

168



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EFFECTO DEL AMBIENTE URBANO EN LA
CONDUCTIVIDAD ESTOMATICA DE DOS
ESPECIES ARBÓREAS EN LA CIUDAD DE
MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
B I O L O G O
P R E S E N T A:
GIUSEPPE PASQUETTI HERNÁNDEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. VÍCTOR LUIS BARRADAS MIRANDA

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunico a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

Efecto del ambiente urbano en la conductividad estomática de dos especies
arbóreas en la Ciudad de México.

realizado por Pasquetti Hernández Giuseppe

con número de cuenta 9853584-8 , quién cubrió los créditos de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario

Dr. Víctor Luis Barradas Miranda

V. Barradas Miranda

Propietario

M. en C. Aurora Zlotnik Espinosa

Aurora Zlotnik

Propietario

Dra. Alma Delfina Lucía Orozco Segovia

Alma Delfina Orozco Segovia

Suplente

Dra. María del Pilar Huante Pérez

María del Pilar Huante Pérez

Suplente

M. en C. Irene Pisanty Baruch

Irene Pisanty Baruch

FACULTAD DE CIENCIAS
U.N.A.M.

Consejo Departamental de Biología



DEPARTAMENTO
DE BIOLOGIA

M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez

Juan Manuel Rodríguez Chávez

**EFFECTO DEL AMBIENTE URBANO EN LA CONDUCTIVIDAD ESTOMÁTICA
DE DOS ESPECIES ARBÓREAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

GIUSEPPE PASQUETTI HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS
DR VÍCTOR LUIS BARRADAS MIRANDA**

A mis padres Alberto y Evangelina

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Barradas Miranda por todo el apoyo brindado, dedicación, consejos y ayuda y por todo lo que aprendí durante la realización de esta tesis.

A la M. en C. Aurora Zlotnik Espinosa por su importantísima ayuda y su permanente asesoría.

A la Dra. Alma Orozco Segovia, a la Dra. María del Pilar Huante Pérez y a la M. en C. Irene Pisanty Baruch por la revisión, sugerencias y comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al Laboratorio de Microcine de la Facultad de Ciencias de la UNAM, en especial a la Biol. Ana Isabel Bieler Antolín por la ayuda en la obtención de las fotomicrografías utilizadas.

Al Dr. Ignacio Méndez Ramírez por su asesoría en el desarrollo del protocolo y el análisis estadístico de esta investigación.

Un muy especial agradecimiento a mis amigos Andrés Lira Noriega y Yoshinori Nakazawa Ueji, a quienes debo la concepción de este proyecto y la constante motivación para culminarlo.

Al M. en G. Francisco Hernández Hernández, responsable de la Estación Meteorológica del Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM, por haber facilitado los datos meteorológicos correspondientes al año 2001.

A mi hermana Anna Margherita por su paciencia al ayudarme en el trabajo de campo.

Índice

• Resumen	1
• Introducción	2
• Antecedentes	5
Estomas	5
Respuesta de los estomas al ambiente	6
Medición de la apertura estomática	8
Arreglo estomático	9
Daño foliar	10
Evaluación de la respuesta de la vegetación al ambiente	12
• Hipótesis	15
• Objetivos	15
• Materiales y Método	16
Sitio de estudio	16
Material vegetal	19
Estructura de las mediciones criterios de inclusión y exclusión	20
Precipitación y temperatura	20
Medición de variables fisiológicas y ambientales	20
Evaluación del daño foliar, área foliar, índice estomático y preparación de muestras	21
Captura manejo y análisis de datos	23
• Resultados	25
Variables ambientales	25
Conductividad estomática	31
Efectos microambientales y fisiológicos	35
Análisis de curvas envolventes	35
Modelos generales de curvas envolventes	42
Análisis de regresión múltiple	42
Índice estomático, área foliar y daño foliar	47
• Discusión	56
• Conclusiones	62
• Referencias bibliográficas	64
• Anexo	69

Resumen

Se evaluó el efecto que las variables microambientales (radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire y déficit de presión de vapor) y la contaminación por ozono tienen en la conductividad estomática de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum*, que son parte del arbolado urbano de la Ciudad de México. Se seleccionaron 4 localidades (2 parques y 2 camellones) en la zona suroeste de la Ciudad, y se realizaron mediciones de las variables microambientales y la conductividad estomática de 3 árboles de cada especie en cada localidad durante varias sesiones entre febrero y septiembre del 2001, abarcando parte de la estación seca y de la estación húmeda que caracterizan el clima de la región. Se utilizaron dos modelos de aproximación para analizar el efecto del microambiente en la conductividad estomática: regresión múltiple y análisis de curvas envolventes. La conductividad estomática de ambas especies en la estación seca fue menor que en la estación húmeda; las variables microambientales fueron, de acuerdo a los modelos, menos limitantes de la conductividad estomática de las dos especies en la estación húmeda que durante la estación seca. El ozono tuvo un efecto negativo en la conductividad estomática durante la estación seca, en cambio, en la estación húmeda el efecto fue positivo. También se evaluó el índice estomático, el área foliar (por hoja) y el daño foliar. El índice estomático de ambas especies no cambió a través del período de mediciones. El área foliar (por hoja) de *Fraxinus uhdei* fue siempre mayor que la de *Ligustrum lucidum*. *Fraxinus uhdei* presentó un grave daño foliar causado por el ozono, evidente a simple vista por manchas aclaradas y zonas necrosadas, y al microscopio se observó daño en el parénquima de la hoja; *Ligustrum lucidum* casi no presentó daño foliar y cuando lo hubo se debió a causas físicas o herbivoría. Se discute el efecto de las variables microambientales en la fisiología de estomas y el daño foliar, así como la precisión de los modelos de apertura estomática empleados.

Introducción

El clima puede definirse como la conjunción media de sus elementos: radiación solar, precipitación, temperatura y humedad del aire, y velocidad del viento (Lehr, 1987). Las zonas urbanas se caracterizan por condiciones ambientales muy particulares, que en ocasiones pueden ser diferentes a las originales. La Ciudad de México es una de las más grandes y pobladas del mundo. Estas condiciones se han traducido en un grave deterioro ambiental.

En las ciudades se registra un incremento en la temperatura con respecto a sus alrededores debido a los materiales de construcción que absorben la energía solar, a la presencia de fábricas, así como una alta densidad humana y del parque vehicular (Jáuregui, 1971; Barradas, 1987). En la Ciudad de México se ha encontrado que la diferencia de temperatura es hasta de 9.4°C entre el centro de la Ciudad y Xochimilco, además la humedad del aire es más baja en las zonas urbanas y el viento experimenta un patrón específico de circulación (Jáuregui, 1997). Un estudio realizado en cinco parques de esta ciudad, demostró que estas áreas verdes son capaces de disminuir la temperatura del aire hasta 4°C y aumentar la humedad relativa hasta en un 4 %, capacidad que es función del área del parque, presencia de pavimentos y flujo vehicular en los alrededores. Estos resultados sugieren que es posible amortiguar el efecto de la actividad humana sobre el ambiente mediante una red de parques más densa donde se ubiquen los centros de mayor actividad (Barradas, 1991).

La Ciudad de México sufre del grave problema de contaminación atmosférica causado principalmente por ozono (O_3). A pesar de que se han promulgado políticas normativas para reducir la emisión de contaminantes precursores de O_3 (monóxido de carbono, CO ; óxidos de nitrógeno, NO_x y compuestos orgánicos volátiles), las metas propuestas en la mayoría de las ocasiones no han sido alcanzadas. Desde la mitad de la década de los ochenta, con la introducción al mercado de gasolinas con bajo contenido de plomo, los óxidos de azufre (SO_x) y el plomo (Pb) dejaron de ser los contaminantes más frecuentes en la atmósfera. A partir de entonces el ozono es el principal contaminante del aire junto con las partículas suspendidas y otros contaminantes tóxicos (Bravo, 1997; Bravo, *et al.*, 1997).

Se ha calculado el efecto que la contaminación de la Ciudad de México puede tener sobre el ambiente local y las implicaciones de ésta a nivel regional, evidenciando la relación de las partículas contaminantes con cambios en la temperatura y en la incidencia de radiación solar (Raga, *et al.*, 2001).

En condiciones tan particulares como pueden ser las de la Ciudad de México, las áreas verdes han adquirido una gran importancia. La vegetación urbana actual está limitada a parques y jardines públicos, camellones, banquetas, jardines privados y terrenos baldíos. Las áreas verdes corresponden al 5% de la superficie de la Ciudad de México, los parques naturales contribuyen con el 24.3%, los parques y jardines públicos con el 18% y las áreas verdes en vialidades con el 16%. De acuerdo con esos datos se deduce que el área verde actual por habitante (3.1 m^2) tiene un déficit considerable si se compara con la de otras ciudades del mundo, Chicago (36 m^2) o Berlín (34.1 m^2) (Barradas y J-Seres, 1988).

El crecimiento de las plantas, productividad y supervivencia está íntimamente relacionado con el ambiente, y en especial con la atmósfera, con la que intercambia energía, obtiene CO_2 para la fotosíntesis y dona agua por la transpiración (Jones, 1992). Comprender cómo la planta responde a las variables ambientales, nos puede ayudar a predecir su fisiología. Una de las variables más frecuentemente utilizadas para evaluar la respuesta de la planta es la conductividad estomática (e.g. Jones y Higgs, 1989; Jones, 1992; Ramos-Vázquez y Barradas 1998).

En las últimas décadas se han realizado varias investigaciones dirigidas a evaluar la respuesta de las plantas a un ambiente modificado por la actividad humana con una atmósfera alterada por la presencia de contaminantes (e.g. Manning y Krupa, 1992; Musselman y Massman, 1999). En la Ciudad de México son pocos los esfuerzos que se han hecho en ese sentido y los trabajos realizados se enfocan más en las áreas verdes aledañas a la Ciudad (e.g. Hernández, *et al.*, 1984; Bauer, *et al.*, 1985; Alvarado, *et al.*, 1993) que en la vegetación que compone el arbolado urbano.

Las plantas que componen el arbolado urbano de la Ciudad de México están sometidas a condiciones de estrés que difícilmente se pueden encontrar en alguna otra parte del mundo. Entender cómo responden las plantas al ambiente de la Ciudad de México ayudaría a diseñar un mejor manejo de las áreas verdes.

En esta investigación se pretende conocer cómo influye el ambiente de la Ciudad de México en una de las principales respuestas fisiológicas de la planta, la conductividad estomática, además de evaluar el daño foliar que los contaminantes pueden causar.

Antecedentes

Las plantas al igual que todos los seres vivos interactúan con el ambiente que les rodea, obtienen de él energía y sustancias que les permiten realizar procesos físicos, químicos y biológicos y aportan al ambiente energía y sustancias transformadas. El intercambio de gases entre la atmósfera y la planta es un proceso de gran importancia para mantener la vida en la Tierra debido a que el comportamiento fisiológico de una comunidad vegetal afecta de manera importante su microambiente, así como el microambiente influye en su fisiología (Lushnikov, 1994). Una de las estructuras más importantes que le permiten a las plantas interactuar eficazmente con el ambiente son los estomas.

Estomas

Los estomas se distinguen de otros poros epidérmicos, como las lenticelas, por su capacidad de regular movimientos de apertura y cierre del poro. A pesar de que son más abundantes en las hojas, también se les puede encontrar en otros tejidos verdes, como tallos, frutos y flores. En los árboles suelen encontrarse en la epidermis abaxial de las hojas (Jones, 1992).

Los estomas están formados por dos células epidérmicas especializadas llamadas células guarda. Estas células regulan de modo dinámico sus concentraciones de solutos (principalmente calcio, Ca_2^+ y potasio K^+) para controlar su turgencia, presión y volumen. Si la turgencia (y volumen) de las células guarda aumenta, el poro se ensancha.

El intercambio de gases entre la vegetación y la atmósfera es afectado por varios factores definidos desde las células hasta el microambiente del dosel. Los gases se difunden del aire turbulento, a través de la capa límite en la hoja, al estoma y luego a los espacios aéreos intercelulares en las células del mesófilo. Todo esto ocurre al mismo tiempo en que vapor de agua fluye en la dirección contraria. El control estomático es ampliamente propuesto como el mecanismo dominante en la regulación de la transpiración y la asimilación de CO_2 (e.g. Shulze, *et al.*, 1972; Burrows, 1976; Lushnikov, 1994). "El flujo de agua es

aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que el flujo de CO₂. Contaminantes como el SO₂ y O₃, también encuentran una ruta hacia la hoja a través del estoma, y su flujo es varios ordenes de magnitud inferior al del vapor de agua” (Meyers y Baldocchi, 1988).

En general, las respuestas estomáticas están adaptadas para controlar el balance entre la obtención de CO₂ y la pérdida de agua, regulando la apertura estomática, que está íntimamente relacionada con el estado hídrico de las plantas y juega un papel determinante tanto en el uso del agua como en la fotosíntesis y la productividad vegetal.

Respuesta de los estomas al ambiente.

Los estomas responden a diversos factores: radiación, temperatura, humedad ambiental, estatus hídrico, la concentración de CO₂ dentro de la hoja, etc. (Kozlowski, et al. 1991).

Radiación: Posiblemente este es el factor más consistente y mejor documentado en lo que a su efecto sobre la respuesta estomática se refiere. Los estomas se abren al incrementarse la radiación recibida hasta alcanzar la apertura máxima; este punto de máxima apertura varía de especie a especie (Kozlowski, 1991; Jones 1992).

