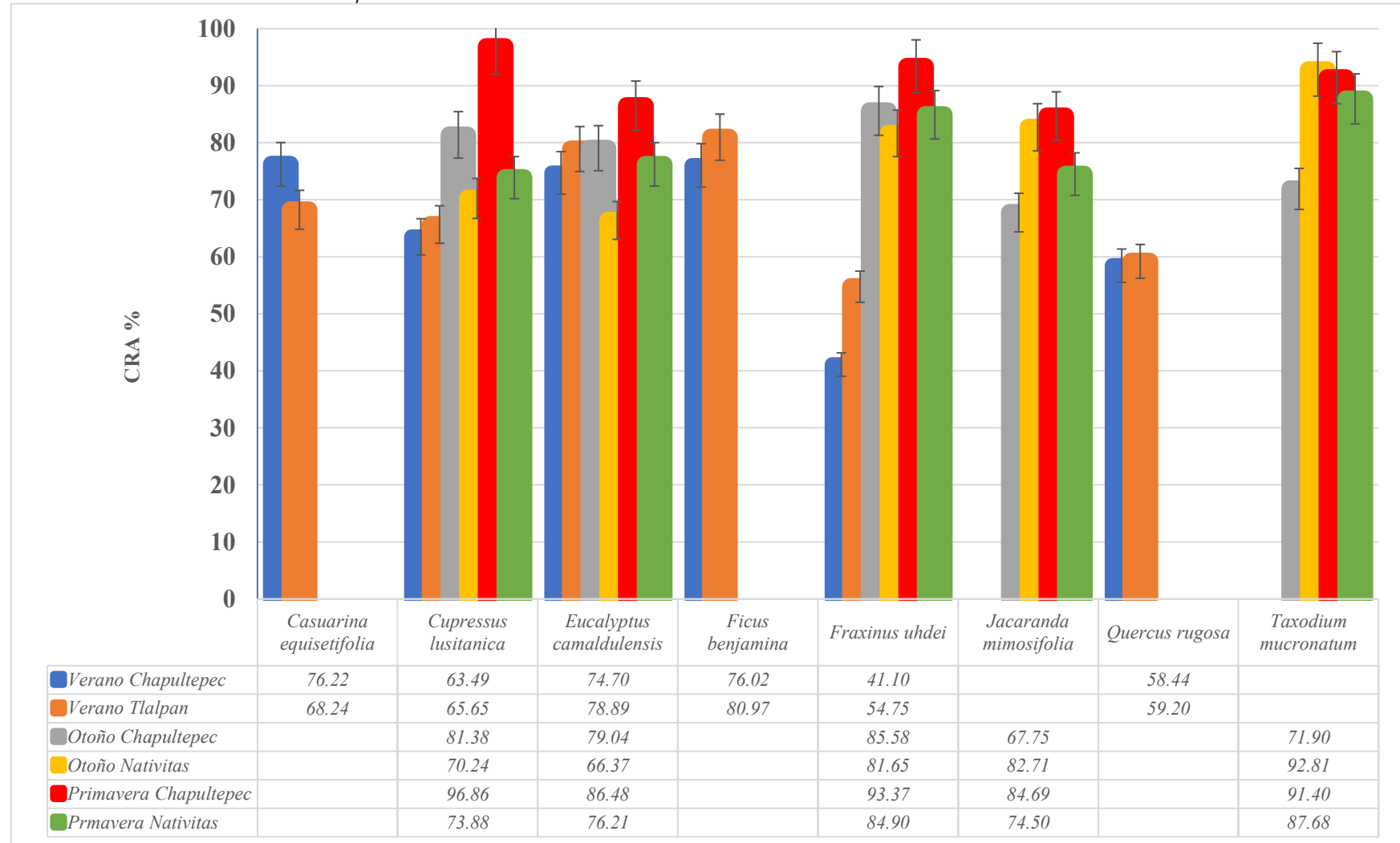
y 29.12% para *Jacaranda mimosifolia* y *Taxodium mucronatum* en Nativitas en comparación con Chapultepec.

Watson & Bai, (2021) encontraron que el CRA fue la única característica significativa que mostró una disparidad general durante los meses de monzón y premonzón, ya que, durante el monzón, el CRA aumentó en todas las plantas analizadas en comparación con el premonzón. Contrariamente, a los resultados de esta investigación que indican que los niveles de CRA fueron menores en el periodo húmedo (verano), lo cual puede atribuirse al riego asistido, descartando así un comportamiento natural ante las variaciones estacionales.

La transpiración estomática es un factor de relevancia en la Ciudad de México, dado que las moléculas de agua desempeñan un papel fundamental en la purificación del aire al eliminar gases y partículas. Según la publicación de Larcher de 1997, el contenido de vapor de agua en el interior de la hoja y en la atmósfera se ve restringido por diversos factores, incluyendo la resistencia en la capa límite, las características de la superficie foliar (como su tamaño, forma y estado), el intercambio de CO<sub>2</sub> y la fuerza del viento. Los filocladios “hojas de menor tamaño” (*Casuarina equisetifolia*), presentan resistencias estomáticas que generalmente no superan 1 scm<sup>-1</sup>, en contraste con las hojas de mayor superficie, que pueden llegar a 3 scm<sup>-1</sup>. En el caso de los árboles de hoja caduca, su resistencia estomática tiende a oscilar entre 0.8 y 1.2 scm<sup>-1</sup>. Por otro lado, los árboles perennes de hoja planifolia en regiones secas, exhiben valores más altos, un rango de 3 a 5 scm<sup>-1</sup>. Las hojas aciculares presentan un tapón de cera en el ostiolo de sus estomas, lo que añade una capa adicional de resistencia a la transpiración. Esto conlleva una reducción significativa en la liberación de vapor de agua, disminuyendo en aproximadamente un tercio la pérdida de agua (Nowak et al., 2006, p. 116).

**Figura 15**

*Promedios estacionales del CRA en 8 especies arbóreas*



La capacidad de las plantas para resistir el estrés causado por la sequía y mantener su equilibrio fisiológico depende de las reservas parciales destinadas a procesos como la fotosíntesis, el crecimiento, la respiración, la transpiración y otros procesos metabólicos (Rai y Panda, 2014, p. 98). Uno de los factores clave para la tolerancia a la sequía es la permeabilidad celular (Shojaee Barjoe et al., 2023, p. 16). En particular, se ha observado que a medida que aumentan las reservas de agua en las plantas, su capacidad para resistir el estrés hídrico y mantener su nivel de tolerancia se incrementa.

Se profundizó en el parámetro del contenido relativo de agua de árboles como *C. lusitánica*, *E. camaldulensis*, *F. uhdei*. Estos resultados son considerados importantes para la actualización de la plantación en los bosques de Chapultepec, Tlalpan y Nativitas.

### 7.1. pH de la hoja

La acidez (pH) de las hojas de las especies del bosque de Chapultepec (Figura 16), tuvieron una magnitud ligeramente ácida, pH=4.81 a 6.09; excepto *Taxodium macrunatum* (3.56) siendo ácida en el otoño y *Ficus benjamina* (7.91) ligeramente alcalino en el verano. *Crupessus lusitanica* y *Fraxinus uhdei* son más ácidas en otoño, y menos en primavera, mostrando un aumento en el pH respecto al verano. *Eucalyptus camaldulensis* hubo una disminución en el pH tanto en otoño y primavera en comparación de estación veraniega.

En el bosque de Nativitas la especie cercana a la neutralidad fue *Fraxinus uhdei* con 6.13 y *Taxodium mucronatum* la más ácida con 3.51. Comparando por estación, todas las especies fueron más ácidas en otoño que en primavera. En el bosque de Tlalpan se registró la especie más alcalina en relación a los otros bosques; fue *Ficus benjamina* con 8.21 y *Fraxinus uhdei* se ha cerca a la neutralidad, las especies restantes oscilaron entre 5.85 a 6.90 de pH. En este sentido Das et al.

(2010) publicó que la acidez de las hojas se debe al SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y el CO<sub>2</sub>, que se difunden al interior de la célula y se convierten ácidos (p. 565).

Otros autores, refieren que la acidez de las especies de Irán (Shojaee Barjoe et al., 2023) como: *E. camaldulensis* el pH es de 5.73 (p. 16); en Egipto (Elawa et al., 2021) el *E. camaldulensis* (5.95), *F. benjamina* (6.88) y *C. equitesifolia* (5.95) son ligeramente ácidos por las fábricas de cemento. En zonas alejadas de contaminación industrial, los niveles se encuentran en la neutralidad 7.48, 7.60 y 7.25, respectivamente (p. 187). Los resultados expuestos se atribuyen a la deposición de partículas y gases sobre la superficie de las hojas. La exposición a SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> disminuyen el pH del extracto de la hoja, mediante la formación de ácido sulfuroso y ácido nítrico; con el agua del tejido.

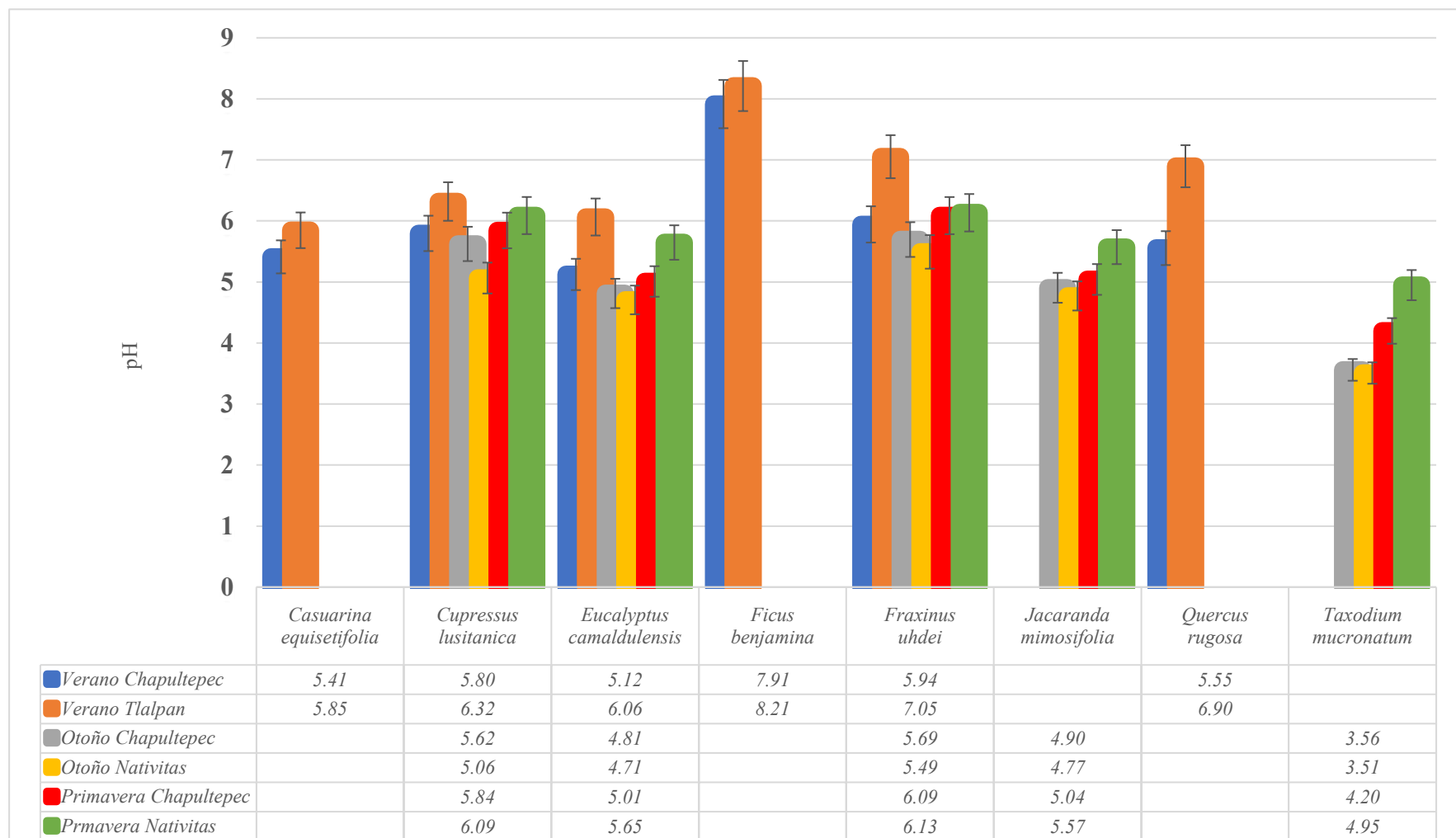
Correa-Ochoa et al., (2022) en Medellín, Colombia midieron el pH (5.09, 6.03, 6.00 y 6.08) en *F. uhdei* en cuatro zonas y *J. mimosifolia* (4.50, 5.43, 5.18, 4.85) siendo el primer valor la zona menos contaminada y el ultimo valor el más contaminado. Aseveraron que había zonas menos contaminadas, con más acidez se caracteriza por una alta biodiversidad, de modo que para los árboles que crecen en esta área, compiten por el recurso luz, y afecta la capacidad fotosintética.