Concentración interna de CO₂ en la hoja: La respuesta de los estomas a este factor es inversa; las concentraciones altas de CO₂ provocan la pérdida de solutos y por lo tanto la reducción de la apertura estomática; esta respuesta interactúa constantemente con la respuesta a la radiación (Mott y Buckley, 2000; Groll y Altmann, 2001).

Humedad ambiental: Las células guarda también responden a la pérdida de agua por la hoja, cerrándose a tasas altas de transpiración y poca humedad. En estos casos el estoma responde cerrándose bajo valores altos de déficit de presión de vapor (DPV). La magnitud de la respuesta depende de la especie, las condiciones de crecimiento y particularmente del estatus hídrico de la planta (Jones, 1992).

Temperatura: Generalmente los estomas tienden a abrirse con el aumento de temperatura hasta que alcanzan una temperatura óptima que coincide con la apertura máxima de los estomas (Hall, 1976). La temperatura afecta de manera directa al estoma, aunque en ocasiones es fácil confundir su efecto con el del DPV. “Trabajos realizados controlando el DPV y modificando la temperatura, evidenciaron que generalmente los estomas se abren al aumentar la temperatura, sin embargo la magnitud de la respuesta de los estomas a la temperatura depende del DPV ” (Jones, 1992).

Estatus hídrico: Los estomas responden a cambios en el potencial hídrico (la cantidad total de agua en la planta) de la planta. Los estomas son sensibles a un fitorregulador conocido como ácido abscísico (ABA), que se sintetiza en respuesta a estrés hídrico y a otros tipos de estrés ambiental. Bajo cualquier conjunto de condiciones ambientales, la apertura estomática es una función compleja de todas las respuestas mencionadas, y se hace aún más compleja por los ritmos circadianos en la sensibilidad estomática, retraso en el metabolismo del ABA y la sensibilidad a otras hormonas vegetales (Mott y Buckley, 2000).

Contaminantes: Los gases contaminantes (SO_2 , NO , NO_2 y O_3) tienen efecto en los movimientos estomáticos, que depende de varios factores endógenos y exógenos, pero en general se cree que deben tener un efecto en el flujo de calcio (Ca_2^+) en las células guarda alterando la apertura estomática (Torsethaugen, 1999; Serna, 2001).

Los efectos individuales que los factores mencionados tienen sobre la conductividad estomática, pueden ser mejor estudiados en ambientes controlados o cámaras en donde cada factor puede ser modificado independientemente. Sin embargo, utilizar la información obtenida en ambientes controlados para explicar o predecir la respuesta estomática en condiciones naturales es complicado por varias razones:

- 1) Interacción entre las respuestas
- 2) Variabilidad del ambiente natural
- 3) El tiempo de respuesta de los estomas a los cambios en el ambiente

- 4) Ritmos y ciclos propios a cada especie que afectan a la apertura estomática independientemente del ambiente.

Al trabajar en condiciones naturales es necesario utilizar métodos que permiten determinar la respuesta estomática a factores individuales, dos de los más comunes son el análisis de curvas envolventes y la regresión múltiple (Jones, 1992).

El análisis de curvas envolventes supone que de manera ideal, una curva envolvente hipotética se aproxima a la respuesta estomática cuando no hay otro factor más que el involucrado (Jarvis, 1976; Ramos-Vázquez y Barradas 1998).

En el otro método utilizado, la regresión múltiple, la respuesta estomática se relaciona contra las variables independientes a analizar para obtener una ecuación de la forma:

$$\text{Respuesta estomática} = a + b(\text{var 1}) + c(\text{var 2}) + d(\text{var 3}) + \dots$$

Donde "a, b, c y d" son constantes.

Utilizando ambos métodos se puede tener una idea clara de cómo los estomas responden a cada uno de los factores involucrados sin necesidad de aislar a la planta de su ambiente natural.

Medición de la apertura estomática.

La manera mas obvia y directa de medir la respuesta estomática, es midiendo la apertura estomática y para ello se han desarrollado diferentes técnicas, generalmente complicadas y en la mayoría de los casos invasivas (Jones, 1992). Entre los métodos indirectos que nos permiten conocer la apertura estomática está la posibilidad de medir la resistencia de difusión o conductividad del vapor de agua o del bióxido de carbono.

La conductividad estomática (gs) es una medida de la velocidad con que el vapor de agua y/o el bióxido de carbono se difunden desde y hacia la cavidad subestomática, respectivamente (Jones y Higgs, 1989). Para medir la conductividad estomática existen diversos instrumentos, entre ellos los porómetros de difusión, que mide la difusión de gases en la hoja, y han demostrado ser los instrumentos más sencillos y efectivos para mediciones en el campo (Fanjul y Barradas, 1985; Jones, 1992; Ramos-Vázquez y Barradas 1998).

Arreglo estomático

Existe mucha variación entre especies en la distribución y densidad de los estomas en las hojas. Las diferencias en la distribución estomática probablemente estén relacionadas con la morfología y ecología de las plantas, pues la distribución estomática influye tanto en la tasa fotosintética como en el uso eficiente del agua en la planta (Woodward y Bazzaz, 1988). Se han intentado explicar las diferentes distribuciones y densidades estomáticas y la mayoría de los investigadores (e.g. Foster y Smith, 1986; Peat y Fitter, 1994) coinciden en que la disposición de los estomas depende del grosor de la hoja y del tamaño de las células foliares.

La cantidad de estomas en una hoja está relacionada con la conductividad estomática de la hoja pues una planta con mayor número de estomas tendrá una mayor conductividad estomática en el momento en que se abran (Wilson, 1972). Para evaluar la cantidad de estomas, tradicionalmente se utiliza la densidad estomática, que indica la cantidad de estomas que se presentan en un área foliar determinada, y varía de especie a especie. Actualmente también se aplica el índice estomático, un indicador de la cantidad de estomas pero a diferencia de la densidad estomática, el índice es adimensional, y relaciona el número total de células con el número de células estomáticas que se encuentran dentro de un campo visual determinado, lo que lo convierte en un índice de fácil cálculo y aplicación. No se conoce plenamente si el índice estomático es un carácter definido genéticamente o si se debe al efecto de condiciones ambientales (Peat y Fitter, 1994).

Experimentos realizados por Kemp y Cunningham (1981) demostraron que la cantidad de luz tiene efecto en el área foliar pero no en el índice estomático. La temperatura tampoco tiene efecto en el índice estomático, ni tampoco la concentración de CO₂ y la disponibilidad de agua. En el caso del ozono, Evans y Ting (1974) demostraron que a altas concentraciones de O₃ se reduce la cantidad de estomas, que probablemente se debe a la lisis de las células epidérmicas.

Daño foliar

Las plantas desarrollan mecanismos defensivos, ya sea generando estructuras que las protejan, compensado el daño, o incluso modificando su fisiología. Cualquiera de estas reacciones, implica una inversión de energía importante que termina afectando de algún modo el desarrollo y productividad de la planta (Alvarado, *et al.*, 1993; Chavone, *et al.*, 1998; Musselman y Massman, 1999)

Las hojas al igual que el resto de la planta están expuestas a diferentes eventos o fenómenos que pueden causarles algún tipo de daño. Podemos hablar de causas mecánicas (golpes, lluvia, granizo), de herbivoría, y de causas químicas (lluvia ácida, contaminación atmosférica), entre otras que finalmente alteran la estructura de la hoja.

El O₃ es desde hace algunos años uno de los contaminantes atmosféricos mas frecuentes en las zonas urbanas y sus alrededores, y es el principal causante de daño foliar (US EPA, 1996 y Kley, *et al.*, 1999).

El efecto que el O₃ tiene sobre las plantas se puede clasificar en agudo o crónico. Los efectos agudos se observan como daño foliar visible cuando hay concentraciones de O₃ elevadas durante algunas o varias horas al día que sobrepasan la capacidad de defensa de la planta. Los síntomas de daño agudo en plantas de hoja ancha son: clorosis, blanqueamiento, bronceado, manchado, granulado y necrosis en una o ambas caras. En las coníferas se presentan puntas necrosadas, moteado y bandeado son los síntomas comunes (Krupa, *et al.*, 1998). Estos daños afectan el crecimiento y productividad de la planta (Chavone, *et al.*, 1998).

El conocimiento actual sobre el efecto crónico del O_3 en las plantas se basa principalmente en diferentes tipos de estudios ambientales controlados o semicontrolados de exposición al O_3 y en observaciones de campo, e incluyen el uso de plantas sensibles como bioindicadores (Manning y Krupa, 1992). Los efectos crónicos son producto de altas y bajas concentraciones de O_3 que afectan a la planta durante su ciclo de vida, caracterizados por estrés, reparación y compensación. Los síntomas de daño foliar (normalmente clorosis, senescencia temprana y abscesos) pueden ocurrir, pero siempre se evidencia la reducción en el crecimiento y la productividad (US EPA, 1996).

Las plantas responden al ozono con reacciones defensivas o compensatorias como cierre de los estomas, desintoxicación del ozono por reacciones químicas, ajustes por alteraciones en las rutas metabólicas, o la constante reparación de los tejidos dañados. Esta respuesta depende de la exposición al ozono, de factores ambientales que afectan tanto a la fotosíntesis de la planta como a la formación del ozono y su depósito en la superficie de la planta y de los mecanismos de defensa propios de la planta (Burrows, et al., 1976; Musselman y Massman, 1999).

El flujo de ozono hacia la planta durante el día puede causar cambios bioquímicos que resultan en reducción de la tasa fotosintética. Se ha demostrado que basta una exposición puntual al ozono para reducir la respuesta fotosintética durante el día, la magnitud de esa reducción depende de la magnitud del flujo de ozono y de la eficiente respuesta defensiva. Exposiciones repetidas o prolongadas causan mayores cambios en la respuesta fotosintética (Kley, 1999; Musselman y Massman, 1999).

Aparentemente no todas las reacciones de defensa de la planta al ozono, son en detrimento de la fotosíntesis. "En algunos casos, bajas concentraciones de ozono pueden resultar en aumento de la tasa fotosintética" (Guzy y Heath, 1993). Sin embargo, se ha comprobado que a concentraciones mayores o prolongadas termina por presentarse un decremento en la fotosíntesis (Musselman y Massman, 1999).

Evaluación de la respuesta de la vegetación al ambiente

Desde hace algunas décadas se han desarrollado varias investigaciones (e.g. Heck *et al.*, 1988; Manning y Krupa, 1992; Krupa y Legge, 1994) que relacionan la morfología y la fisiología de las plantas con el incremento de gases contaminantes en la atmósfera y sobre todo las altas concentraciones de éstos en las ciudades.

El ozono es uno de los contaminantes más comunes y es también uno de los más estudiados. Las primeras investigaciones se basaban en mediciones en ambientes y concentraciones de ozono ($[O_3]$) controladas. Actualmente la tendencia es a evaluar los efectos *in situ* utilizando instrumentos portátiles, como cámaras de O_3 . Sin embargo el uso de cámaras que permiten estudiar el efecto crónico del O_3 sobre diferentes plantas controlando tiempos de exposición y concentración, se hace problemático en árboles maduros (Manning y Krupa, 1992). La mayoría de los estudios con cámara se han enfocado en árboles en etapa de germinación, y es muy complicado intentar extrapolar los resultados obtenidos en plantas juveniles a árboles maduros, puesto que existen diferencias morfológicas, anatómicas, fisiológicas, funcionales y ecológicas entre ambos (Krupa y Legge, 1994) por lo tanto, se deben esperar respuestas diferentes ante el estrés (Kickert y Krupa, 1990; Sandeman, *et al.*, 1998).

Gran parte de los estudios realizados dentro de cámaras, consideran concentraciones de O_3 inferiores, iguales o superiores a las ambientales (Heck *et al.*, 1988). Sin embargo, en los últimos años ha crecido la discusión en torno a las diferencias microclimáticas entre la cámara y el ambiente (Manning y Krupa, 1992) puesto que el control en la cámara sobre las variables microclimáticas y la concentración de O_3 es constante a diferencia de las condiciones ambientales naturales (Krupa, 1997). Estas y otras consideraciones han generado un interés creciente en realizar estudios en el campo sin utilizar cámaras si no dispositivos transportables para realizar estudios comparativos entre plantas localizadas en ambientes similares pero con concentraciones de O_3 diferentes, o entre clones tolerantes y sensibles al O_3 (Krupa y Nosal, 1989).

Investigadores como Musselman y Massman (1999) han propuesto modelos generales del efecto del O₃ y variables ambientales sobre las plantas, aunque no se ha podido demostrar su aplicación para todas las especies estudiadas.

En múltiples investigaciones (Chappelka, 1997; Chevone, 1998; Soda 2000) se ha demostrado el efecto negativo que el O₃ tiene sobre el crecimiento de la planta y los daños morfológicos que puede causar a las hojas. Maier-Maercker (1998) reportó que el efecto que el estrés por O₃ causa a la planta es similar al estrés por sequía. Esta afirmación ha sido muy discutida debido a que se ha encontrado evidencia que demuestra que a bajas concentraciones de O₃ el efecto sobre el desarrollo de la planta es benéfico, bajo condiciones ambientales particulares, caracterizadas por la abundante humedad (Mansfield, 1998).