En Arabia Saudita (Alotaibi et al., 2020) determinaron en *E. camaldulensis* que la acidez no varía (5.14), vs la zona control y la más contaminada (5.17). En estas condiciones, las plantas cierran las estomas para mantener sin alteración su acidez, las tolerantes tienen un pH más alcalino.



**Figura 16**

*Promedios estacionales de pH en ocho especies arbóreas*



Nota. En otoño se registraron los niveles más ácidos foliares, se explican debido a la inversión térmica que atrapan los contaminantes cerca de la superficie y dan lugar a concentraciones altas de contaminantes. En verano se determinó niveles neutros a alcalino ya que las lluvias son más frecuentes, lo que ayuda a limpiar el aire lavando las partículas y compuestos gaseosos. De igual forma la temperatura es más cálida, lo que puede aumentar la dispersión de contaminantes. Sin embargo, en los días soleados y cálidos, la formación de ozono troposférico es un problema en la cuenca del Valle de México, debido a las emisiones de precursores del O<sub>3</sub>, como son los NO<sub>x</sub> y COVs.

### 7.1. Contenido Total de Clorofila

En el bosque de Chapultepec, se registraron niveles altos en el contenido total de clorofila durante la primavera, el máximo fue para *Cupressus lusitanica* (31.20 mg/g), en contraste, la misma especie exhibió la concentración más baja en el estío con 0.10 mg/g (Figura 17). Tanto *Eucalyptus camaldulensis* como *Fraxinus uhdei*, experimentaron descensos del 58.72% y 36.47% en sus contenidos en el otoño, respectivamente. Aumentando del 168.19% y 119.53% en primavera, hacia el verano. Sin embargo, *Cupressus lusitanica* presentó un alza del 810% en otoño y un incremento del 31,100% en primavera en comparación con los niveles registrados en verano.

En Nativitas la concentración más alta (40.70 mg/g) fue para *Eucalyptus camaldulensis* en primavera, e igual que Chapultepec, *Cupressus lusitanica* obtuvo el valor más bajo con 3.46 mg/g. Un aumento en la clorofila se registró de primavera para el otoño, con las especies *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus camaldulensis* y *Jacaranda mimosifolia*, 207.5%, 64.66% y 115.94% respectivamente. En caso contrario hubo una disminución de 11.67% para *Fraxinus uhdei* y de 15.57% en *Jacaranda mimosifolia* en primavera para el otoño. En el bosque de Tlalpan *Eucalyptus camaldulensis* registro la mayor concentración con 23.92 mg/g, y la menor fue de 0.87 mg/g para *Casuarina equisetifolia*.

Considerando al bosque de Chapultepec como punto de referencia, se observan variaciones en el bosque de Tlalpan. *Casuarina equisetifolia* fue la única especie que experimentó una marcada disminución del 92.98%. En cambio, *Cupressus lusitanica* (11,740%), *Eucalyptus camaldulensis* (115.32%), *Ficus benjamina* (17.83%), *Fraxinus uhdei* (387.29%) y *Quercus rugosa* con un 95.24%, mostraron un aumento en la misma zona.

En Nativitas, durante el otoño, *Cupressus lusitanica* (279.12%), *Eucalyptus camaldulensis* (436.52%), *Fraxinus uhdei* (190.71%), *Jacaranda mimosifolia* (106.89%) y *Taxodium*

*mucronatum* (821.79%) exhibieron concentraciones superiores en comparación con Chapultepec. En primavera, *Cupressus lusitanica* (65.64%), *Fraxinus uhdei* (25.02%) y *Taxodium mucronatum* (35.57%) experimentaron una disminución, mientras que *Eucalyptus camaldulensis* (36.28%) y *Jacaranda mimosifolia* (76.71%) mostraron un aumento en comparación con el bosque de Chapultepec hacia el bosque de Nativitas.

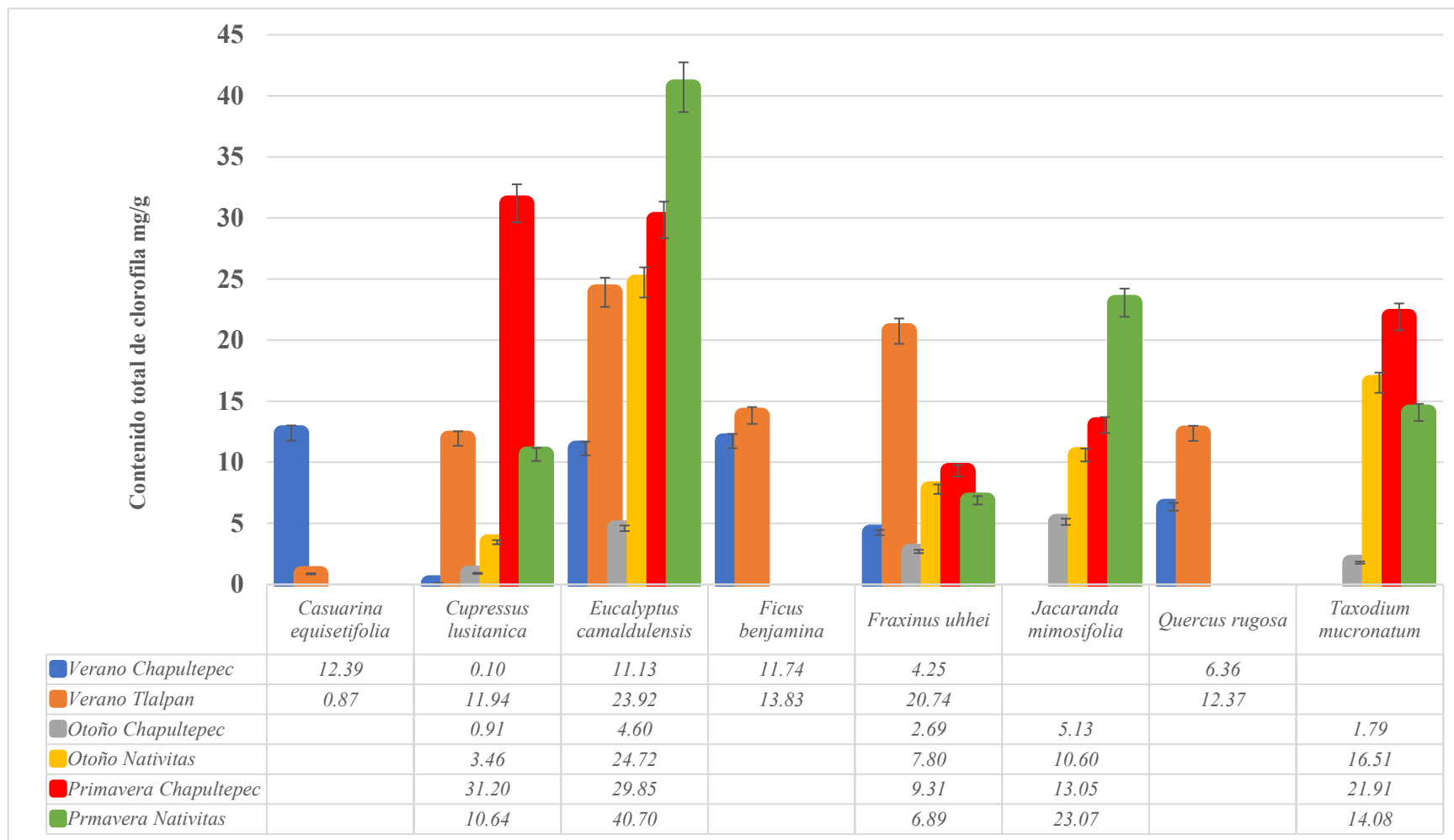
En el reporte de Barjoe et al., (2023, p. 18) con el *E. camaldulensis* obtuvo la cantidad de 2.12 mg/g, similar a lo reportado por Elawa et al., (2021) con valores promedio de clorofila de  $1.31 \pm 0.001$ ,  $2.18 \pm 0.004$  y  $2.11 \pm 0.021$  ( $\text{mg g}^{-1}$  de peso fresco) en *F. benjamina*, *C. equisetifolia*, *E. camaldulensis* en los sitios contaminados. Los valores de clorofila en los sitios de referencia fueron más altos que el de los sitios contaminados, pero no fueron significativamente diferentes a  $p < 0.05$ , excepto para *C. equisetifolia* (2.59 mg/g). Los pigmentos fotosintéticos son los más propensos a dañarse por oxidación, reducción y decoloración reversible de los contaminantes gaseosos y de partículas.

Correa-Ochoa et al., (2022) determinó que las especies como *J. mimosifolia* y *F. uhdei*, son bajas en concentraciones de clorofila en las zonas más contaminadas 2.21 mg/g y 1.59, respectivamente, en la estación con el nivel más bajo de contaminación las concentraciones fueron 5.65 mg/g y 5.97 mg/g, lo que demuestra su potencial como bioindicadores.

Cuando el volumen de contaminantes atmosféricos es elevado, las moléculas de clorofila pueden degradarse a feofitina, ya que dos átomos de hidrógeno reemplazan a los iones de  $\text{Mg}^{++}$ . La eficiencia de los cloroplastos se ve reducida por la contaminación del aire; por lo tanto, se ven afectadas la tasa de fotosíntesis y la conductancia de las estomas. Además, las hojas caen prematuramente y se observa una disminución en la productividad (Alotaibi et al., 2020, p. 29164).

**Figura 17**

*Promedios estacionales de contenido total de clorofila en ocho especies arbóreas*



Nota. En la primavera, el contenido de clorofila aumento en los árboles debido al aumento de temperatura y a las horas de luz solar, las hojas de los árboles comienzan a brotar y se desarrollan nuevas hojas. El aumento de la luz solar y la disponibilidad de agua estimulan la producción de clorofila en las hojas. El verano, el contenido de clorofila se mantuvo alto en todas las especies exceptuando a *Cupressus* en Chapultepec, esto pudo verse afectado debido a la elección de hojas dañadas. En el otoño, decayó la clorofila, debido a la disponibilidad de luz y a que las temperaturas comienzan a descender, provocando que los árboles se preparen al reposo invernal.