En México también se han realizado trabajos semejantes (e.g. Hernández, *et al.*, 1984; Bauer, *et al.*, 1985; Alvarado, *et al.*, 1993) todos enfocados principalmente en los daños físicos que el O₃ causa a las plantas en los parques o reservas naturales aledañas a la Ciudad de México.

Skelly *et al.* (1997) evaluaron el daño causado por el O₃ en las hojas de encinos en el Desierto de los Leones y reportaron un mayor daño por O₃ en los árboles que se encontraban aislados o poco protegidos, mientras que en los árboles más agrupados, en cañadas y con la copa más protegida el daño por O₃ fue menor.

Alvarez *et al.* (1998) evaluaron y describieron el efecto del O₃ en comunidades de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones y reportaron daños graves principalmente en las células del parénquima en empalizada. Explicaron este daño como síntoma de una senescencia prematura causada por daño crónico.

Zambrano y Nash (2000) evaluaron la respuesta de líquenes al ser trasplantados al Desierto de los Leones y sometidos a contaminación por O₃. Encontrando un decaimiento fisiológico de los líquenes, expresado en la reducción de la tasa de fijación de carbono, que en ese caso

se debió a la degradación de la clorofila B y concluyeron que la concentración de O₃ existente en las cercanías de la Ciudad de México es suficientemente alta para dañar a los líquenes que habitan la región.

Las investigaciones realizadas en México se han enfocado a las áreas verdes aledañas a la Ciudad de México, pero hasta ahora son pocos los trabajos que evalúan el efecto del ambiente y de los contaminantes sobre las plantas dentro de la ciudad. Investigaciones como la de Ramos-Vázquez y Barradas (1998) pueden considerarse entre las pocas realizadas, aunque no consideran el efecto del O₃.

Hipótesis

Las variables microambientales radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura del aire (T_a) y déficit de presión de vapor (DPV) tendrán un efecto menos limitante en la conductividad estomática (g_s) durante la estación húmeda.

La concentración de ozono ($[O_3]$) tendrá un efecto negativo sobre la conductividad estomática (g_s) en la estación seca y la húmeda, además de causar daño foliar debido a la exposición crónica.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de las variables microambientales (T_a , DPV, RFA) y el ozono ($[O_3]$) en la conductividad estomática (g_s) y daño foliar de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* como parte del arbolado urbano al sur de la Ciudad de México en las estaciones seca y húmeda.

Objetivos particulares:

Caracterizar el microambiente (T_a , DPV, RFA) y la $[O_3]$ en la vecindad inmediata de árboles estudiados del arbolado urbano al sur de la Ciudad de México

Cuantificar la conductividad estomática (g_s) de los árboles estudiados del arbolado urbano al sur de la Ciudad de México de las especies *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum*.

Evaluar el grado de daño foliar que se presenta a lo largo del estudio en ambas especies.

Evaluar el efecto del microambiente y de la concentración de ozono sobre la conductividad estomática (g_s) y el daño foliar de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum*.

Materiales y Método

Sitio de estudio

La Ciudad de México se encuentra en la parte baja de la cuenca de México, que es una cuenca hidrográfica endorreica. Esta cuenca está situada en la porción central del país y en el extremo meridional de la provincia fisiográfica llamada Altiplanicie Mexicana. Definida con cierto criterio hidrológico, esta cuenca tiene una superficie aproximada de 7500 km² y su forma es ligeramente alargada en el sentido NNE-SSW. Su eje mayor es de unos 130 km, mientras que la anchura máxima alcanza cerca de 90 km. Las coordenadas geográficas correspondientes a los puntos extremos son: 19° 02' y 20° 12' de latitud N, 98° 28' y 99° 28' de longitud W (Rzedowski, 1979). Borja Osomo (1948) calcula que aproximadamente 5/8 de la superficie total del Valle de México están ocupados por terrenos planos, mientras que los restantes 3/8 corresponden a la zona montañosa.

Por su latitud entre 19° y 21°, así como por su altitud superior a 2000 m.s.n.m, la cuenca se caracteriza por un clima templado (García, 1988). Con valores de temperatura media anual (16.3 °C) y sin estaciones térmicas marcadas, en cambio las estaciones hídricas pueden ser manifiestas (Rzedowski, 1979). El 93% de la precipitación pluvial promedio anual en la Ciudad de México (700 mm) se presenta durante la estación lluviosa (mayo-octubre). Los demás meses se caracterizan por una condición seca, de la que se puede diferenciar un período seco-frío (noviembre-enero) y uno seco-caluroso (febrero-mayo) (Ramos-Vázquez y Barradas, 1998). Además, la Ciudad de México posee algunos rasgos propios, entre los que destacan las marcadas diferencias de temperatura que ocurren a menudo durante el día (Jáuregui, 1971; Jáuregui y Tejeda 1997).

Otro de los factores determinantes y de mayor significado para el clima del Valle de México son los vientos alisios, procedentes del Golfo de México, que acarrear el aire húmedo necesario para las precipitaciones. Durante la parte seca del año predominan con frecuencia vientos secos que provienen del Norte (Rzedowski, 1979).

Desde 1986, la Ciudad de México presenta problemas serios de contaminación por ozono y aunque se han instaurado varios programas para intentar reducirla, ésta sigue siendo el principal factor contaminante (Bravo, 1998 y Bravo, 2000).

De acuerdo con la estación de monitoreo de contaminantes localizada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera en Ciudad Universitaria (CU) la zona suroeste de la ciudad es la más afectada por el ozono. Esto se debe al acarreo de precursores por los vientos provenientes desde el norte de la ciudad hacia el suroeste (Bravo, *et al.*, 1997).

Desde el punto de vista florístico, el Valle de México tiene una situación privilegiada, pues a la gran diversidad de hábitats se une su ubicación en la mitad meridional de la República Mexicana que se considera como una de las regiones más ricas en el mundo en cuanto a su flora (Rzedowski, 1979; Ezcurra, 2000;) hasta inicios del siglo XX la zona de estudio estaba cubierta por bosques de encinos o formaba parte del pedregal de San Ángel, con su muy particular vegetación (Ezcurra, 2000; Garza, 1999).

La vegetación urbana en la Ciudad de México, está limitada a parques y jardines públicos, camellones, banquetas, jardines privados y terrenos baldíos y es muy rica en especies introducidas (Rapoport, *et al.*, 1983; Garza, 1987; Chacalo y Martínez, 1996). Esta vegetación está sometida a constantes podas y otros factores de estrés. Las especies nativas se ven afectadas por la presencia de las especies introducidas que tienen una mayor capacidad para adecuarse a estas condiciones.

Esta investigación se desarrolló en la zona sur de la Ciudad de México, que se caracteriza por un microclima particular y desde hace años es la zona de la ciudad que presenta los valores de contaminación por ozono más altos (Bravo, *et al.*, 1997)(figura 1).

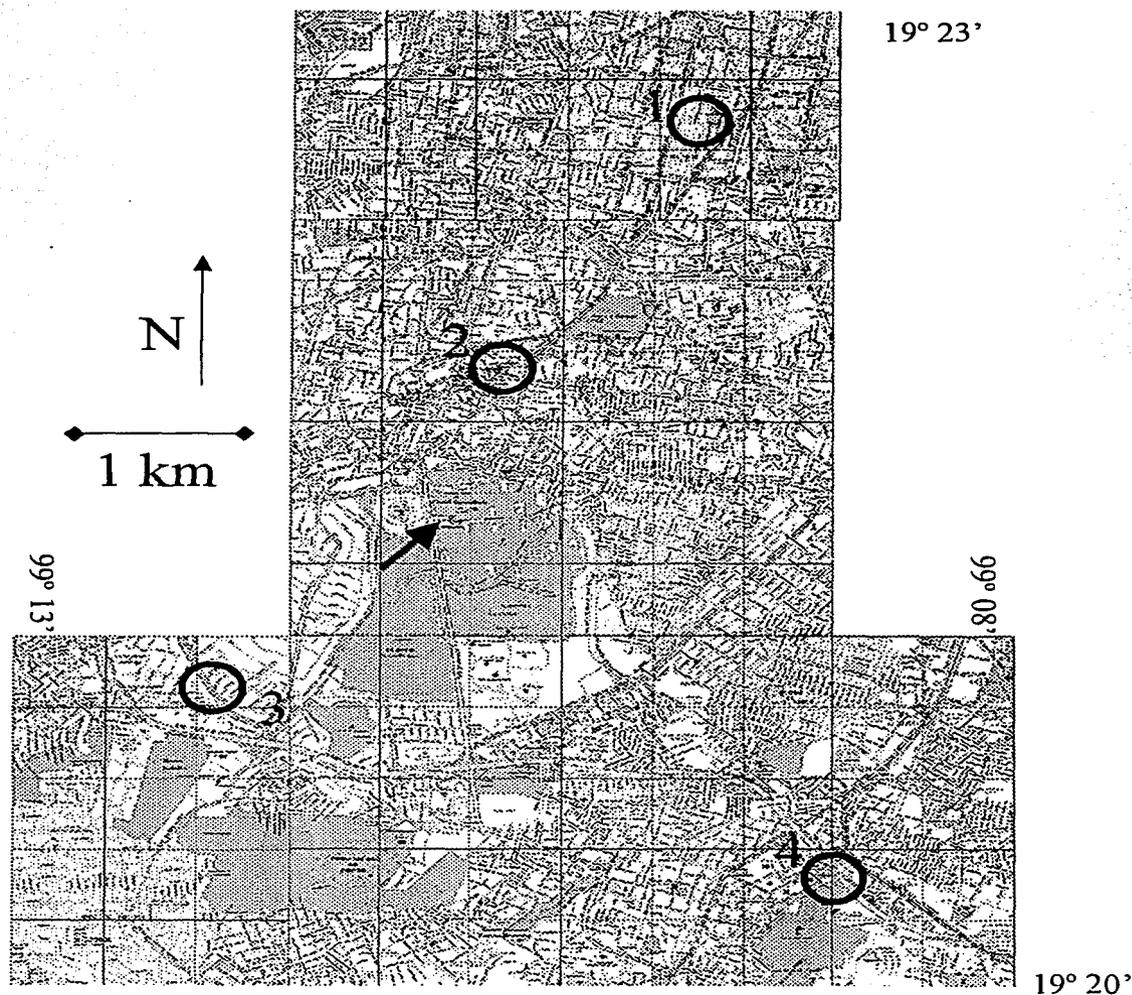


Figura 1. Mapa de la Zona de estudio (Suroeste de la Ciudad de México), los círculos rojos indican las localidades seleccionadas, Parque Villa (1), Parque Tagle (2), Boulevard de la Luz (3) y Viaducto Tlalpan (4), la flecha indica la ubicación de la estación meteorológica del Colegio de Geografía de la UNAM en Ciudad Universitaria.

Material vegetal

El fresno (*Fraxinus uhdei*) y el trueno (*Ligustrum lucidum*) son dos de las especies más abundantes en el arbolado urbano de la Ciudad de México (Corona-Nava, 1994). La primera especie es nativa y la segunda es introducida.

Fraxinus uhdei (Wenzling) Lingelsh: Árbol dioico hasta de 25 m de alto, de corteza rugosa y estriada; caducifolio, hojas de 5 a 9 folios, casi sésiles a delgadamente peciolulados, lanceolados, oblongo-lanceolados o elípticos, de 5 a 15 cm de largo, de 1.5 a 5 cm de ancho, ápice largamente atenuado, bordes finamente dentados o serrulados, base obtusa, redondeada o aguda, membranosos o algo engrosados, haz glabro, envés verde claro, generalmente a lo largo de la nervadura media, pero glabro en el resto; panículas de 7 a 20 cm de largo, raramente más pequeñas, muy ramificadas, laxas o densas; flores con un diminuto cáliz tetradentado, pétalos ausentes, las flores masculinas con dos estambres de 0.3 a 0.5 cm de largo, las femeninas con un pistilo de 0.4 a 0.7 cm de largo, estilo bifido; samara de 2.5 a 4 cm largo, con un pequeño cuerpo oscuro más o menos cilíndrico, de alrededor de 0.7 cm de largo, con un ala alrededor de 0.5 cm de ancho, obtusa o algo emarginada en el ápice (Chacalo y Martínez, 1996).

Ligustrum lucidum (Ait): Nativo de China, Japón y Corea, árbol monoico perennifolio alcanza hasta 10 m de altura, ramas dispersas y lenticeladas, copa redondeada u oblonga. Crecimiento rápido cuando joven y luego muy lento a la madurez, vive al rededor de 30 años. Hojas simples, opuestas, de forma oval u oblongo-elíptica miden de 4 a 6 cm de largo, ápice obtuso a agudo, base redondeada, margen entero algo revoluto, aplanada u ondulada sobre la superficie, gruesa, correosa, rígida; haz color verde oscuro, lustroso y glabro, nervadura principal verde-amarillenta; envés color verde mucho más pálido, glabro; peciolo glabro de 0.6 a 2 cm de largo. Las flores, se desarrollan en panículas terminales de 10 a 23 cm de largo y casi igual de ancho, flores blancas perfectas sésiles o subsésiles, corola en forma de bandeja con un conducto corto, cuatro lóbulos extendidos, cáliz campanulado, dos estambres, estilo cilíndrico, ovario con dos lóbulos con dos óvulos; florece en verano. Fruto drupa semejante a una baya oblonga, color azul, negro de cerca de

1 cm de largo; fructifica en otoño. Corteza lisa, color gris claro u oscuro o casi negro, el de las ramas es color gris a café con numerosas lenticelas (Chacalo y Martínez, 1996).

Estructura de las mediciones y criterios de inclusión y exclusión

Las mediciones se realizaron durante el año 2001, en el período febrero-septiembre, incluyendo las estaciones climáticas de la Ciudad de México (seca y húmeda) En cada una de las estaciones se planearon tres sesiones de medición por localidad.

Se seleccionaron cuatro localidades diferentes, dos camellones (Viaducto Tlalpan y Boulevard de la Luz) y dos parques (Tagle y Francisco Villa) todas en la zona suroeste de la Ciudad de México (figura 1). Cada localidad contaba como mínimo con tres individuos de *Fraxinus uhdei* y tres de *Ligustrum lucidum*. En cada localidad se seleccionaron tres individuos de *Fraxinus uhdei* y tres individuos de *Ligustrum lucidum*, seis individuos por localidad a los que se midió siempre en todos los períodos de medición. Los árboles no debían ser muy altos para poder tener acceso a las hojas utilizando una escalera (1.80 m).

Precipitación y temperatura

Para definir la precipitación y temperatura de las localidades se utilizaron los datos de la estación meteorológica del Colegio de Geografía de la UNAM cuya estación meteorológica se encuentra en Ciudad Universitaria a 4.7 km al NW de Viaducto Tlalpan, 3.6 km al E de Boulevard de la Luz, 2.9 km al S del Parque Tagle y 5.2 km al S del Parque Villa (figura 1).

Medición de variables fisiológicas y ambientales

De cada individuo se seleccionaron tres hojas, cada hoja con diferente orientación (una hoja orientada al sur otra al oeste y otra al este), todas las hojas seleccionadas debían tener un tamaño suficiente para poder ser introducidas a la cámara del porómetro y, además, ser hojas maduras. La selección de las tres hojas se repetiría en cada sesión de mediciones.

Las sesiones consistieron en bloques de mediciones cada dos horas iniciando a las 8:00 y terminando a las 16:00 hora local (hl). En total fueron cinco bloques de mediciones por sesión.

A cada una de las tres hojas seleccionadas por individuo se le realizaron mediciones de conductividad estomática (gs), transpiración (TRP) y temperatura de la hoja (Th), con un porómetro por difusión (LI-1600, LI-COR, Inc, Lincoln USA).

También se realizaron mediciones de variables ambientales al mismo tiempo de las mediciones de gs. Las variables consideradas fueron la radiación fotosintéticamente activa (RFA, con un sensor Quantum Licor, Inc.), temperatura del aire (Ta) y humedad relativa (HR), con sensores que forman parte del conjunto del porómetro.

La concentración de ozono se midió con un sensor de ozono (Ozone Sensor A-21Z, Eco Sensors Inc. Santa Fe, NM, USA), colocando el sensor lo más próximo posible a la hoja.

Evaluación del daño foliar, área foliar, índice estomático y preparación de muestras

Al final de cada sesión de mediciones fisiológicas y ambientales y de manera aleatoria se cortaba una de las tres hojas medidas en cada árbol, haciendo un total de seis hojas por localidad, tres de *Fraxinus uhdei* y tres de *Ligustrum lucidum*.

Inmediatamente después de haber cortado las hojas, se les rotuló y de cada una se dibujó una copia del perímetro sobre papel, para su posterior medición del área foliar. También a cada una de las hojas se les calculó el daño foliar (proporción necrosado) utilizando una cuadrícula hecha sobre acetato y con cuadrillos de 1 mm². De este modo se evaluó el espacio total ocupado por la hoja y el espacio en los que aparecían marcas de necrosamiento, para así obtener la proporción necrosada como sigue:

Proporción necrosada= área foliar necrosada/área foliar

Seguidamente, de cada una de las hojas seleccionadas se les tomó una muestra de 1.5 x 1.5 cm y por medio de la técnica de réplica con cianoacrilato, modificada en este trabajo con el uso de pesas, se obtuvieron las imágenes negativas de los enveses de las hojas, que se conservaron en portaobjetos para luego observarlas al microscopio (Provis AX70, Olympus; Japón). Cada preparación fue fotografiada siguiendo los siguientes criterios:

Fotomicrografía de preparaciones de *Fraxinus uhdei*

Iluminación: Contraste diferencial de interferencia (CDI)

Aumento en el negativo: 100x

Fotomicrografía de preparaciones de *Ligustrum lucidum*

Iluminación: Contraste diferencial de interferencia (CDI)

Aumento en el negativo: 20x

Se contó el número de células incluidas en el campo visual fotografiado. Distinguiendo entre las células estomáticas y el resto de las células epidérmicas, se obtuvo el índice estomático (IE), que es un índice adimensional.

$$IE = (\text{número de células estomáticas} / \text{número total de células}) \times 100$$

Sólo en dos ocasiones, y para obtener una preparación en la que se evidenciara un posible daño, se obtuvo por corte transversal a mano libre una muestra de *Fraxinus uhdei* y de *Ligustrum lucidum* y por disociado mecánico una muestra de epidermis de la misma especie. Ambas muestras fueron montadas en jalea glicerinada adicionada con azul de metileno de las que se obtuvieron fotomicrografías.

Captura, manejo y análisis de datos:

Todos los datos se ingresaron en hojas de cálculo (Excel y Acces; Microsoft, USA), que permitieron manipularlos para su análisis estadístico. El análisis estadístico de los datos se realizó con los programas SPSS versión 8.0, Table Curve 2D versión 3 y Sigma Plot versión 5.0 (Jandel Scientific; SPSS, Inc; Illinois, USA)

Los análisis estadísticos realizados fueron:

Análisis descriptivos de los datos, para obtener medias, valores máximos y mínimos, desviaciones estándar y errores estándar.

Análisis de Varianza de una vía para comparar las variables entre estaciones, localidades y temporadas.

Con el fin de evaluar el efecto que cada variable ambiental tiene sobre la conductividad estomática se realizaron análisis de curvas envolventes. Este método consiste en seleccionar los datos del probable límite superior de la función representada por la nube de puntos en cada uno de los diagramas producidos al graficar la conductividad estomática como función de cualquier variable. Este método tiene tres supuestos: 1) que la función envolvente representa la respuesta óptima de la conductividad estomática a la variable seleccionada (e.g. RFA), 2) los puntos que caen por debajo de la función seleccionada son el resultado de un cambio en cualquiera de las otras variables (e.g.. DPV, Ta ó [O₃]) y 3) que no existen interacciones sinérgicas (Jarvis, 1976; Fanjul y Barradas, 1985; Jones, 1992; Ramos-Vázquez y Barradas, 1998).

Las curvas utilizadas para cada variable ambiental que se ajustaron a los datos fueron de las siguientes formas:

Para la función de gs en función de RFA los datos envolventes se ajustaron a una hipérbola:

$$g_s(RFA) = (a RFA)/(b + RFA)$$

Para la relación g_s en función de la T_a los datos envolventes se ajustaron a una ecuación cuadrática:

$$g_s (T_a) = A + B T_a + C T_a^2$$

Para la relación g_s en función del DPV los datos envolventes se ajustaron a una ecuación lineal simple:

$$g_s (DPV) = \alpha + \beta DPV$$

Para la relación g_s en función de la $[O_3]$ también los datos envolventes se ajustaron a una ecuación lineal simple de la forma:

$$g_s ([O_3]) = M + N [O_3]$$

La relación entre la g_s y las variables RFA, T_a y DPV es bien conocida (Jarvis, 1976; Jones y Higgs, 1989 y Jones, 1992; Ramos-Vázquez y Barradas, 1998), mientras que para la relación del ozono con la g_s no se cuenta con modelos sólidos y se decidió ajustar los puntos envolventes a una ecuación lineal simple por considerarla como la más sencilla.

Con base en las curvas envolventes de g_s en función de las variables microambientales (RFA, T_a , DPV y $[O_3]$) se generaron modelos generales de curvas envolventes (Jarvis, 1976) para ambas especies en las estaciones seca y húmeda.

También se realizaron regresiones múltiples para obtener un modelo del efecto de las variables ambientales sobre la conductividad estomática de ambas especies. Ésta es una de las aproximaciones más usadas en el análisis del efecto de diferentes factores en la conductividad estomática ya que determina el peso de cada factor microambiental o fisiológico.

Resultados

VARIABLES AMBIENTALES

Condiciones climáticas

Durante el período febrero-septiembre del 2001, las temperaturas más bajas se registraron los primeros días de febrero ($< 3^{\circ}\text{C}$), mientras que los picos de temperaturas elevadas ($> 27^{\circ}\text{C}$) se presentaron entre marzo y mayo. Junio, julio y agosto fueron meses templados a excepción de un par de descensos bruscos de temperatura (figura 2). Los últimos días de agosto fueron más calurosos alcanzando hasta 27°C . Esto probablemente se debió a la canícula (sequía intraestival) característica de este período, pues al reiniciarse la lluvias en septiembre, bajó nuevamente la temperatura.

Por otro lado las lluvias fueron escasas con algunos chubascos entre febrero y abril; en mayo se presentaron las primeras lluvias, y en junio se registró la máxima precipitación (48 mm). La canícula se presentó los últimos días de agosto, y en septiembre se presentaron también lluvias abundantes (figura 2).

Radiación fotosintéticamente activa

La radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente en las hojas seleccionadas, en todas las localidades se incrementó al transcurrir el día desde un mínimo ($7.67 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) registrado a las 8 de la mañana hasta alcanzar un máximo ($453.17 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) hacia el mediodía para posteriormente disminuir. Los valores máximos de RFA se registraron entre las 10:00 y las 14:00 h. La característica más notable de RFA fue su gran variabilidad (figura 3A), que se registró a cualquier hora, localidad y estación. Por otro lado, al comparar los valores de RFA entre la estación seca y húmeda se encontraron diferencias significativas teniendo una intensidad más alta en la estación seca ($141.48 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) que en la húmeda ($91.11 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ($F = 5.973_{(1,98)}$, $P = 0.16$) lo que se debe probablemente a la mayor nubosidad que se presentó en la estación húmeda.

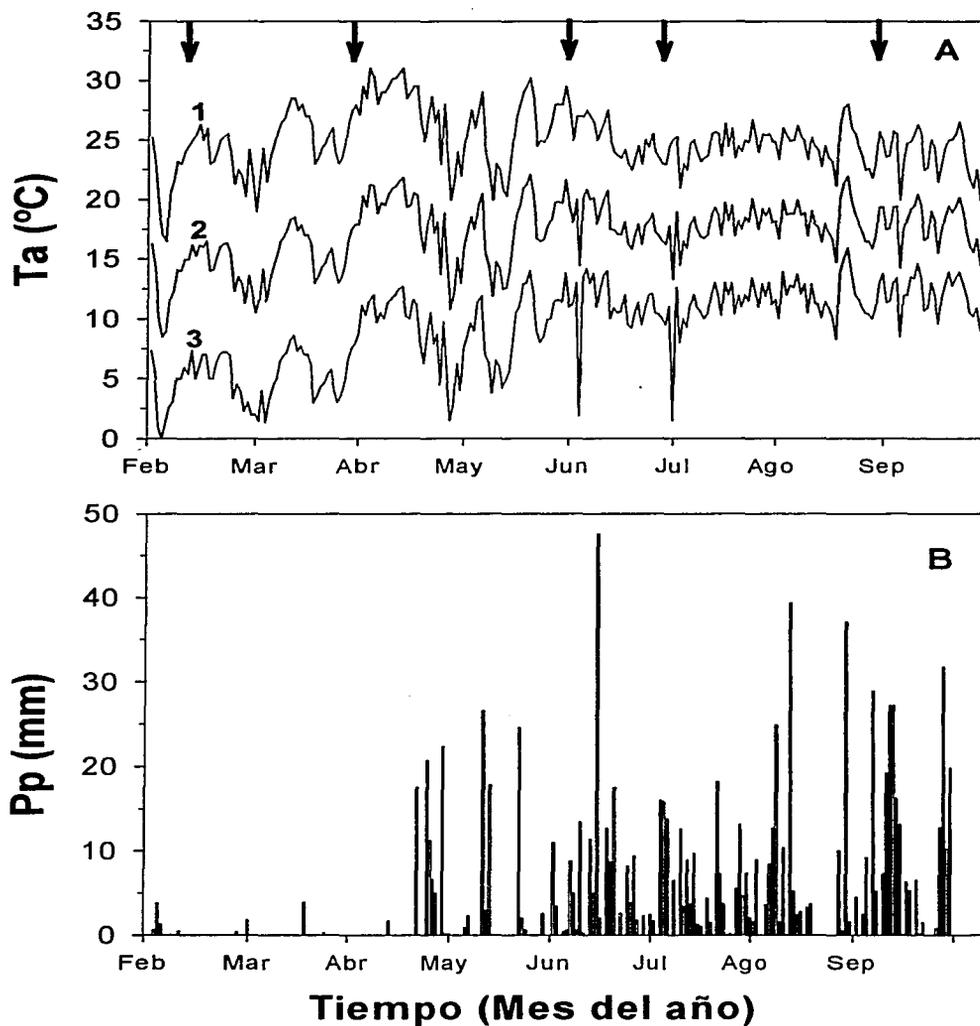


Figura 2. Termograma (A), temperatura (Ta) máxima (1), media (2) y mínima (3) y precipitación pluvial (Pp) (B), registradas durante el período febrero-septiembre del 2001, en la estación meteorológica del Colegio de Geografía de la UNAM de Ciudad Universitaria. Las flechas indican las sesiones de medición.