Elawa et al., 2021 menciona que la disminución en la concentración de clorofila y la actividad fotosintética se atribuye al bloqueo de los poros estomáticos causado por las PMs. Este bloqueo conlleva a una reducción en la absorción de CO<sub>2</sub> y la liberación de oxígeno, impactando la fotosíntesis, además, este escenario estimula la producción de clorofilasa, una enzima que descompone la clorofila. Los árboles con niveles más elevados de clorofila tienden a mostrar una mayor tolerancia a los contaminantes. Sin embargo, es necesario considerar que la cantidad de clorofila puede variar según la edad de la hoja, la especie de la planta, el nivel de contaminación en el área y factores climáticos como la temperatura y la luminosidad solar (p. 189).

### 7.1. Ácido Ascórbico

La mayor concentración de AA en *C. lusitanica* (9.89 mg/g) durante el verano, mientras la más baja con 3.23 mg/g (Figura 18, pag. 53) se observó en *Fraxinus udhei* en otoño. El bosque de Chapultepec presentó en *Cupressus lusitanica* y *Fraxinus uhdei* una disminución en el contenido de ácido ascórbico de 58.93% y 60.16% durante el otoño y de 44.23% y 1.35% en primavera, respectivamente, en el periodo estival. Contrariamente a lo que se registró en *Eucalyptus camaldulensis* que obtuvo un alza de AA de 13.49% en otoño y un 19.44% en primavera en comparación con el verano. Para el bosque de Nativitas la cantidad máxima de AA se registró en *Eucalyptus camaldulensis* con 8.48 mg/g y la mínima en *Taxodium mucronatum* con una cantidad de 3.31 mg/g.

El contenido de AA aumentó un 17.21% en *Cupressus lusitanica* y 22.58% en *Fraxinus uhdei* en primavera en comparación con el otoño. Hubo también una disminución de 11.46% para *Eucalyptus camaldulensis*, en *Jacaranda mimosifolia* un 5.46% y por último un 67.12% en

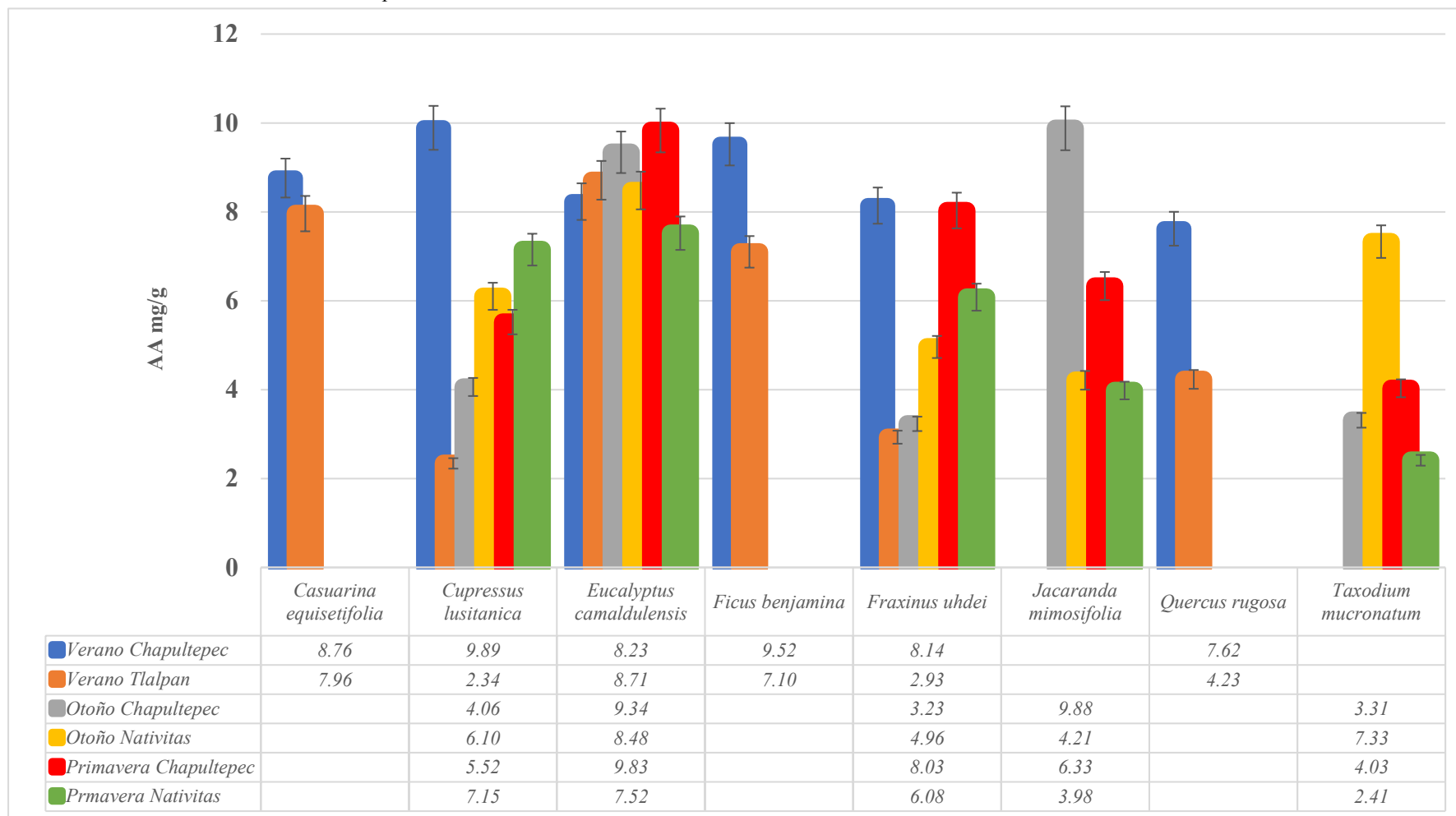
*Taxodium mucronatum* en el mismo periodo. En el bosque de Tlalpan la mayor cantidad fue para *Eucalyptus camaldulensis* (8.23 mg/g) y la menor fue en *Cupressus lusitanica* con 2.34 mg/g.

Utilizando el bosque de Chapultepec como referencia, se observan variaciones concentración de AA en los otros bosques. En Tlalpan, *Casuarina equisetifolia* (9.13%), *Cupressus lusitanica* (76.26%), *Ficus benjamina* (25.42%), *Fraxinus uhdei* (64.06%) y *Quercus rugosa* (44.83%) experimentaron una disminución, siendo *Eucalyptus camaldulensis* (5.83%) la única especie que mostró un aumento en comparación con Chapultepec.

En otoño en el bosque Bosque de Chapultepec, *Cupressus lusitanica* (50.25%), *Fraxinus uhdei* (53.57%) y *Taxodium mucromatum* (121.45%) indicaron un aumento en la concentración de AA. *Jacaranda mimosifolia* (57.35%) y *Eucalyptus camaldulensis* (8.76%) experimentaron una disminución con el bosque de Nativitas. En primavera, *Eucalyptus camaldulensis* (30.29%), *Fraxinus uhdei* (24.31%), *Jacaranda mimosifolia* (37.15%) y *Taxodium mucromatum* (40.20%) mostraron una disminución, mientras que *Cupressus lusitanica* aumentó significativamente con un 29.53% en el bosque Chapultepec en comparación con Nativitas.

**Figura 18**

*Promedios estacionales de AA en ocho especies arbóreas*



Nota. **Las variaciones en la concentración** de Ácido Ascórbico en los bosques estudiados se deben a exposición de luz, nutrimentos en el suelo, aire limpio, y disponibilidad de agua y la exposición a factores estresantes ambientales. Durante la primavera y el verano, el crecimiento y desarrollo activo de las plantas puede aumentar la producción de AA. Así como las interacciones con otros organismos, como la presencia de patógenos o herbívoros, pueden influir en la cantidad de AA como parte de su respuesta de defensa.

En comparación Alotaibi et al. (2020) identificó los niveles más elevados de ácido ascórbico (AA) en *Eucalyptus camaldulensis*, alcanzando 7.38 mg/g. Por su parte, Correa-Ochoa et al. (2022) proporcionó detalles sobre los niveles de AA en *Jacaranda mimosifolia* y *Fraxinus uhdei*, que variaron de 2.36 a 2.55 y de 1.16 a 2.05, respectivamente, en orden ascendente de contaminación ambiental.

La forma antioxidante del AA es esencial para proteger la membrana de la pared celular contra los daños causados por radicales libres, según Watson & Bai R (2021, p. 9983). Además, el AA tiene la capacidad de reducir los niveles de ozono y mitigar los daños en las paredes celulares. El aumento en los contenidos de AA en hojas recolectadas en áreas contaminadas refleja la respuesta de tolerancia de las especies de árboles ante los elevados niveles de contaminación atmosférica en su entorno de crecimiento (Alotaibi et al., 2020, p. 29163).

Esta capacidad de tolerancia se atribuye a la resistencia contra la contaminación por SO<sub>2</sub>, ya que el AA actúa como un antioxidante potente que mantiene la estabilidad de la división celular y las membranas celulares en condiciones adversas. Los antioxidantes, al eliminar los radicales libres citotóxicos y las especies reactivas de oxígeno generadas por la fotooxidación de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>, juegan un papel crucial en la protección de las plantas.

La función fisiológica del AA como antioxidante aumenta la resistencia de las plantas a la contaminación, según estudios previos (Prajapati y Tripathi, 2008, p. 1346; Sahu et al., 2020, p. 6). Niveles más altos de ácido ascórbico en las hojas contribuyen a proteger las membranas tilacoidales de daños oxidativos (Sahu y Kumar, 2015, p. 37).



## 7.2. Índice de Tolerancia a la Contaminación de Aire

El APTI alcanzó un nivel máximo en *Eucalyptus camaldulensis* con 44.42, para la primavera del Bosque de Chapultepec, en contraste, *Taxodium mucronatum* presentó el valor más bajo, con 8.45 (Figura 19). *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus camaldulensis* y *Fraxinus uhdei* experimentaron una disminución del 13.93%, 10.07% y 11.16% en el otoño, le siguió un aumento del 151.64%, 121.39% y 75.95% en primavera, vs el verano, respectivamente.

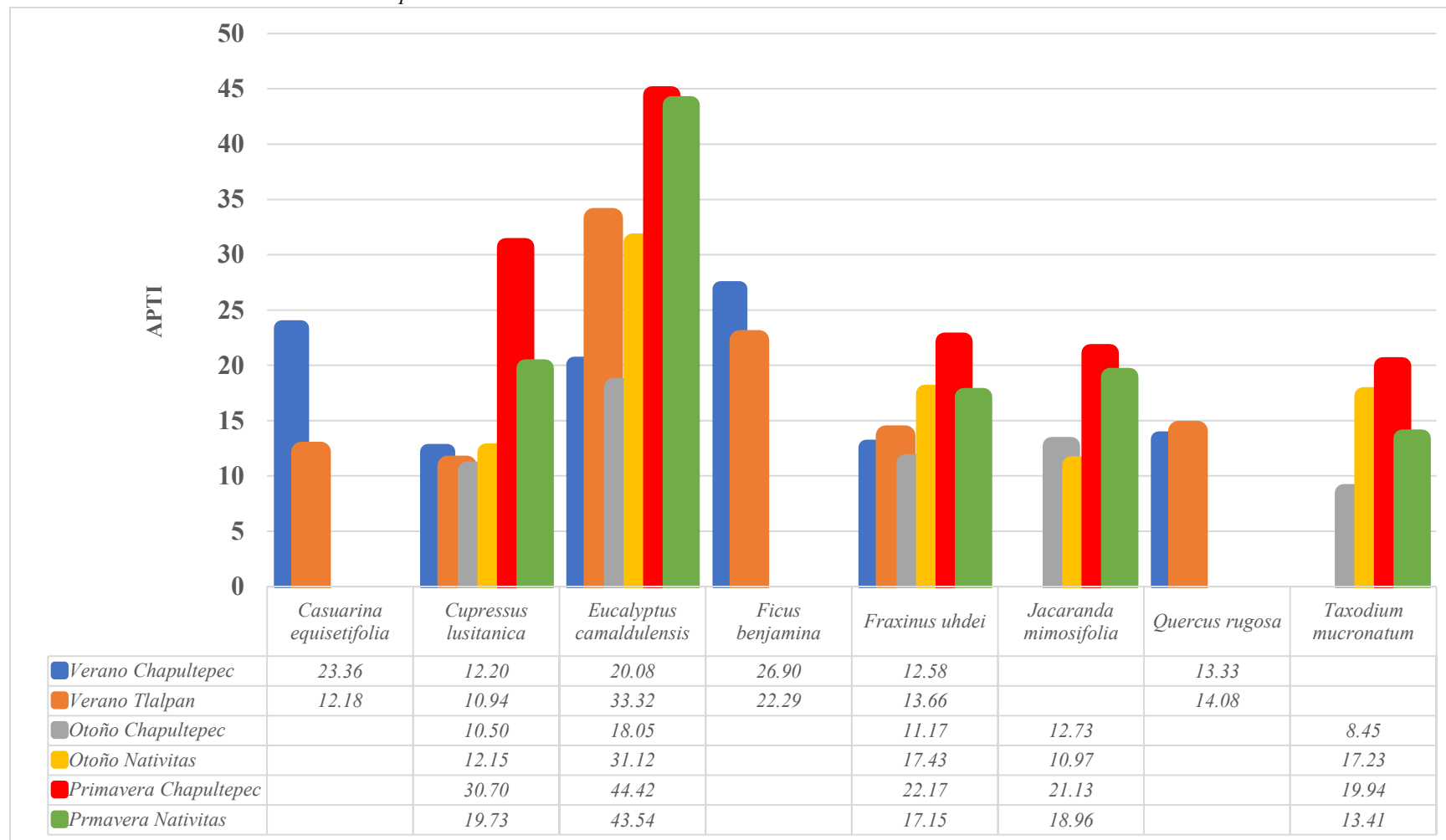
En el Bosque de Nativitas (Figura 19), la puntuación más alta se registró en *Eucalyptus camaldulensis* (43.54), la más baja fue para *Jacaranda mimosifolia* (10.97). *Cupressus lusitanica* aumento de primavera a otoño, 62.19%, *Eucalyptus camaldulensis* del 39.93%, y *Jacaranda mimosifolia* del 73.01%. El APTI disminuyó un 1.61% en *Fraxinus uhdei* y un 21.98% en *Taxodium mucronatum* durante la primavera en comparación con otoño. En el Bosque de Tlalpan, el mayor fue para *Eucalyptus camaldulensis* (33.32) y el menor, *Cupressus lusitanica* con 10.94.

Los procesos morfológicos y fisiológicos de los árboles que ocurren durante las estaciones son para superar las condiciones ambientales de estrés, aunadas a la contaminación (Karmakar y Padhy, 2019; Shakeel et al., 2022). Los resultados presentados en la investigación se apoyan con los estudios realizados por Anake et al. (2022), Chaudhuri y Kumar (2022), Mandal y Dhal (2022) y Mondal y Singh (2022); **mayor es el APTI registrado en las áreas con mayor contaminación.**

El APTI (Figura 20) de *Cupressus lusitanica* disminuyó del 42.81% (Tlalpan), al 17.32% en (Nativitas), quedando en medio el cedro de Chapultepec (30.70%). En cambio, *Eucalyptus camaldulensis* aumento del 13.38% (Tlalpan), al 25.70% (Nativitas) y 44.42% para Cahpultepec. El *Fraxinus uhdei* de Chapultepec (22.17%) disminuyó al 14.23% (Tlalpan) y al 7.47% en (Nativitas). Sin embargo, los registros por cada especie (las comunes) de cada bosque, se analizaron a través de una correlación de Pearson buscando más allá de los datos.

**Figura 19**

*Promedios estacionales de APTI en ocho especies arbóreas*



Nota. En la primavera, el valor de APTI tiende a aumentar, debido a los procesos fisiológicos que presentan las especies como son los brotes y crecimiento de hojas nuevas provocando un alza en el contenido de clorofila como de Ácido Ascórbico. En verano y en otoño estas producciones empiezan a estabilizarse, aunado a la exposición continua a contaminantes a lo largo del tiempo puede tener efectos acumulativos en la salud de las hojas. Lo sugerido es que con el tiempo de exposición constante la disminución del APTI sea lo menos posible.

Para las especies que se encuentran en Chapultepec y Tlalpan (Figura 20), la disminución, alcanzó el 47.95% en *Casuarina equisetifolia* y para *Ficus benjamina* un 17.17%. Por otro lado, *Quercus rugosa*, aumento del 5.64% (Tlalpan) en relación con Chapultepec (13.43%). Finalmente, en el caso de las especies de Chapultepec y Nativitas, no se tuvo registro; una disminución se registró para *Jacaranda mimosifolia* del 12.73% al 10.97%, respectivamente, y un aumento del 8.45% al 18.90% con *Taxodium macrunatum* de Chapultepec.

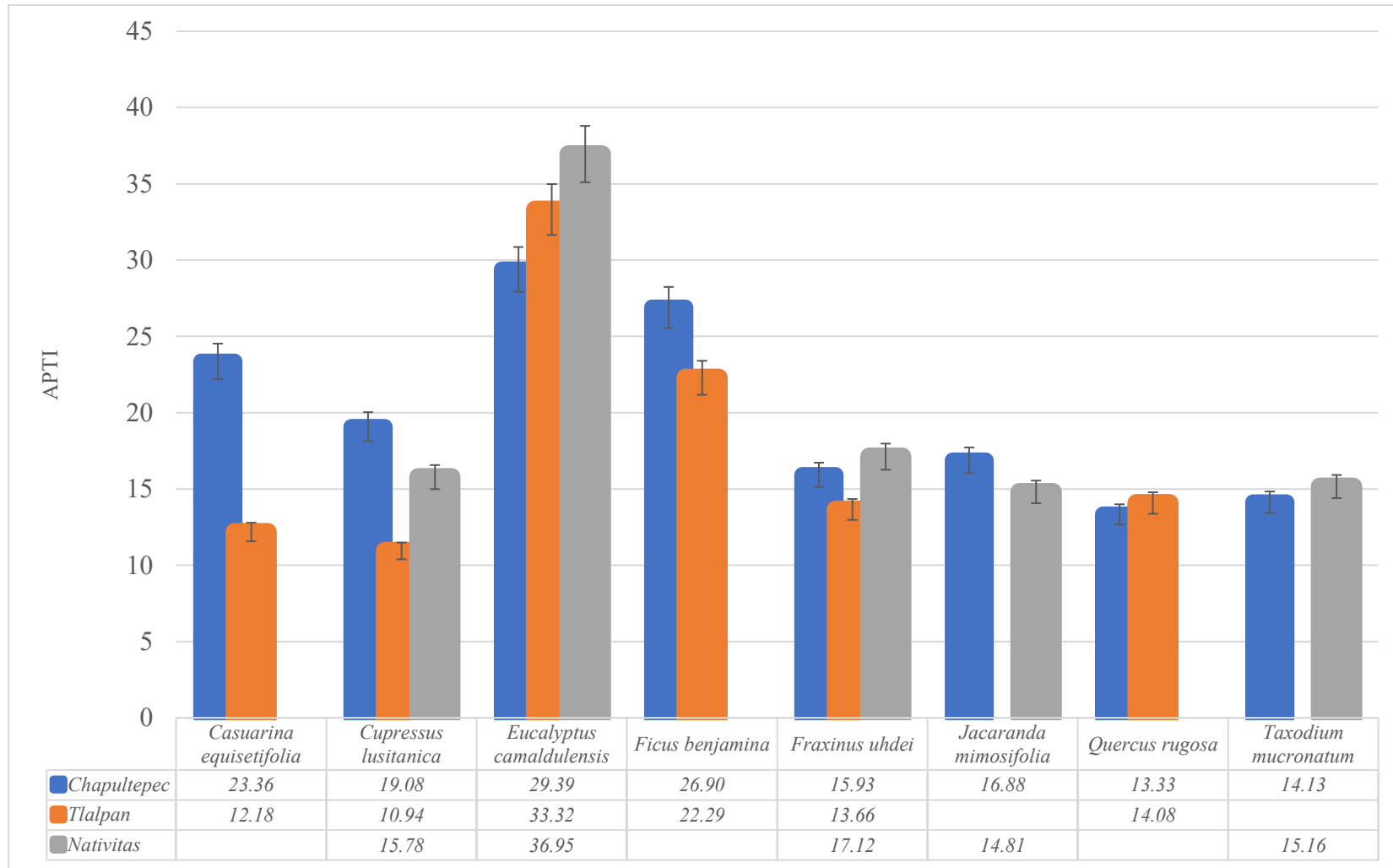
Elawa et al., (2021) reportó el APTI de *C. equisetifolia*, *E. camaldulensis* y *F. benjamina* de las Gobernaciones de Sharkeya y de Giza en Egipto, los cuales se ponen a consideración con una diferencia en el APTI, así *C. equisetifolia*, osciló de 8.52 a 10.94, en *E. camaldulensis* de 9.03 a 10.17 y *F. benjamina* de 8.38 a 10.53, de ahí la importancia de aplicar el APTI, para cada zona de estudio, debido a la adaptación y el ambiente que tiene cada especie al lugar.

El valor de APTI correlaciona (Tabla 6 y 7) con la acidez (pH) y con la turgencia (CRA); ésta su vez con clorofila, empero el AA con el APTI, según P-valúe. Entonces el supuesto ***los parámetros bioquímicos están regulados por el metabolismo del árbol***, “administrando” la meteorología (radiación, temperatura del aire, concentración de contaminantes, partículas sólidas, líquidas y gases, humedad relativa) ambiental. Demostrando con la fórmula, que la resistencia de las especies se debe a la producción de la clorofila y del AA ( $R^2 = 0.7682$ ,  $P < 0.0000$ ).

En la CDMX durante el tiempo seco cálido (primavera), se intensifica la luz y con ello, el crecimiento de hojas nuevas, por lo que en los poros estomáticos absorben las partículas. Este ambiente facilita un intercambio más eficiente de gases y vapor de agua entre el árbol y la atmósfera, eliminando así una fuente potencial de estrés para los árboles, contribuye al fortalecimiento de la capacidad de las especies para tolerar la contaminación atmosférica, como se refleja en el aumento del APTI durante la primavera.