También se comparó RFA entre localidades, encontrando diferencias significativas tanto en la comparación en la estación seca como en la húmeda; en la estación seca la intensidad más baja se registró en el Parque Villa ($X = 36.54 \pm 25.49 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) contrastando con el Parque Tagle ($X = 117.89 \pm 86.46 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Viaducto Tlalpan ($X = 155.54 \pm 119.3 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y Boulevard de la Luz ($215.4 \pm 107.7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ($F = 5.18_{(3,49)}$, $P = 0.003$). En la estación húmeda Viaducto Tlalpan presentó la media más baja ($X = 50.01 \pm 31.31 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) debajo de Boulevard de la Luz ($X = 117.62 \pm 107.6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y Parque Tagle ($X = 143.39 \pm 115.3 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ($F = 5.966_{(2,44)}$, $P = 0.005$) (figura 4A) (ver anexo). En la estación húmeda no se realizaron mediciones en el Parque Villa debido al constante riego y lluvia que impedía tener hojas secas. La diferencia entre localidades posiblemente se debió a la arquitectura de cada localidad, la densidad vegetal y la frecuencia de riego, así como el mantenimiento.

Temperatura del aire

La temperatura del aire (T_a) no varió mucho entre las dos estaciones y no se encontraron diferencias significativas entre la estación seca ($X = 22.52 \pm 4.69 \text{ }^\circ\text{C}$) y la húmeda ($X = 22.59 \pm 3.28 \text{ }^\circ\text{C}$) ($F = 0.007_{(1,98)}$, $P = 0.935$). Las temperaturas extremas que se registraron fueron en la estación seca 13.9 y $31.13 \text{ }^\circ\text{C}$ y durante la húmeda 16.8 y $29.42 \text{ }^\circ\text{C}$. En ambas estaciones la temperatura media más elevada se alcanzó después del mediodía, en la época seca a las 16:00 h ($X = 26.8 \pm 1.10 \text{ }^\circ\text{C}$) y en la húmeda a las 14:00 h ($X = 26.31 \pm 1.52 \text{ }^\circ\text{C}$) (figura 3B). Durante la estación seca la temperatura fue semejante entre las localidades Viaducto Tlalpan ($X = 23.3 \pm 4.9 \text{ }^\circ\text{C}$), Boulevard de la Luz ($X = 23.7 \pm 4.8 \text{ }^\circ\text{C}$) y Parque Tagle ($X = 22.9 \pm 4.13 \text{ }^\circ\text{C}$) contrastando con los registros del Parque Villa ($X = 18.11 \pm 1.47 \text{ }^\circ\text{C}$) que fueron inferiores, esto probablemente se debe al frecuente riego, el mantenimiento y el denso dosel que caracteriza a esa localidad. Durante la estación húmeda las localidades Viaducto Tlalpan ($X = 22.36 \pm 3.89 \text{ }^\circ\text{C}$), Boulevard de la Luz ($X = 23.43 \pm 2.71 \text{ }^\circ\text{C}$) y Parque Tagle ($X = 22.18 \pm 2.49 \text{ }^\circ\text{C}$) (figura 4B) fueron nuevamente muy semejantes y no se encontraron diferencias significativas al compararlas

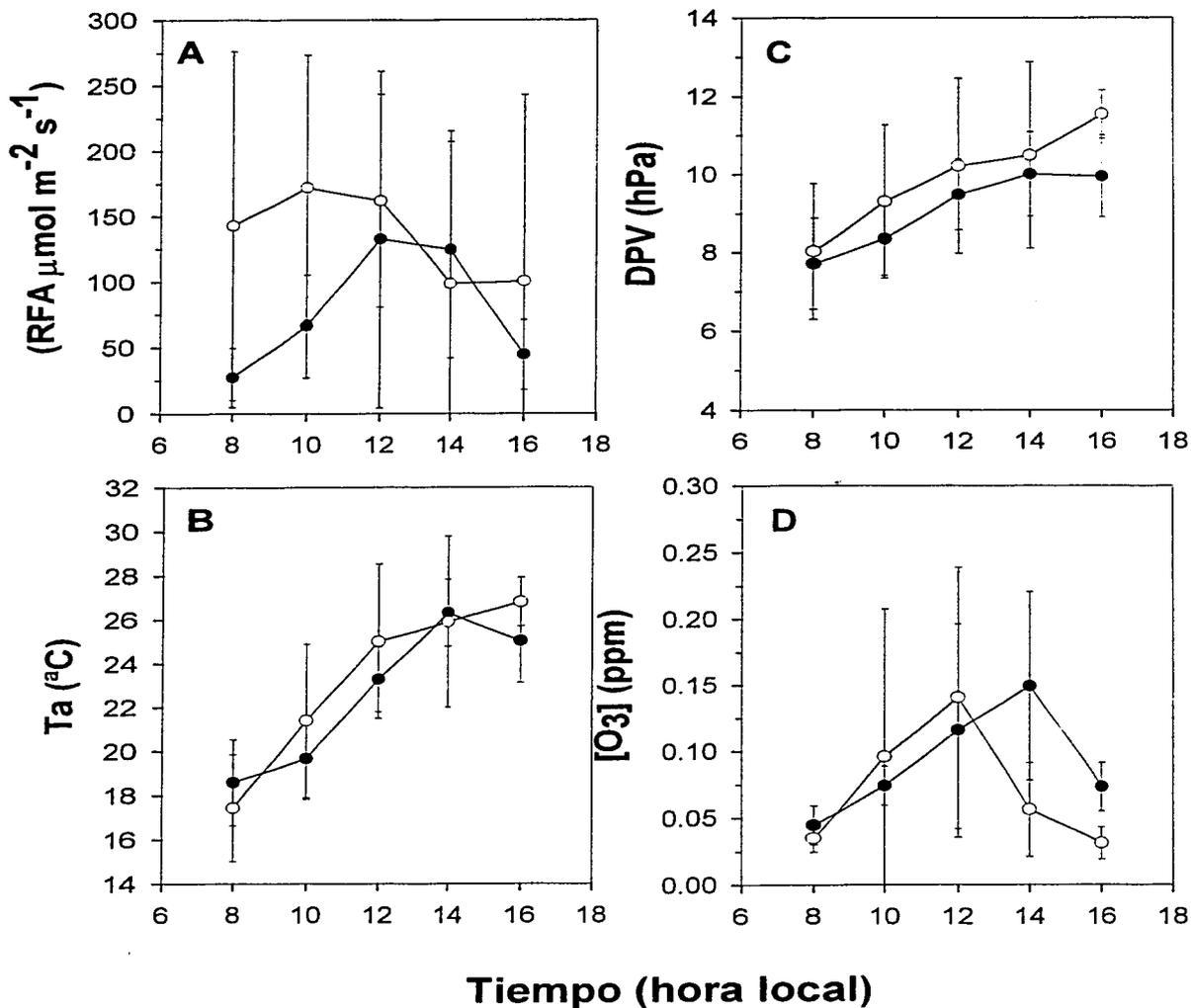


Figura 3. Valores de RFA (A), T_a (B), DPV (C) y $[\text{O}_3]$ (D) durante el día en todas las localidades en la estación seca (símbolos abiertos) y la húmeda (símbolos cerrados). Los símbolos representan la media de todos los valores de cada hora en todas las localidades y las barras el error estándar.

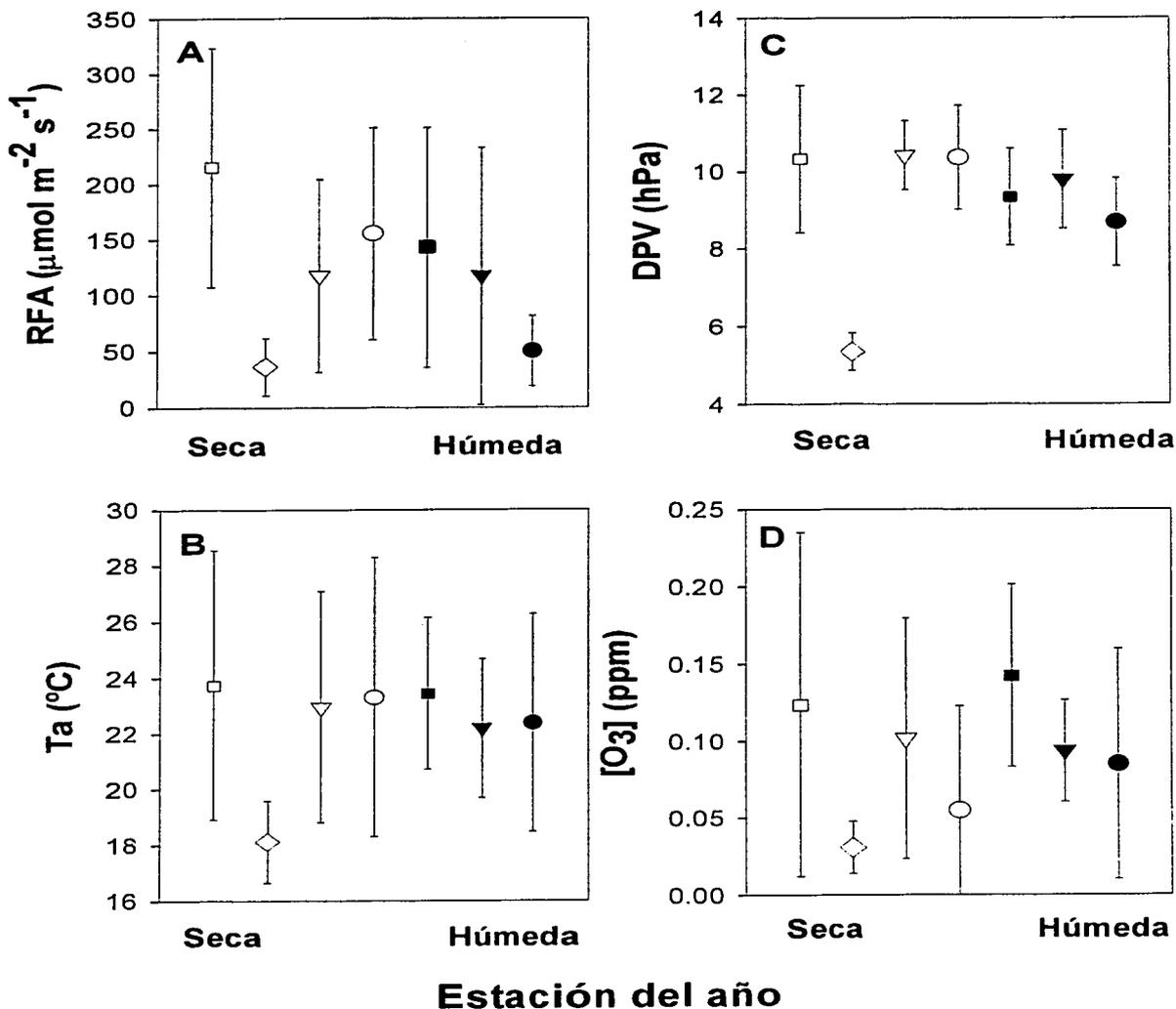


Figura 4. Valores de RFA (A), Ta (B), DPV (C) y [O₃] (D) en el Boulevard de la Luz (□), Parque Villa (◇), Parque Tagle (▽) y Viaducto Tlalpan (○), en las estaciones seca (símbolos abiertos) y húmeda (símbolos cerrados). Los símbolos representan la media de todos los valores en cada estación y las barras el error estándar.

($F = 0.534_{(2,44)}$ $P = 0.59$) (ver anexo). El Parque Villa al igual que con los datos de RFA no se consideró en la estación húmeda.

Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor (DPV) se incrementó durante el día desde un mínimo de 4.7 hPa hasta las 14:00 y 16:00 h cuando se alcanzaron los valores máximos de ambas estaciones, seca de 12.25 hPa y húmeda de 11.47 hPa (figura 3C). El comportamiento del DPV fue muy similar en las dos estaciones y aunque no se encontraron diferencias significativas, el DPV en la estación seca ($X = 9.60 \pm 2.22$ hPa) presentó una tendencia a ser mayor que en la estación húmeda ($X = 9.12 \pm 1.26$ hPa) ($F = 1.69_{(1,98)}$ $P = 0.196$). Entre localidades el DPV no varió mucho manteniendo la mayoría de los valores entre 8 y 12 hPa en ambas temporadas, a diferencia del Parque Villa con un DPV inferior a las demás localidades ($X = 5.34 \pm 0.475$) ($F = 32.7_{(3,39)}$ $P = 0.00$) (figura 4C) (ver anexo). Para la estación húmeda no se consideró al Parque Villa.