**Figura 20**

Promedio de los valores de APTI tomando los resultados obtenidos de verano, otoño 2021 y primavera de 2022 de los Bosques de Chapultepec, Nativitas y Tlalpan



**Tabla 6**

*Correlación general*

	<b>pH</b>	<b>CRA</b>	<b>CHTOT</b>	<b>AA</b>	<b>APTI</b>
<b>pH</b>		-0.1587 (1188)	-0.0376 (1170)	0.0162 (1188)	0.0839 (1188)
		<b>0.0000</b>	0.1982 (1170)	<b>0.5771</b> (1188)	<b>0.0037</b> (1188)
<b>CRA</b>	-0.1587 (1188)		0.1299 (1170)	-0.0328 (1188)	0.1796 (1188)
	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>	0.2582 (1170)	<b>0.0000</b> (1170)
<b>CHTOT</b>	-0.0376 (1170)	0.1299 (1170)		0.0301 (1170)	<b>0.7682</b> (1170)
	0.1982 (1188)	<b>0.0000</b> (1188)		0.3038 (1170)	<b>0.0000</b> (1188)
<b>AA</b>	0.0162 (1188)	-0.0328 (1188)	0.0301 (1170)		<b>0.5166</b> (1188)
	0.5771 (1188)	0.2582 (1188)	0.3038 (1170)		<b>0.0000</b> (1188)
<b>APTI</b>	0.0839 (1188)	0.1796 (1188)	<b>0.7682</b> (1170)	<b>0.5166</b> (1188)	
	<b>0.0037</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	

Se muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de parámetros APTI. Se mide la fuerza de la **relación lineal entre ellas**. También se muestra, paréntesis, el número de pares de datos para calcular cada coeficiente. El valor-P es la prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores -P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. El supuesto es que existe una relación lineal entre las variables.

**Tabla 7**

*Correlaciones Parciales*

	<b>pH</b>	<b>CRA</b>	<b>CHTOT</b>	<b>AA</b>	<b>APTI</b>
<b>pH</b>		-0.2312 (1188)	-0.2804 (1170)	-0.2371 (1188)	0.3063 (1188)
		<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
<b>CRA</b>	-0.2312 (1188)		-0.2078 (1170)	-0.2553 (1188)	0.2954 (1188)
	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
<b>CHTOT</b>	-0.2804 (1170)	-0.2078 (1170)		<b>-0.6993</b> (1170)	<b>0.8902</b> (1170)
	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
<b>AA</b>	-0.2371 (1188)	-0.2553 (1188)	-0.6993 (1170)		<b>0.7963</b> (1188)
	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>
<b>APTI</b>	0.3063 (1188)	0.2954 (1188)	0.8902 (1170)	0.7963 (1188)	
	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	

Las correlaciones parciales miden la fuerza de la relación lineal entre las variables, considerando primero el ajuste por su relación con las otras variables de la tabla. Que tan útil es una variable para mejorar las predicciones de la segunda, dada la información del resto de variables consideradas. El valor-P prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican significancias diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores -P por debajo de 0.05: pH y CRA, pH con CHTOT, AA y APTI. CRA con CHTOT, AA, y APTI. Finalmente, CHTOT, AA con APTI. El supuesto es que existe una relación lineal entre las variables.

### 7.3. Categorización del Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire

La categorización del APTI se calculó de acuerdo a la sección 3.3.5. del método. El valor promedio general del APTI para el bosque de Chapultepec fue de 19.87, y su SD de 6.0; para el bosque de Nativitas 19.96 , 9.53 y del bosque de Tlalpan 17.74 , 8.61 respectivamente.

Para los bosques de Chapultepec, Nativitas y Tlalpan hubo diferencias de clasificación ya que el rango para los cuatro encasillados se amplió usando el criterio propuesto Liu y Ding, (2008), debido a que la categorización de Singh de 1991 es propiamente para India.

Las categorías para el bosque de Chapultepec se muestran en la Tabla 8, para *C. equisetifolia* el criterio de Singh es colocada en especies Tolerante y para Liu y Ding es “Moderadamente Tolerante”, así como *C. lusitanica* y *Jacaranda mimosifolia* que fueron “Moderadamente Tolerantes” a ser “Intermedios” y por último *T. mucronatum* que pasó de “Intermedio” a “Sensible” respectivamente. Mientras otras especies no hubo cambio en su categoría en las dos escalas estas fueron *E. camaldulensis* y *F. benjamina*, como Tolerantes, *F. uhdei* y *Q. rugosa* fueron “Intermedios”.

**Tabla 8**

Clasificación de APTI para las especies del bosque de Chapultepec

Especies	Singh et al., (1991)	Liu y Ding (2008)
<i>C. equisetifolia</i>	T	MT
<i>C. lusitanica</i>	MT	I
<i>E. camaldulensis</i>	T	T
<i>F. benjamina</i>	T	T
<i>F. uhdei</i>	I	I
<i>J. mimosifolia</i>	MT	I
<i>Q. rugosa</i>	I	I
<i>T. macrumatum</i>	I	S

Nota. Categoría por el criterio de Singh: **T**;  $\geq 21$ , **MT**; 20 -17, **I**; 16 – 13 y **S**;  $\leq 12$ .

Categoría por el método de Liu y Ding del 2008: **T**;  $\geq 25.89$ , **MT**; 25.87-19.88, **I**; 19.87 – 13.90 y **S**;  $\leq 13.89$ .

Para el bosque de Nativitas (Tabla 9), *E. camaldulensis*, fue “Tolerante”, así como *C. lusitanica*, *Jacaranda mimosifolia* y *T. mucronatum* fueron categorizadas “Intermedias” para ambas escalas, en la única especie que cambio de categoría fue *F. uhdei* pasando de “Moderadamente Tolerante” por Singh e “Intermedia” para Liu y Ding.

**Tabla 9**

Clasificación de APTI para las especies del bosque de Nativitas

Especies	Singh et al., (1991)	Liu y Ding (2008)
<i>C. lusitanica</i>	I	I
<i>E. camaldulensis</i>	T	T
<i>F. uhdei</i>	MT	I
<i>J. mimosifolia</i>	I	I
<i>T. macrumatum</i>	I	I

Nota. Categoría por el criterio de Sinhg: **T**;  $\geq 21$ , **MT**; 20 -17, **I**; 16 – 13 y **S**;  $\leq 12$ .

Categoría por el método de Liu y Ding del 2008: **T**;  $\geq 29.49$ , **MT**; 29.48-19.97, **I**; 19.96 – 10.44 y **S**;  $\leq 10.43$ .

En la Tabla 10 para el bosque de Tlalpan. *E. camaldulensis*, se mantuvo como “Tolerante” como en los B. de Chapultepec y Nativitas, así para ambas escalas esto se mostro igual en *F. uhdei* y *Q. rugosa* que fueron “Intermedias”.Mientras *C. equisetifolia* y *C. lusitanica* pasaron de “Sensibles” para Singh e “Intermedios” en la escala de Liu y Ding, y por ultimo *F. benjamina* de ser “Tolerante” paso a “Moderadamente Tolerante”.

**Tabla 10**

Clasificación de APTI para las especies del bosque de Tlalpan

Especies	Singh et al., (1991)	Liu y Ding (2008)
<i>C. equisetifolia</i>	S	I
<i>C. lusitanica</i>	S	I
<i>E. camaldulensis</i>	T	T
<i>F. benjamina</i>	T	MT
<i>F. uhdei</i>	I	I
<i>Q. rugosa</i>	I	I

Nota. Categoría por el criterio de Sinhg: **T**;  $\geq 21$ , **MT**; 20 -17, **I**; 16 – 13 y **S**;  $\leq 12$ .

Categoría por el método de Liu y Ding del 2008: **T**;  $\geq 26.35$ , **MT**; 26.34-17.75, **I**; 17.74 – 9.14 y **S**;  $\leq 9.13$ .

---

El estudio llevado a cabo por Shrestha et al., (2021) en los valles de Nepal muestra que *Ficus benamina* tiene una puntuación de APTI más baja. Mientras que la misma especie ha sido reportada como una especie tolerante en Varanasi, India, según el estudio realizado por Pandey et al., (2015) y en este estudio donde en Chapultepec fue tolerante y en Tlalpan, moderadamente tolerante. lo que sugiere la dependencia de las puntuaciones y tendencias de APTI en los parámetros geográficos y por eso la importancia de la creación de una escala para cada zona de estudio.

#### 7.4. Índice de Rendimiento Anticipado

Estos resultados se derivan de un análisis de la Tabla 11, que proporciona información

**Figura 21**

*Hoja de Jacaranda mimosifolia*



sobre la clasificación de especies en el Bosque de Chapultepec. En particular, *C. Equisetifolia*, *E. camaldulensis*, *F. benamina* y *Q. rugosa* han demostrado un alto rendimiento y se han clasificado como "Buenos", mientras que recomiendan encarecidamente para su continuo cultivo en esta zona debido a su capacidad de tolerancia, densidad del dosel y naturaleza perenne. Estas cualidades son esenciales para la mitigación efectiva de contaminantes atmosféricos, como destacó Shannigrahi et al.,

(2004), p. 134.



Por otro lado, *J. mimosifolia* (Figura 21) y *T. mucronatum* se encuentran en la categoría de "moderadamente adecuadas". A pesar de su menor tolerancia, su valor estético justifica su consideración para futuras plantaciones. En contraste, *F. uhdei* no se recomienda para plantaciones posteriores debido a su bajo valor de API.

**Figura 22**

*Hoja de Eucalyptus camaldulensis*



En la Tabla 12, que presenta datos del bosque de Nativitas, observando que *C. lusitanica* y *E. camaldulensis* (Figura 22), han demostrado ser árboles adecuados, obteniendo una clasificación de "Buenos". *T. mucronatum* muestra un rendimiento moderado, aunque con un puntaje de tolerancia más alto en comparación con la categoría correspondiente al Bosque de Chapultepec. *F. uhdei* y *J. mimosifolia*, en cambio, exhiben un rendimiento pobre que desaconseja su recomendación en esta área específica.

**Tabla 11**

Tabla de valores para el API de las especies del bosque de las especies seleccionadas para el bosque de Chapultepec

Especies	APTI	Biología			Estructura laminar			V. económico	Total	%	Categoría
		Hábito	Dosel	Tipo	Tamaño	Textura	Dureza				
<i>C. equisetifolia</i>	+++++	++	-	+	+	-	+	+	11	68.75	B
<i>C. lusitánica</i>	++++	++	+	+	-	+	+	++	12	75	MB
<i>E. camaldulensis</i>	+++++	++	-	+	+	+	-	-	10	62.5	B
<i>F. benjamina</i>	+++++	+	++	+	+	+	-	-	11	68.75	B
<i>F. uhdei</i>	+++	++	-	-	+	-	-	+	7	43.75	P
<i>J. mimosifolia</i>	+++	++	+	-	+	-	-	+	8	50	M
<i>Q. rugosa</i>	++	++	+	+	+	+	+	+	10	62.5	B
<i>T. macrumatum</i>	++	++	+	-	+	-	-	++	8	50	M

**Tabla 12**

Tabla de valores para el Rendimiento Anticipado de las especies seleccionadas para el bosque de Nativitas

Especies	APTI	Biología			Estructura laminar			V. económico	Total	%	Categoría
		Hábito	Dosel	Tipo	Tamaño	Textura	Dureza				
<i>C. lusitánica</i>	++	++	+	+	-	+	+	++	11	62.5	B
<i>E. camaldulensis</i>	+++++	++	-	+	+	+	-	-	10	62.5	B
<i>F. uhdei</i>	+++	++	-	-	+	-	-	+	7	43.75	P
<i>J. mimosifolia</i>	++	++	+	-	+	-	-	+	7	43.75	P
<i>T. macrumatum</i>	+++	++	+	-	+	-	-	++	9	56.25	M

**Tabla 13**

Tabla de valores para el API de las especies del bosque de Tlalpan

Especies	APTI	Biología			Estructura laminar			V. económico	Total	%	Categoría
		Hábito	Dosel	Tipo	Tamaño	Textura	Dureza				
<i>C. equisetifolia</i>	++	++	-	+	+	-	+	+	8	50	M
<i>C. lusitánica</i>	++	++	+	+	-	+	+	++	10	62.5	B
<i>E. camaldulensis</i>	+++++	++	-	+	+	+	-	-	10	62.5	B
<i>F. benjamina</i>	+++++	+	++	+	+	+	-	-	11	68.75	B
<i>F. uhdei</i>	++	++	-	-	+	-	-	+	6	37.5	MP
<i>Q. rugosa</i>	++	++	+	+	+	+	+	+	10	62.5	B

Nota. Categoría otorgada por el criterio de Goswami, et al. 2022: No Recomendado (NR), Muy Pobre (MP), Pobre (P), Moderado (Mo), Bien (B), Muy Bien (MB), Excelente (E), Mejor (Me).

La Tabla 13, que aborda los datos del Bosque de Tlalpan, señala que los árboles con el mejor desempeño son *C. lusitanica*, *E. camaldulensis*, *F. benjamina* y *Q. rugosa*, todos clasificados como "Buenos". *C. equisetifolia* se posicionó como "moderada". Es importante destacar que en esta zona se ha registrado el valor más bajo de API entre todos los bosques, que corresponde a *F. uhdei* (Figura 23), catalogado como "Muy Pobre", esto se debe a su baja tolerancia y a las características de sus hojas, además de su naturaleza caduca.

**Figura 23**

*Hoja de Fraxinus uhdei*



Los resultados presentados en esta investigación destacan la importancia de API en la selección de especies arbóreas adecuadas, en entornos urbanos contaminados (Alotaibi et al., 2020, p. 29157; Datta et al., 2021, p. 2). También subraya la importancia de calcular el APTI para cada zona en particular. Por ejemplo, *C. lusitanica* muestra un desempeño diferente al variar de "Bueno" en el B. de Nativitas y Tlalpan, en contraposición se obtuvo el Bosque de Chapultepec una categoría de "Muy Bueno".

Los factores como la tolerancia a la contaminación, la densidad del dosel y la naturaleza perenne de las especies desempeñan un papel crucial en la efectividad de la mitigación de la contaminación atmosférica. Por lo tanto, se recomienda la consideración detallada de estos factores al diseñar proyectos de reforestación que estén enfocados a la mitigación de contaminantes de en áreas urbanas. La clasificación del API, combinado con APTI de las especies, revela cuatro categorías diferentes (Singh y Verma, 2007, p. 297) que se puede observar en la Tabla 14.

**Tabla 11**

*Categorías para plantaciones de árboles basado en API y APTI*

API	APTI	Categoría
Mayor	Mayor	1
Menor	Mayor	2
Mayor	Menor	3
Menor	Menor	4

Estas categorías permiten una clasificación efectiva de las especies en función de su idoneidad para el cultivo en áreas contaminadas y su capacidad para absorber contaminantes dado que la primer y segunda categoría son especialmente adecuadas como mitigadores debido a su capacidad para absorber y tolerar los contaminantes mientras la tercera y cuarta categoría tiene un resistencia limitada pero aún pueden ser útiles como especies indicadoras de la contaminación, en esta investigación estas categorías se muestran con estrellas (Figuras 22, 23 y 24, pp. 69-71) entre mayor números de estrellas mejor la puntuación de APTI y API. Esto es fundamental para la planificación y el diseño de cinturones verdes en entornos urbanos, reforestación en bosque urbanos y nuevas plantaciones en calles y carreteras ya que proporciona una guía precisa para la selección de especies que pueden mitigar los efectos de la contaminación atmosférica (Shannigrahi et al., 2004, p. 135).

La mitigación de la contaminación atmosférica a través de la cobertura vegetal urbana ha sido un tema de discusión, con hallazgos contradictorios que han generado controversia. Este debate se ha centrado en la efectividad de los árboles y bosques urbanos para reducir los contaminantes atmosféricos, especialmente los gases nocivos. Parsa, et al (2019) describieron que la plantación urbana puede eliminar 814.46 toneladas de contaminantes atmosféricos en los próximos 20 años mediante una gestión forestal urbana adecuada.

Chaudhary y Rathore, (2019); menciona que la interceptación y retención del polvo dependen de la orientación de las hojas, así como la rugosidad, la edad, la capacidad de mojado de la superficie de la hoja, la cutícula y las características epidérmicas, la geometría de la superficie, la filotaxia y el área. También dependerá de las fuentes y contaminantes en el entorno, condiciones meteorológicas, y la velocidad del viento,

Popek et al., (2022), analizaron la acumulación de partículas suspendidas (PM) en diferentes tipos de plantas en relación con la distancia a una carretera. Se observó que tanto los musgos ( $180 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) como las plantas herbáceas ( $155 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) acumularon las cantidades más altas de PM a una distancia cercana a la carretera. Sin embargo, la acumulación disminuyó significativamente con el aumento de la distancia desde la fuente de contaminación. En el caso de los musgos, la acumulación disminuyó en un 41% a 5 metros de la carretera y continuó disminuyendo a mayores distancias. Las plantas herbáceas mostraron una tendencia similar, pero sin diferencia significativa entre 1 m y 5 m de la fuente de contaminación. Por otro lado, los árboles ( $33 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) y arbustos ( $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) tuvieron la acumulación más baja de PM en el borde del bosque, a 10 m de la carretera, pero esta aumentó significativamente a mayores distancias, siendo más pronunciado en árboles ( $70 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) a 50 m de la carretera. En general, la acumulación de PM varió según el tipo de planta y la distancia a la carretera.

No obstante, existe evidencias que cuestiona la eficacia de los bosques urbanos y los árboles en la eliminación de contaminantes del aire, particularmente los contaminantes gaseosos. Por ejemplo, el estudio de Yli-Pelkonen et al., (2017) realizado en Baltimore, EE. UU., encontró que si bien la presencia de árboles en áreas urbanas podría reducir la concentración de ozono ( $O_3$ ), su impacto en la reducción de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) no fue significativo.

Hallazgos similares se obtuvieron en un estudio conducido por Grundström y Pleijel, (2014) en Gotemburgo, Suecia, en una zona de alto tráfico. En este caso, se observó una disminución del 7% de la concentración de  $NO_2$  dentro del dosel de los árboles en comparación con el exterior, aunque no hubo variación en la concentración de  $O_3$ . Estos resultados sugieren que la contribución de los bosques urbanos a la reducción de la contaminación del aire es limitada.

Escobedo et al., (2011) enfatizaron que, si no se consideran los potenciales impactos negativos de la vegetación urbana, su uso en la reducción de la contaminación podría resultar ineficaz o incluso contraproducente. Los resultados presentados en diversos estudios han arrojado resultados mixtos, destacando la necesidad de considerar las condiciones específicas del entorno urbano y los potenciales efectos adversos antes de asumir que la vegetación puede ser la solución definitiva para mejorar la calidad del aire en áreas urbanas altamente contaminadas. La complejidad de los sistemas urbanos y la interacción entre la vegetación y los contaminantes atmosféricos requieren investigaciones continuas y enfoques personalizados para abordar este desafío ambiental.

Figura 24

Recomendaciones de las especies arbóreas para el bosque de Chapultepec

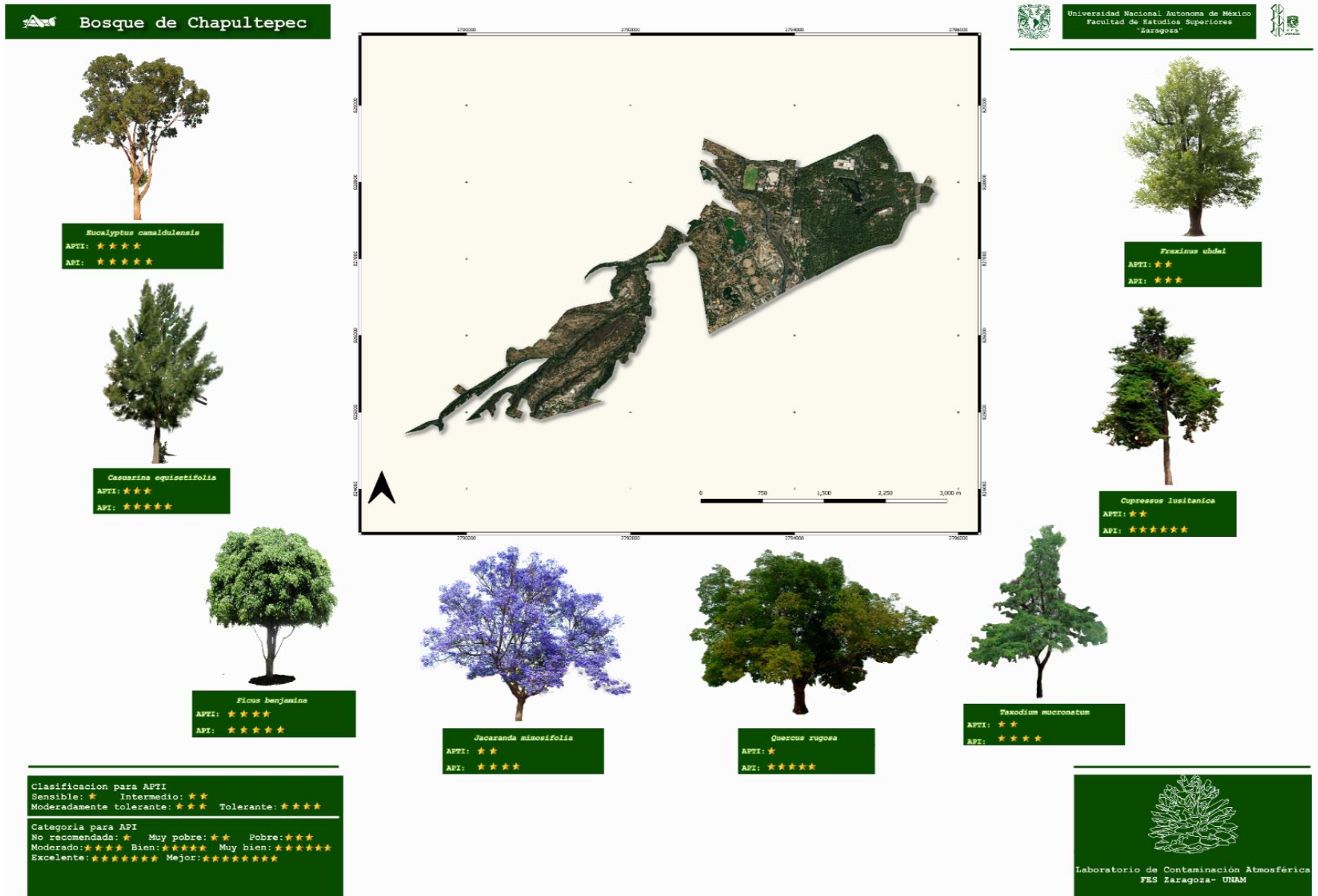




Figura 25

Recomendaciones de las especies arbóreas para el bosque de Nativitas.