Concentración de ozono

La concentración de ozono ($[O_3]$) presentó valores bajos temprano en la mañana y en la tarde después de las horas de mayor luminosidad, los valores máximos se registraron a las 12:00 (0.30 ppm) y 14:00 h (0.28 ppm). En la estación seca la media máxima se alcanzó a las 12:00 h ($X = 0.13881 \pm 0.1097$ ppm) y en la húmeda a las 14:00 h ($X = 0.1494 \pm 0.0712$ ppm) (figura 3D). Al comparar entre estaciones no se encontraron diferencias significativas entre la estación seca ($X = 0.0871 \pm 0.1187$) y la húmeda ($X = 0.1147 \pm 0.0956$ ppm) ($F = 1.610_{(1,98)}$ $P = 0.207$). También se compararon las localidades en ambas estaciones (figura 4D), en la estación seca la localidad con la mayor $[O_3]$ fue Boulevard de la Luz ($X = 0.1270 \pm 0.1065$ ppm) seguida del Parque Tagle ($X = 0.1015 \pm 0.0781$ ppm), Viaducto Tlalpan ($X = 0.0548 \pm 0.0680$ ppm) y el Parque Villa ($X = 0.0306 \pm 0.04689$ ppm) con la concentración más baja ($F = 3.85_{(3,49)}$ $P = 0.015$). Durante la estación seca la mayor $[O_3]$ nuevamente se registró en Boulevard de la Luz ($X = 0.1430 \pm 0.0602$ ppm) seguido por

Parque Tagle ($X = 0.0934 \pm 0.033$ ppm) y Viaducto Tlalpan ($X = 0.0848 \pm 0.0747$ ppm) con diferencias significativas ($F = 6.806_{(2,44)}$ $P = 0.003$) (ver anexo). Al igual que para las demás variables microambientales la $[O_3]$ en el Parque Villa sólo se midió durante la estación seca.

Conductividad estomática

La conductividad estomática tanto de *Fraxinus uhdei* como *Ligustrum lucidum* se comportó de manera semejante a lo largo del período de mediciones (febrero-septiembre) y no fue posible encontrar diferencias significativas entre la gs de *Fraxinus uhdei* ($X = 0.37 \pm 0.38$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) y la de *Ligustrum lucidum* ($X = 0.34 \pm 0.38$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) ($F = 0.153_{(1,98)}$ $P = 0.69$), las dos especies presentaron valores de gs bajos en la estación seca y se incrementaron hacia la estación húmeda alcanzando los valores máximos de gs en septiembre (figura 5).

En las dos especies durante la estación seca la gs no cambió mucho a lo largo del día y fue poca su variabilidad. En la estación húmeda la gs de ambas especies fue semejante aunque se presentó mayor variabilidad, las dos especies registraron las mayores medias de gs a las 10:00 h *Fraxinus uhdei* ($X = 0.62 \pm 0.48$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) y *Ligustrum lucidum* ($X = 0.71 \pm 0.5$ mmol $m^{-2}s^{-1}$). Al comparar la gs de *Fraxinus uhdei* en la estación seca ($X = 0.15 \pm 0.13$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) fue menor a la presentada en la estación húmeda ($X = 0.56 \pm 0.42$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) ($F = 17.94_{(1,44)}$ $P = 0.00$). Este mismo comportamiento lo presentó *Ligustrum lucidum* en la estación seca ($X = 0.14 \pm 0.13$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) y la húmeda ($X = 0.61 \pm 0.44$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) siendo diferentes ($F = 31.03_{(1,53)}$ $P = 0.00$) (figura 6). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre la gs de *Fraxinus uhdei* ($X = 0.37 \pm 0.38$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) y la de *Ligustrum lucidum* ($X = 0.34 \pm 0.38$ mmol $m^{-2}s^{-1}$) ($F = 0.153_{(1,98)}$ $P = 0.69$).

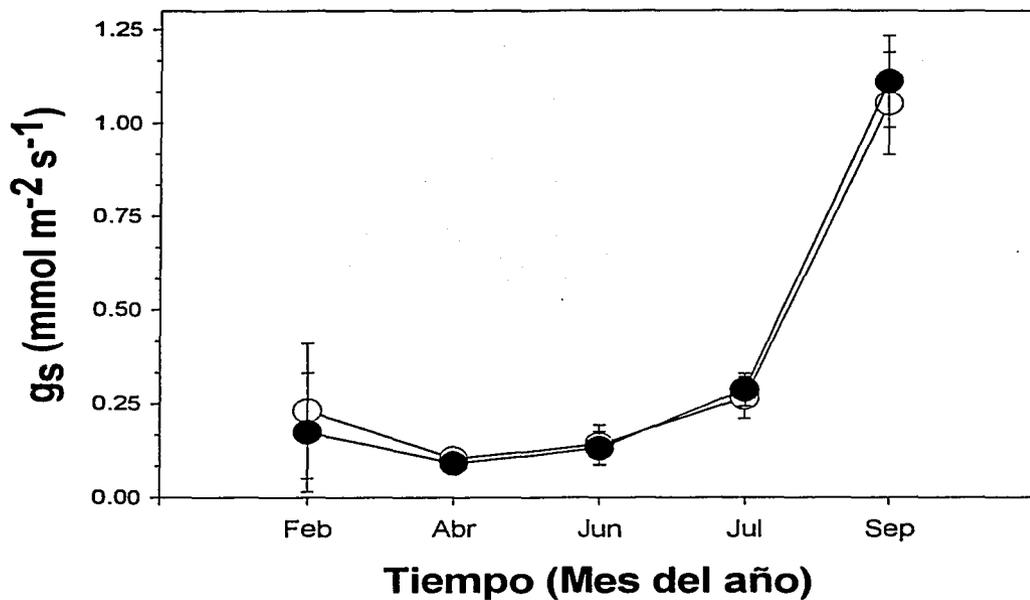


Figura 5. Conductividad estomática de *Fraxinus uhdei* (símbolos abiertos) y *Ligustrum lucidum* (símbolos cerrados) a través del período de mediciones (febrero-septiembre). Los símbolos representan las medias de los valores de cada mes en todas las localidades y las barras el error estándar.

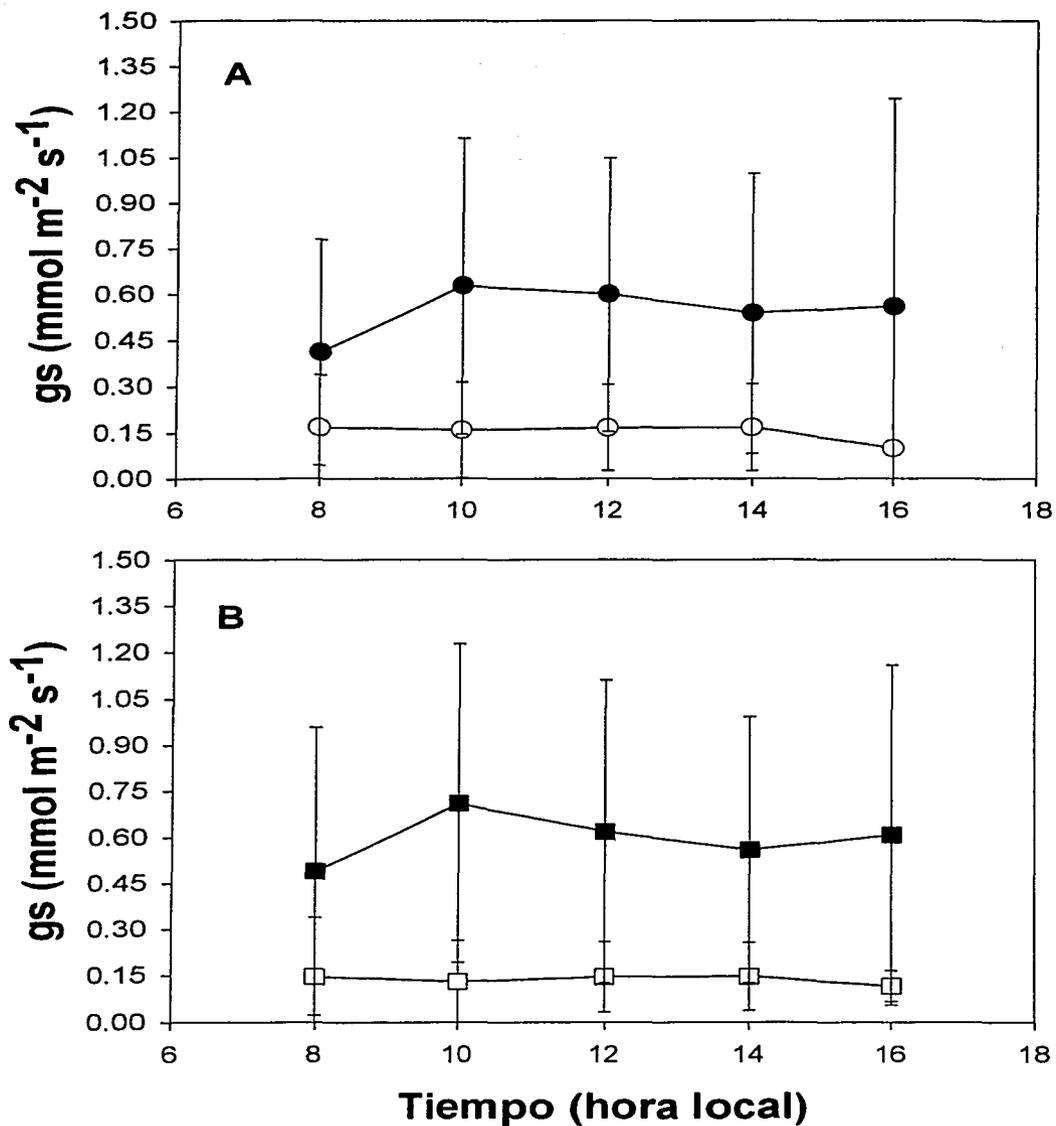


Figura 6. Comportamiento diario de la conductividad estomática de *Fraxinus uhdei* (A) y *Ligustrum lucidum* (B) en la estación seca (símbolos abiertos) y húmeda (símbolos cerrados). Los símbolos representan las medias de los valores de cada hora en todas las localidades y las barras el error estándar.

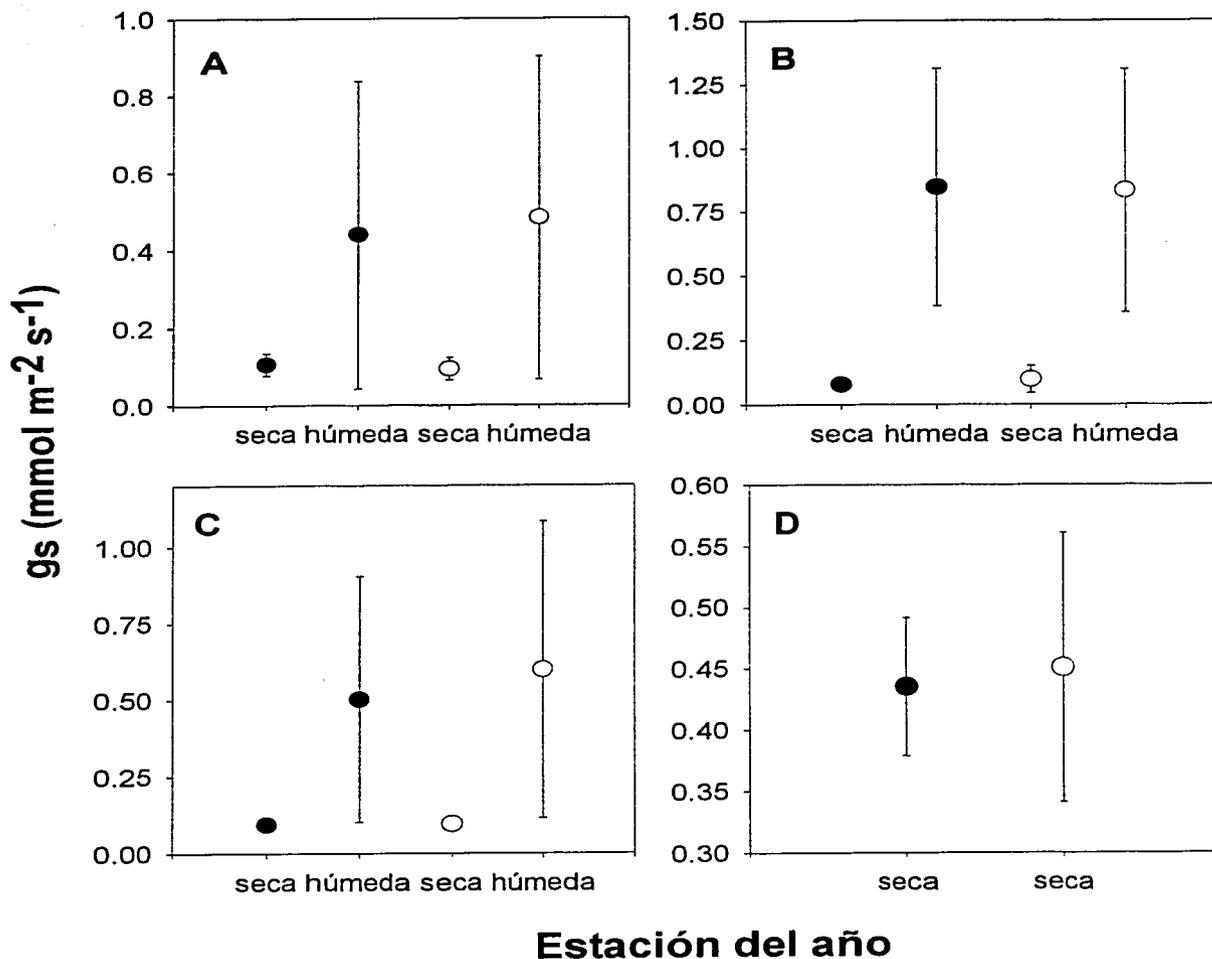


Figura 7. Conductividad estomática de *Fraxinus uhdei* (símbolos cerrados) y *Ligustrum lucidum* (símbolos abiertos) en las estaciones seca y húmeda, en las localidades Viaducto Tlalpan (A), Boulevard de la Luz (B), Parque Tagle (C) y Parque Villa (D), el Parque Villa sólo se consideró para la estación seca. Los símbolos representan el valor medio por estación y las barras el error estándar. Notese la diferencia de escalas.

Entre las localidades (figura 7) la g_s se comportó de manera semejante a excepción del Parque Villa en la estación seca, que presentó valores de g_s más altos que las otras localidades, sin embargo, en todas las localidades la g_s registrada en la estación seca fue menor a la g_s en la estación húmeda.

Efectos microambientales y fisiológicos

Análisis de curvas envolventes

Radiación fotosintéticamente activa

La respuesta de g_s a la RFA tanto en la estación seca como en la húmeda (figura 8) fue dada por una función hiperbólica de la forma:

$$g_s(\text{RFA}) = (a \text{ RFA}) / (b + \text{RFA})$$

donde “a” es una constante y representa el valor asintótico de g_s que se identifica como la conductividad máxima ($g_{s_{\max}}$) que puede presentar la hoja si todas las variables involucradas en el proceso se encuentran en estado óptimo; mientras que “b” es la constante que se identifica como la sensibilidad de g_s a los cambios en RFA. Los valores de $g_{s_{\max}}$ y de la sensibilidad para *Fraxinus uhdei* en la estación seca fueron $0.169 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $239 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($r^2 = 0.81$, $P < 0.05$) respectivamente; mismos que en la estación húmeda fueron de $1.174 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $34.33 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($r^2 = 0.76$, $P < 0.05$) respectivamente. En *Ligustrum lucidum* estos valores en la estación seca fueron $0.158 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $189 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($r^2 = 0.74$, $P < 0.05$) respectivamente y en la húmeda fueron de $1.31 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $58 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($r^2 = 0.91$, $P < 0.05$).

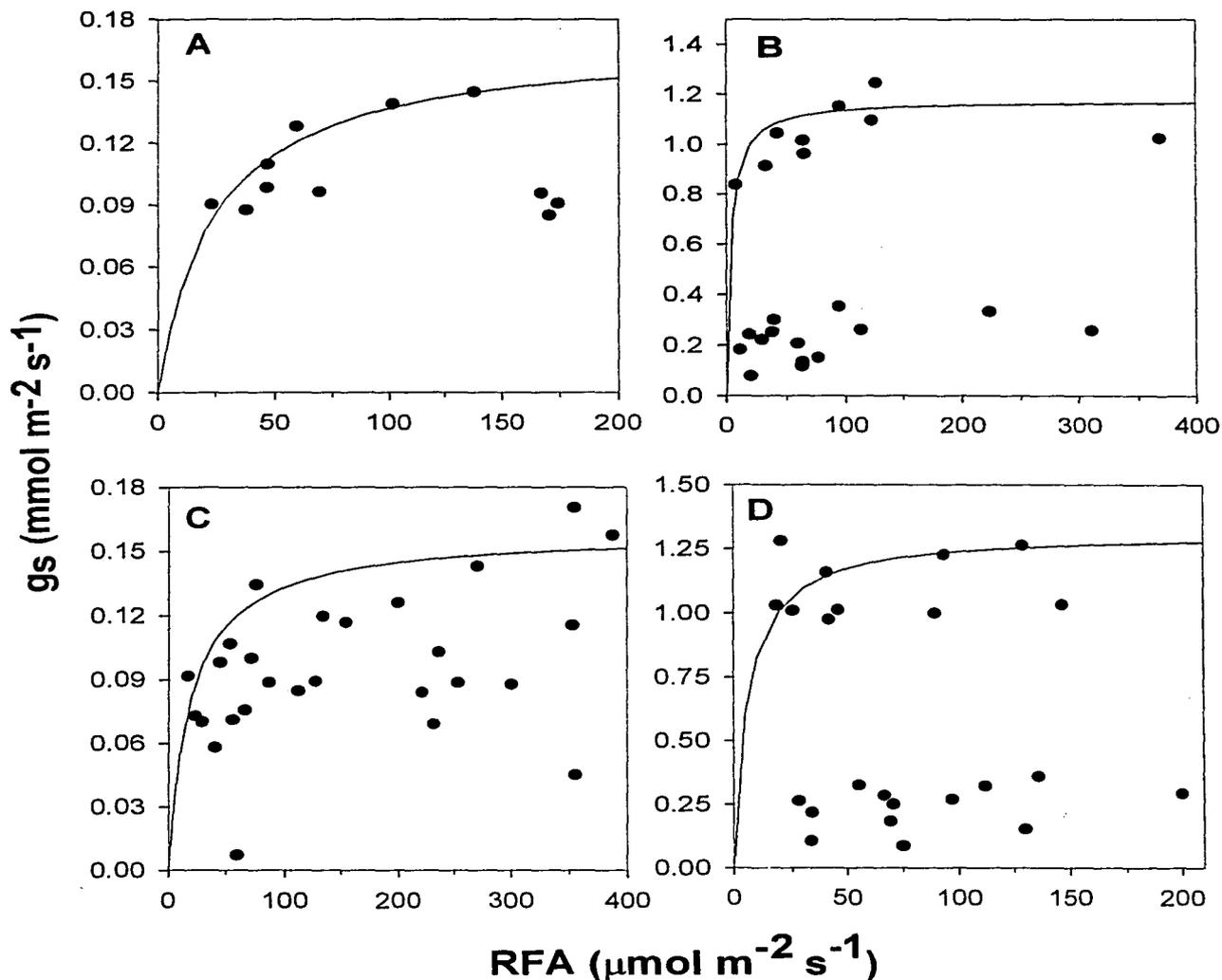


Figura 8. Nubes de puntos de conductividad estomática (g_s) graficada contra la radiación fotosintéticamente activa (RFA), para *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* en la estación seca (A y C) y húmeda (B y D), respectivamente. Las curvas envolventes indican el probable límite superior de las mediciones. Nótese la diferencia de escalas.

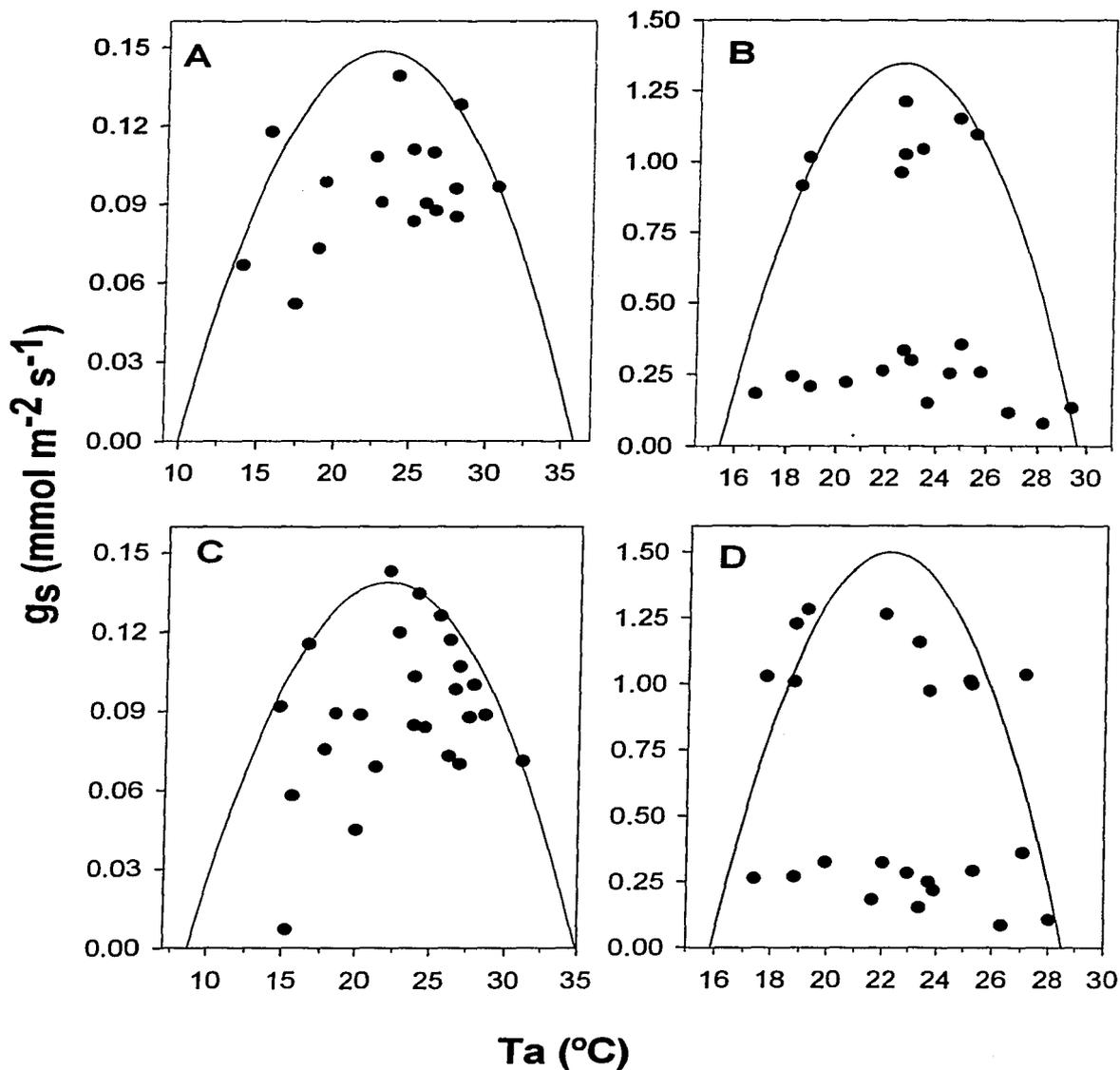


Figura 9. Nubes de puntos de conductividad estomática (g_s) graficada contra temperatura del aire (T_a), para *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* en la estación seca (A y C) y húmeda (B y D), respectivamente. Las curvas envolventes indican el probable límite superior de las mediciones. Nótese la diferencia de escalas.

Temperatura del aire

Las respuestas de g_s en la estación seca y la húmeda (figura 9) se ajustaron a una función cuadrática de la forma:

$$g_s(T_a) = A + B T_a + C T_a^2$$

donde “A, B y C” son constantes que para *Fraxinus uhdei* en la estación seca tuvieron los valores -0.319, 0.040 y -0.00089 ($r^2 = 0.89$, $P < 0.05$) respectivamente, mientras que para la húmeda fueron -12.22, 1.20 y -0.026 ($r^2 = 0.87$, $P < 0.05$). En el caso de *Ligustrum lucidum* para la estación seca los valores de “A, B y C” fueron -0.247, 0.035 y -0.00081 ($r^2 = 0.92$, $P < 0.05$) y en la estación húmeda -16.94, 1.66 y -0.037 respectivamente ($r^2 = 0.65$, $P < 0.05$).

Con esta función es posible determinar la temperatura óptima ($T_{\text{óptima}}$) que coincide con la $g_{s\text{max}}$ así como el intervalo térmico y las temperaturas cardinales (T_{min} y T_{max}) de operación o funcionalidad estomática. Para *Fraxinus uhdei* en la estación seca las T_{min} y T_{max} fueron 9.5 y 35.9 °C respectivamente, con una $T_{\text{óptima}}$ de aproximadamente 22.2°C y una $g_{s\text{max}}$ de 0.148 mmol m⁻²s⁻¹, y en la húmeda T_{min} y T_{max} fueron 15.4 y 29.6 °C con una $T_{\text{óptima}}$ en 22.5 °C y una $g_{s\text{max}}$ de 1.34 mmol m⁻²s⁻¹. Mientras que para *Ligustrum lucidum* en la estación seca las T_{min} y T_{max} fueron 8.9 y 34.4 °C con una $T_{\text{óptima}}$ en 21.5 °C y una $g_{s\text{max}}$ de 0.135 mmol m⁻²s⁻¹, y en la estación húmeda T_{min} y T_{max} fueron 15.7 y 28.5 con una $T_{\text{óptima}}$ en 22.8 °C y una $g_{s\text{max}}$ de 1.5 mmol m⁻²s⁻¹.

Déficit de presión de vapor

El efecto del DPV en el comportamiento estomático de ambas especies en las dos estaciones (figura 10) se ajustó a una ecuación lineal:

$$g_s(\text{DPV}) = \alpha + \beta \text{DPV}$$

donde “ β ” es una constante, que determina la sensibilidad de g_s al DPV. Para *Fraxinus uhdei* en la estación seca los valores de α y β fueron 0.7195 y -0.052 ($r^2 = 0.981$, $P < 0.05$) respectivamente, mientras que en la estación húmeda α tuvo un valor de 3.8563 y β de -0.3165 ($r^2 = 0.922$, $P < 0.05$). En el caso de *Ligustrum lucidum* en la estación seca α y β fueron 0.6991 y -0.04599 ($r^2 = 0.957$, $P < 0.05$), respectivamente, y en la estación húmeda α presentó un valor de 3.9401 y β de -0.3164 ($r^2 = 0.854$, $P < 0.05$).