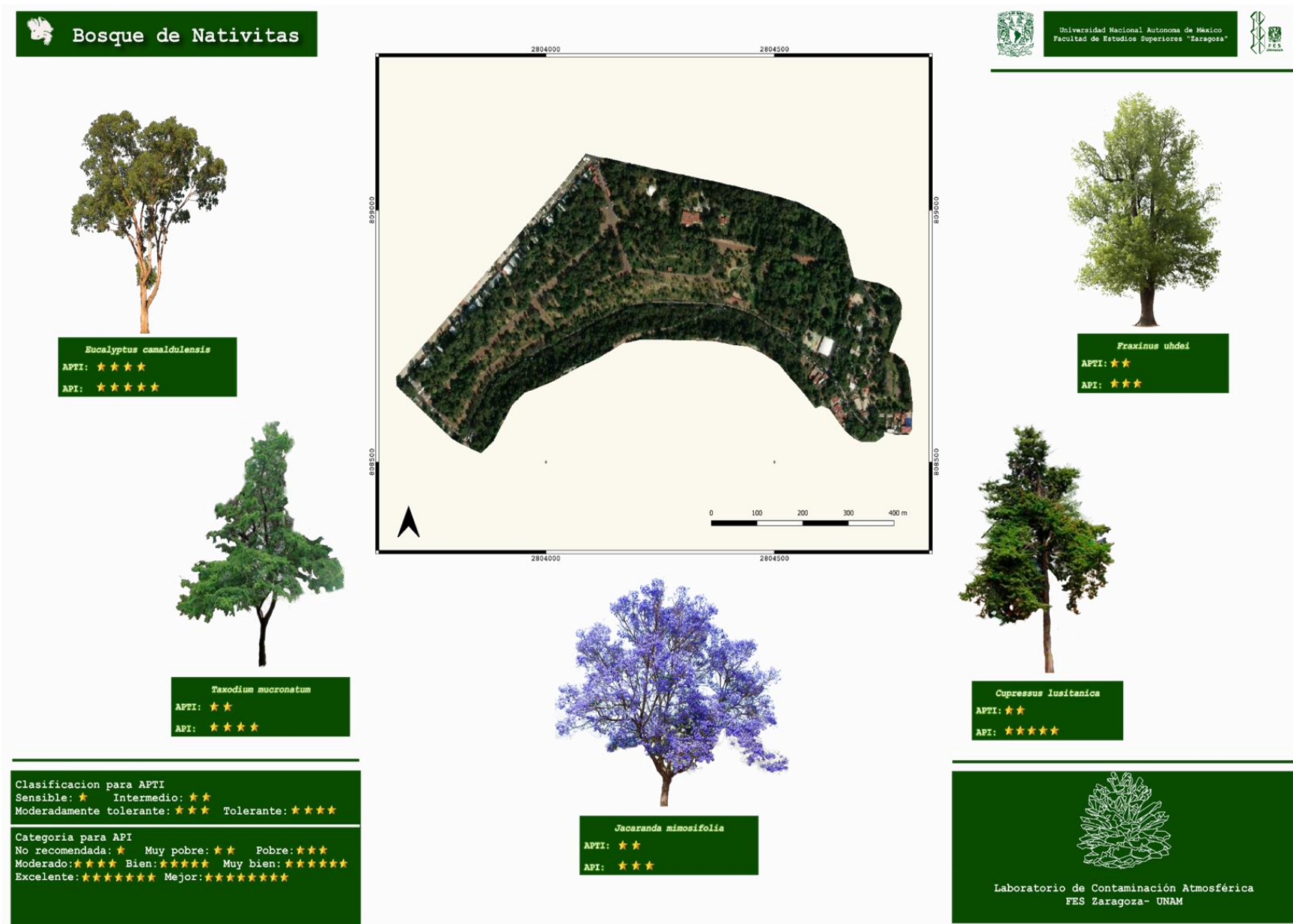




Figura 26

Recomendaciones de las especies arbóreas para el bosque de Tlalpan



## VIII. CONCLUSIONES

- *Ficus benjamina*, *Eucalyptus camaldulensis*, y *Casuarina esquisetifolia* son los árboles tolerantes a los contaminantes de la CDMX
- *Eucalyptus camaldulensis*, y *Casuarina esquisetifolia* son especies arbóreas de mayor rendimiento anticipado
- De los tres bosques Chapultepec tiene mayor número de especies tolerantes y mejor rendimiento.
- Las escalas de clasificación de cada índice deben ser ajustadas para cada bosque, debido a que *Casuarina esquisetifolia* mostró diferencias en clasificación APTI en Chapultepec, fue tolerante y en Tlalpan, Sensible. Misma situación se concluyó para *Cupressus lusitanica*.
- El índice ATPI es determinante para determinar el API, debido a poseer una mayor tolerancia a ser lesionado por algún contaminante.
- El *Fraxinus uhdei* es la única que obtuvo categorías pobres en los tres bosques. Siendo esta la que no se recomienda para zonas de alta contaminación
- Las especies que toleran y capturan contaminantes en Chapultepec son *Ficus benjamina*, *Eucalypto camaldulensis*, y *Casuarina esquisetifolia*.
- *Cupressus lusitanica*, *Jacaranda mimosifolia* y *Quercus rugosa* atrapan contaminantes, y debido a su alta sensibilidad son excelentes biomonitores.
- *Eucalyptus camaldulensis* es el que mitiga la contaminación del aire, y como biomonitores sensibles: *Cupressus lusitanica*, y *Taxodium mucronatum* para el bosque de Nativitas

- Se sugiere plantar en el bosque de Tlalpan *Quercus rugosa* pese a que es biomonitor sensible a la contaminación
- El APTI evalúa la capacidad de supervivencia de un árbol en entornos contaminados, la puntuación elevada es necesaria pero no suficiente para su selección. Integrado con el API, se complementa el criterio de selección considerando condiciones urbanísticas de los árboles.

## REFERENCIA

- Alotaibi, M. D., Alharbi, B. H., Al-Shamsi, M. A., Alshahrani, T. S., Al-Namazi, A. A., Alharbi, S. F., Alotaibi, F. S., & Qian, Y. (2020). Assessing the response of five tree species to air pollution in Riyadh City, Saudi Arabia, for potential green belt application. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 29156-29170. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09226-w>
- Amorim, J. H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, J., & Borrego, C. (2013). CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Science of The Total Environment*, 461-462, 541-551. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.031>
- Baraldi, R., Chieco, C., Neri, L., Facini, O., Rapparini, F., Morrone, L., Rotondi, A., & Carriero, G. (2019). An integrated study on air mitigation potential of urban vegetation: From a multi-trait approach to modeling. *Urban Forestry & Urban Greening*, 41, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.03.020>
- Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. (1962). A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15, 413-428.
- Benavides, H. (1992). Current Situation of the Urban Forest in Mexico City. *Arboriculture & Urban Forestry*, 18. <https://doi.org/10.48044/jauf.1992.007>
- Black, C. R., & Black, V. J. (1979). The Effects of Low Concentrations of Sulphur Dioxide on Stomatal Conductance and Epidermal Cell Survival in Field Bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Experimental Botany*, 30(2), 291-298. <https://doi.org/10.1093/jxb/30.2.291>
- Chacalo, A., Corona, V., & Nava, E. (2009). *Árboles y arbustos para ciudades*. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:178915481>
- Chaudhary, I. J., & Rathore, D. (2019). Dust pollution: Its removal and effect on foliage physiology of urban trees. *Sustainable Cities and Society*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199084857>
- Chen, Z., & Gallie, D. R. (2005). Increasing Tolerance to Ozone by Elevating Foliar Ascorbic Acid Confers Greater Protection against Ozone Than Increasing Avoidance. *Plant Physiology*, 138(3), 1673-1689. <https://doi.org/10.1104/pp.105.062000>
- Conklin, P. L. (2001). Recent advances in the role and biosynthesis of ascorbic acid in plants. *Plant, Cell & Environment*, 24(4), 383-394. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00686.x>
- Correa-Ochoa, M., Mejia-Sepulveda, J., Saldarriaga-Molina, J., Castro-Jiménez, C., & Aguiar-Gil, D. (2022). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of six plant species, in an urban tropical valley: Medellín, Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), 7952-7971. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16037-0>

- Dadkhah-Aghdash, H., Rasouli, M., Rasouli, K., & Salimi, A. (2022). Detection of urban trees sensitivity to air pollution using physiological and biochemical leaf traits in Tehran, Iran. *Scientific Reports*, *12*(1), 15398. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19865-3>
- Das, S., Mallick, S., Padhi, S. K., Dehury, S. S., Acharya, B., & Prasad, P. (2010). Air pollution tolerance indices (APTI) of various plant species growing in industrial areas of Rourkela. *Indian Journal of Environmental Protection*, *30*, 563-567.
- Datta, S., Sharma, A., Parkar, V., Hakkim, H., Kumar, A., Chauhan, A., Tomar, S. S., & Sinha, B. (2021). A new index to assess the air quality impact of urban tree plantation. *Urban Climate*, *40*, 100995. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100995>
- Elawa, O. E., Galal, T. M., Abdelatif, N. M., & Farahat, E. A. (2021). Evaluating the Potential Use of Four Tree Species in the Greenbelts to Mitigate the Cement Air Pollution in Egypt. *Egyptian Journal of Botany*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:245752365>
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Selected papers from the conference Urban Environmental Pollution: Overcoming Obstacles to Sustainability and Quality of Life (UEP2010), 20-23 June 2010, Boston, USA, 159*(8), 2078-2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Flores, L., & Romero, D. (2022). *Catálogo de especies arbóreas con proyección a servicios ecosistémicos de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Campus 2*. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Ghafari, S., Kaviani, B., Sedaghatoor, S., & Allahyari, M. S. (2021). Assessment of air pollution tolerance index (APTI) for some ornamental woody species in green space of humid temperate region (Rasht, Iran). *Environment, Development and Sustainability*, *23*(2), 1579-1600. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00640-1>
- Ghosh, S., Dutta, R., & Mukhopadhyay, S. (2023). A Review on Seasonal Changes in Particulate Matter Accumulation by Plant Bioindicators: Effects on Leaf Traits. *Water, Air, & Soil Pollution*, *234*(8), 529. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06549-5>
- Godzik, S., & Piskornik, Z. (1966). Transpiration of *Aesculus hippocastanum* L. leaves from areas of various air pollution. *Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Varsovie*, *14*(3), 181-184.
- González, L. M., & Lezama, P. T. (2008). *Árboles y áreas verdes urbanas: De la ciudad de México y su zona metropolitana*. Fundación Xochitla. <https://books.google.com.mx/books?id=1kfNtgAACAAJ>
- Goswami, M., Kumar, V., Kumar, P., & Singh, N. (2022). Prediction models for evaluating the impacts of ambient air pollutants on the biochemical response of selected tree species of Haridwar, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *194*(10), 696. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10384-2>
- Goyal, D., Yadav, A., & Vats, T. (2020). Air Pollution and Its Role in Stress Physiology. En P. Saxena & A. Srivastava (Eds.), *Air Pollution and Environmental Health* (pp. 115-140). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3481-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3481-2_6)

- Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorim, J. H., Cariñanos, P., Churkina, G., Fares, S., Thiec, D. L., Niinemets, Ü., Mikkelsen, T. N., Paoletti, E., Tiwary, A., & Calfapietra, C. (2016). Functional traits of urban trees: Air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 543-550. <https://doi.org/10.1002/fee.1426>
- Grundström, M., & Pleijel, H. (2014). Limited effect of urban tree vegetation on NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations near a traffic route. *Environmental Pollution*, 189, 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.026>
- Harris, T. B., & Manning, W. J. (2010). Nitrogen dioxide and ozone levels in urban tree canopies. *Environmental Pollution*, 158(7), 2384-2386. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.04.007>
- Hellmuth, E. O. (1970). Measurement of Leaf Water Deficit with Particular Reference to the Whole Leaf Method. *Journal of Ecology*, 58(2), 409-417. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/2258279>
- Hörtensteiner, S., & Kräutler, B. (2011). Chlorophyll breakdown in higher plants. *Regulation of Electron Transport in Chloroplasts*, 1807(8), 977-988. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2010.12.007>
- Hozhabralsadat, M. S., Heidari, A., Karimian, Z., & Farzam, M. (2022). Assessment of plant species suitability in green walls based on API, heavy metal accumulation, and particulate matter capture capacity. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 68564-68581. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20625-z>
- Hussain, I., Khan, L., Khan, M. A., Khan, F., & Ayaz, S. (2010). UV spectrophotometric analysis profile of ascorbic acid in medicinal plants of Pakistan. *World applied sciences journal*, 9, 800-803.
- Hwang, H.-J., Yook, S.-J., & Ahn, K.-H. (2011). Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Modeling of Air Quality Impacts, Forecasting and Interactions with Climate*, 45(38), 6987-6994. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.019>
- Jamil, S., Abhilash, P. C., Singh, N., & Sharma, P. N. (2009). Jatropha curcas: A potential crop for phytoremediation of coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.004>
- Joshi, P., & Swami, A. (2009). Air pollution induced changes in the photosynthetic pigments of selected plant species. *Journal of environmental biology / Academy of Environmental Biology, India*, 30, 295-298.
- Kaur, M., & Nagpal, A. K. (2017). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of plants and their application in development of green space along the urban areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(23), 18881-18895. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9500-9>
- Larcher, W. (1969). *Physiological approaches to measurement of photosynthesis in relation to dry matter production by trees and effects of environmental and physiological variables on net photosynthesis of trees*. 3(1), 93.

- Larcher, W. (1973). Gradual progress of damage due to temperature stress. *Temperature and life*.
- Larcher, W. (1977). *Ecofisiología vegetal*. Barcelona Omega.
- Liu, Y.-J., & Ding, H. (2008). Variation in air pollution tolerance index of plant near a steel factory: Implications for landscape plant species selection for industrial areas. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4.
- Mansfield, T. A. (1998). Stomata and plant water relations: ¿Does air pollution create problems? *Environmental Pollution*, 101(1), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00076-1)
- Mukherjee, A., & Agrawal, M. (2018). Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 152, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.038>
- Murthy, M. S. R., Lakshmi, O. B., Raza, S. H., & Ahmed, A. (1991). A new method for evaluating sulfur dioxide tolerance of certain trees. *International Journal of Environmental Studies*, 39(1-2), 85-94. <https://doi.org/10.1080/00207239108710684>
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3), 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>
- OKANO, K., TOBE, K., & FURUKAWA, A. (1990). Foliar uptake of peroxyacetyl nitrate (PAN) by herbaceous species varying in susceptibility to this pollutant. *New Phytologist*, 114(1), 139-145. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00384.x>
- Pandey, A., Pandey, M., Mishra, A., Tiwary, S., & Tripathi, B. (2015). Air pollution tolerance index and anticipated performance index of some plant species for development of urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 866-871. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.001>
- Parsa, V., Salehi, E., Yavari, A. R., & van Bodegom, P. M. (2019). Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101548. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101548>
- Popek, R., Fornal-Pieniak, B., Chyliński, F., Pawełkowicz, M., Bobrowicz, J., Chrzanowska, D., Piechota, N., & Przybysz, A. (2022). Not Only Trees Matter—Traffic-Related PM Accumulation by Vegetation of Urban Forests. *Sustainability*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052973>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A., Stolle, F., Harris, N., Song, X.-P., Baggett, A., Kommareddy, I., & Kommareddy, A. (2022). The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing*, 3. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsen.2022.856903>
- Potgieter, L. J., Richardson, D. M., & Wilson, J. R. U. (2014). Casuarina: Biogeography and ecology of an important tree genus in a changing world. *Biological Invasions*, 16(3), 609-633. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0613-x>

- Prajapati, S. K., & Tripathi, B. D. (2008). Anticipated Performance Index of some tree species considered for green belt development in and around an urban area: A case study of Varanasi city, India. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 1343-1349. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.002>
- Prusty, B. A. K., Mishra, P. C., & Azeez, P. A. (2005). Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(2), 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.013>
- Rai, P. K. (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 120-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.012>
- Rai, P. K. (2020). Particulate matter tolerance of plants (APTI and API) in a biodiversity hotspot located in a tropical region: Implications for eco-control. *Particulate Science and Technology*, 38(2), 193-202. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1527800>
- Rai, P. K., & Panda, L. L. S. (2014). Dust capturing potential and air pollution tolerance index (APTI) of some road side tree vegetation in Aizawl, Mizoram, India: An Indo-Burma hot spot region. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7(1), 93-101. <https://doi.org/10.1007/s11869-013-0217-8>
- Ramírez, A., Cilia, G., & Flores-Ramírez, R. (2017). *El Índice de Tolerancia a la Contaminación Atmosférica (APTI). Como herramienta en el uso de biomonitores pasivos de contaminación atmosférica porque de biomasa*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26884.63360>
- Ramírez-Hernández, S. G., Pérez-Vázquez, A., Albarado, J. C. G., & Gómez-González, A. (2012). Criterio para la selección de especies herbáceas ornamentales para su uso en paisajismo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*.
- Rao, M. V., & Dubey, P. S. (1990). Biochemical aspects (antioxidants) for development of tolerance in plants growing at different low levels of ambient air pollutants. *Environmental Pollution*, 64(1), 55-66. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(90\)90095-T](https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90095-T)
- Sahu, C., Basti, S., & Sahu, S. K. (2020). Air pollution tolerance index (APTI) and expected performance index (EPI) of trees in sambalpur town of India. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1327. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3120-6>
- Sahu, C., & Kumar, S. (2015). Air Pollution Tolerance Index (APTI), Anticipated Performance Index (API), Carbon Sequestration and Dust Collection Potential of Indian Tree Species – A Review. *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, 4, 2278-9359.
- Scholz, F., & Reck, S. (1977). Effects of acids on forest trees as measured by titration in vitro, inheritance of buffering capacity in *Picea abies*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 8(1), 41-45. <https://doi.org/10.1007/BF00156723>
- SEDEMA. (2023). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe anual 2020*. (p. 220). Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.
- Shannigrahi\*, A. S., Fukushima, T., & Sharma, R. C. (2004). ANTICIPATED AIR POLLUTION TOLERANCE OF SOME PLANT SPECIES CONSIDERED FOR GREEN BELT



DEVELOPMENT IN AND AROUND AN INDUSTRIAL/URBAN AREA IN INDIA: AN OVERVIEW. *International Journal of Environmental Studies*, 61(2), 125-137. <https://doi.org/10.1080/0020723032000163137>

- Shojaee Barjoe, S., Malverdi, E., Kouhkan, M., Alipourfard, I., Rouhani, A., Farokhi, H., & Khaledi, A. (2023). Health assessment of industrial ecosystems of Isfahan (Iran) using phytomonitoring: Chemometric, micromorphology, phytoremediation, air pollution tolerance and anticipated performance indices. *Urban Climate*, 48, 101394. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101394>
- Shrestha, S., Baral, B., Dhital, N. B., & Yang, H.-H. (2021). Assessing air pollution tolerance of plant species in vegetation traffic barriers in Kathmandu Valley, Nepal. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00076-2>
- Singh, S. K., Rao, D. N., Agrawal, M., Pandey, J., & Naryan, D. (1991). Air pollution tolerance index of plants. *Journal of Environmental Management*, 32(1), 45-55. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(05\)80080-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(05)80080-5)
- Singh, S. N., & Verma, A. (2007). Phytoremediation of Air Pollutants: A Review. En S. N. Singh & R. D. Tripathi (Eds.), *Environmental Bioremediation Technologies* (pp. 293-314). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-34793-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-34793-4_13)
- Singh, S., & Rao, D. (1983). *Evaluation of plants for their tolerance to air pollution*. 1(1), 218-224.
- Smirnoff, N., & Wheeler, G. L. (2000). Ascorbic Acid in Plants: Biosynthesis and Function. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 35(4), 291-314. <https://doi.org/10.1080/10409230008984166>
- Steinparzer, M., Schaubmayr, J., Godbold, D. L., & Rewald, B. (2023). Particulate matter accumulation by tree foliage is driven by leaf habit types, urbanization- and pollution levels. *Environmental Pollution*, 335, 122289. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122289>
- Stocker, O. (1929). Das Wasserdefizit von Gefässpflanzen in verschiedenen Klimazonen. *Planta*, 7(2), 382-387. <https://doi.org/10.1007/BF01916035>
- Sulistijorini, Mas'us, Z. A., Nasrullah, N., Bey, A., & Tjitrosemito, S. (2008). Tolerance Levels of Roadside Trees to Air Pollutants Based on Relative Growth Rate and Air Pollution Tolerance Index. *HAYATI Journal of Biosciences*, 15(3), 123-129. <https://doi.org/10.4308/hjb.15.3.123>
- Sun, Y., Wang, C., Chen, H. Y. H., & Ruan, H. (2020). Response of Plants to Water Stress: A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 11, 978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00978>
- Sutton, M. A., Van Dijk, N., Levy, P. E., Jones, M. R., Leith, I. D., Sheppard, L. J., Leeson, S., Sim Tang, Y., Stephens, A., Braban, C. F., Dragosits, U., Howard, C. M., Vieno, M., Fowler, D., Corbett, P., Naikoo, M. I., Munzi, S., Ellis, C. J., Chatterjee, S., ... Wolseley, P. A. (2020). Alkaline air: Changing perspectives on nitrogen and air pollution in an ammonia-rich world. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2183), 20190315. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0315>
- Tiwari, S., Bansal, S., & Rai, S. (1993). Expected performance indices of some planted trees of Bhopal. *Indian Journal of Environmental Health*, 35(4), 282-287.

- Varshney, C. K., Garg, J. K., Lauenroth, W. K., & Heitschmidt, R. K. (1979). Plant responses to sulfur dioxide pollution. *C R C Critical Reviews in Environmental Control*, 9(1), 27-49. <https://doi.org/10.1080/10643387909381667>
- Vos, P. E. J., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? [], 183. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2012.10.021>
- Watson, A. S., & Bai R, S. (2021). Phytoremediation for urban landscaping and air pollution control— A case study in Trivandrum city, Kerala, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(8), 9979-9990. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11131-1>
- Weatherley, P. E. (1950). STUDIES IN THE WATER RELATIONS OF THE COTTON PLANT. *New Phytologist*, 49(1), 81-97. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1950.tb05146.x>
- Yli-Pelkonen, V., Setälä, H., & Viippola, V. (2017). Urban forests near roads do not reduce gaseous air pollutant concentrations but have an impact on particles levels. *Landscape and Urban Planning*, 158, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.014>