Concentración de Ozono

La respuesta de g_s de las dos especies en ambas estaciones a la $[O_3]$ (figura 11) se caracterizó por una relación lineal:

$$g_s ([O_3]) = M + N [O_3]$$

Donde “N” es una constante, que determina la sensibilidad de g_s a la $[O_3]$. Para *Fraxinus uhdei* en la estación seca los valores de M y N fueron 0.4899 y -1.3082 ($r^2 = 0.95$, $P < 0.05$), respectivamente, mientras que en la estación húmeda M tuvo un valor de -0.066 y N 14.029 ($r^2 = 0.929$, $P < 0.05$). En el caso de *Ligustrum lucidum* en la estación de secas M y N fueron 0.6379 y de -2.787 ($r^2 = 0.918$, $P < 0.05$) respectivamente y en la estación húmeda M presentó un valor de -0.153 y N 16.309 ($r^2 = 0.877$, $P < 0.05$).

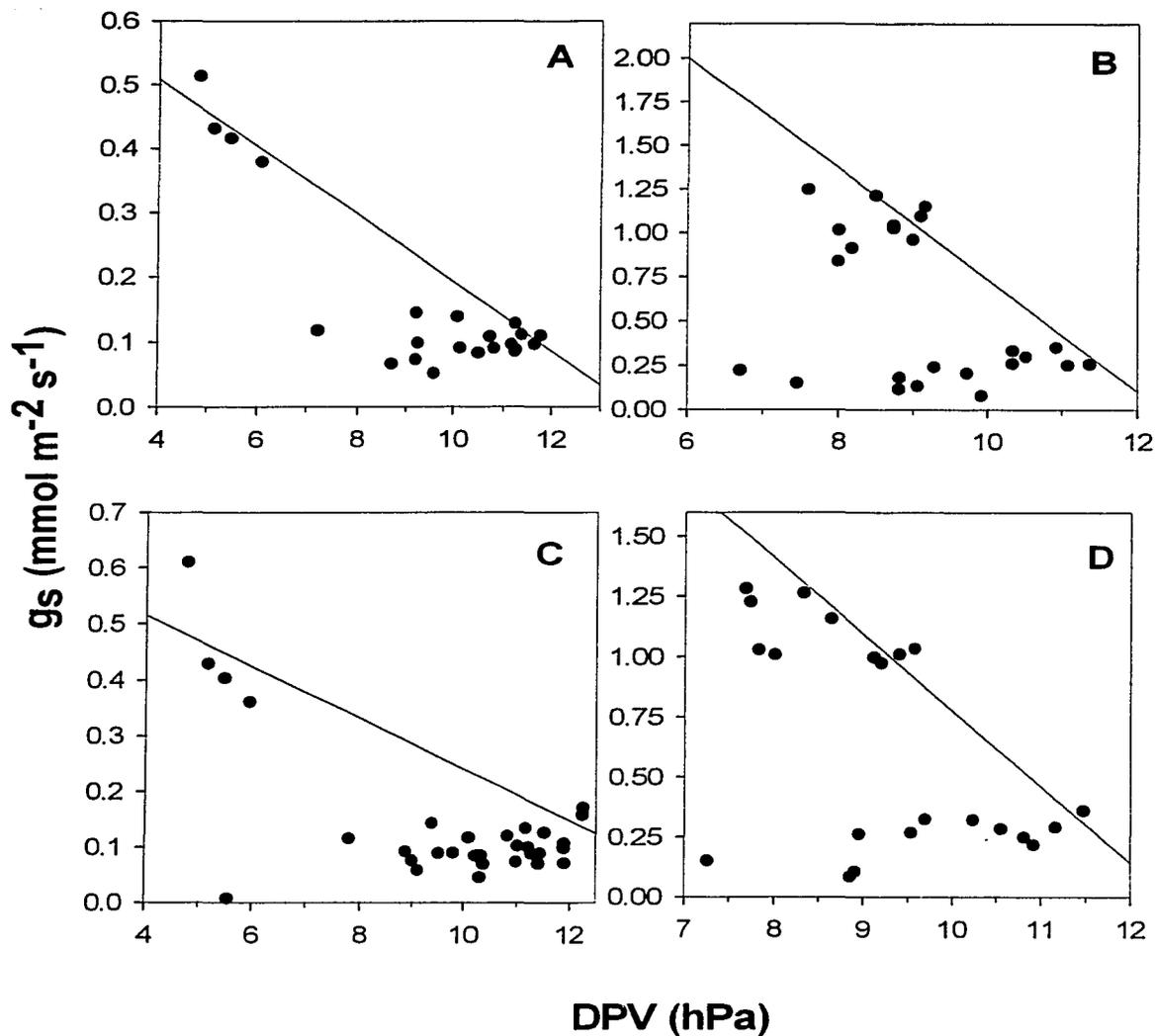


Figura 10. Nubes de puntos de conductividad estomática (g_s) graficada contra el déficit de presión de vapor (DPV), para *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* en la estación seca (A y C) y húmeda (B y D), respectivamente. Las curvas envolventes indican el probable límite superior de las mediciones. Nótese la diferencia de escalas.

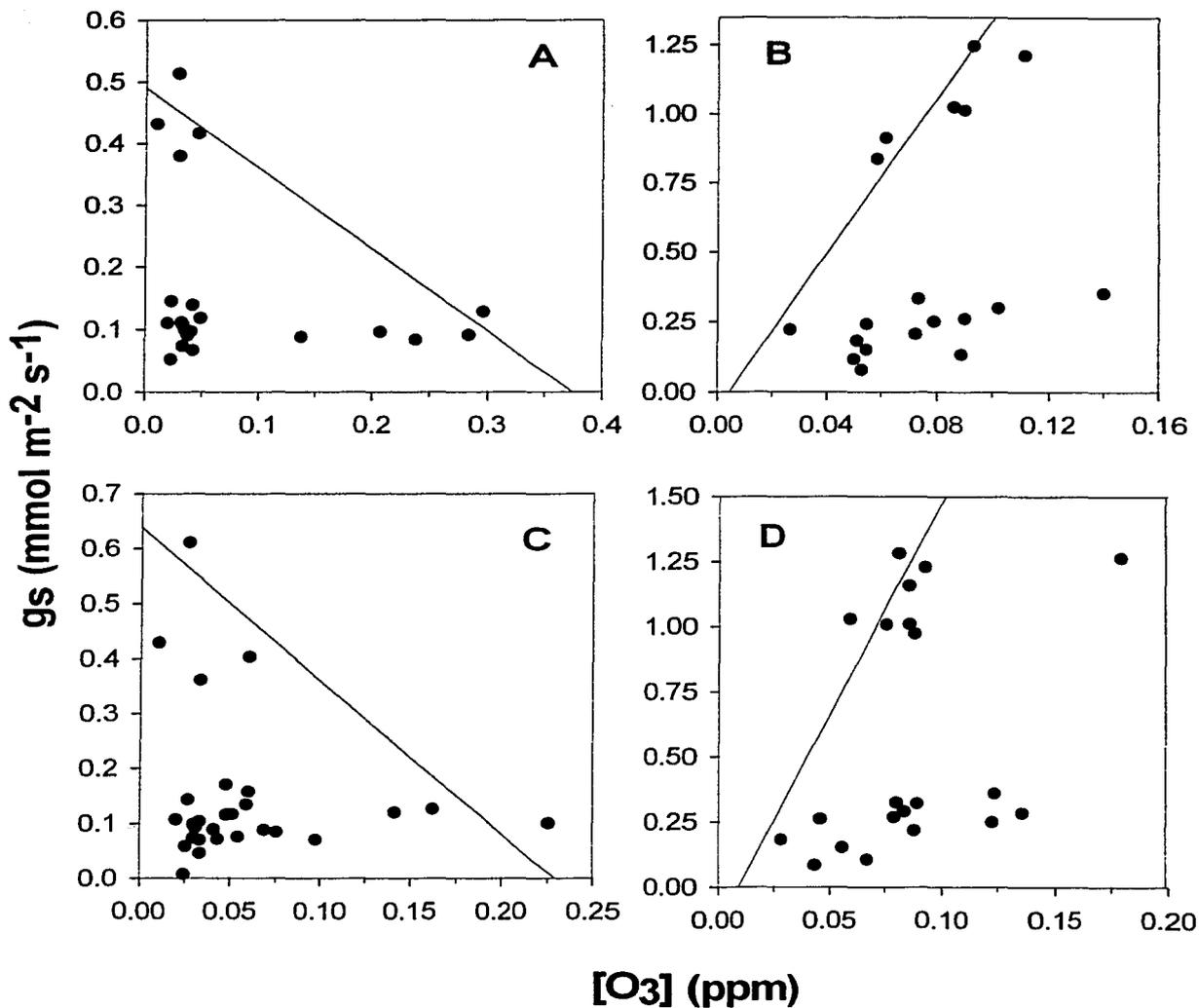


Figura 11. Nubes de puntos de conductividad estomática (gs) graficada contra la concentración de ozono ($[O_3]$), para *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* en la estación seca (A y C) y húmeda (B y D), respectivamente. Las curvas envolventes indican el probable límite superior de las mediciones. Nótese la diferencia de escalas.

Modelos generales de curvas envolventes

Los modelos generales de curvas envolventes se para cada especie fueron los siguientes:

Fraxinus uhdei en estación seca

$$g_s = 0.15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{102124 \text{ RFA}}{28569 + \text{RFA}} \right) (1405 - 0.1033 \text{ DPV}) (0.9543 - 2.548 [\text{O}_3]) (-2.204 + 0.2823 \text{ Ta} - 0.0061 \text{ Ta}^2)$$

Fraxinus uhdei en estación húmeda

$$g_s = 1.25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{10419 \text{ RFA}}{13.689 + \text{RFA}} \right) (3.070 - 0.252 \text{ DPV}) (-0.052 + 11.25 [\text{O}_3]) (-9.799 + 0.964 \text{ Ta} - 0.021 \text{ Ta}^2)$$

Ligustrum lucidum en estación seca

$$g_s = 0.14 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{0.929 \text{ RFA}}{18.94 + \text{RFA}} \right) (1.156 - 0.077 \text{ DPV}) (0.9563 - 4.385 [\text{O}_3]) (-1.73 + 0.247 \text{ Ta} - 0.005 \text{ Ta}^2)$$

Ligustrum lucidum en estación húmeda

$$g_s = 1.35 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{0.96 \text{ RFA}}{16.55 + \text{RFA}} \right) (2.705 - 0.21 \text{ DPV}) (-0.487 + 17.366 [\text{O}_3]) (-10.31 + 1.028 \text{ Ta} - 0.023 \text{ Ta}^2)$$

Al evaluar los modelos se encontró que para las dos especies en la estación húmeda, los modelos subestimaban la respuesta (figura 12 B). Para la estación húmeda los modelos tanto de *Fraxinus uhdei* como de *Ligustrum lucidum*, fueron mejores que en la estación seca, aunque presentaron una gran variabilidad (figura 12 A). Se analizaron los modelos sin incluir al ozono y se presentó mayor variabilidad en los resultados (figura 12 C).

Análisis de regresión múltiple

Con este método se definieron las variables microambientales que explican un efecto en g_s de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum Lucidum*.

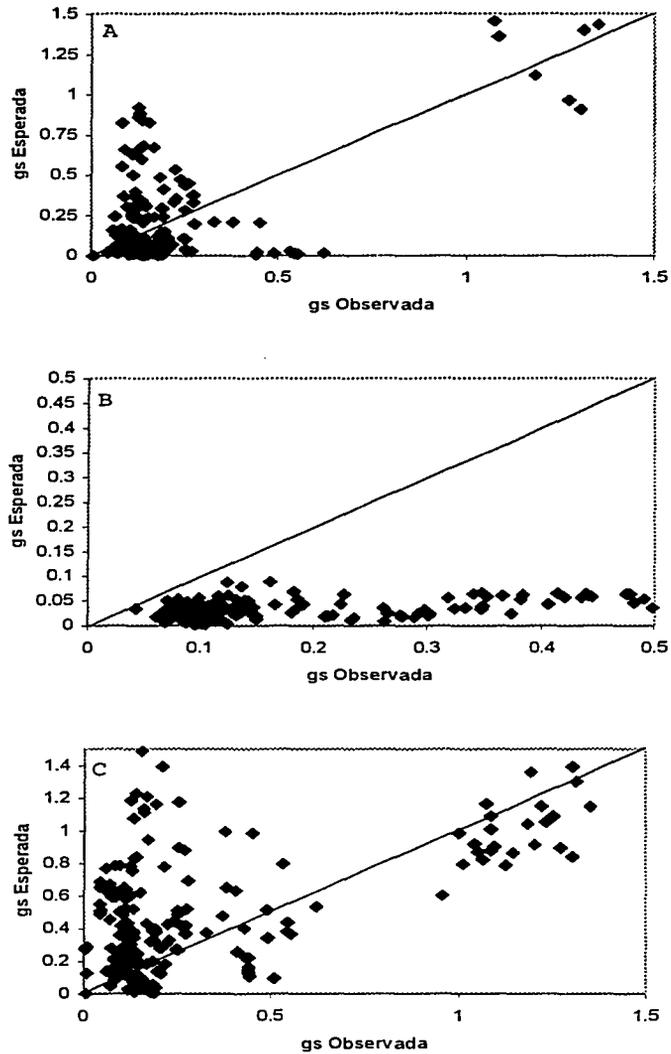


Figura 12. Evaluación de los modelos generales de curvas envolventes *Ligustrum lucidum*, en la estación húmeda (A), en la estación seca (B) y en la estación húmeda sin considerar al ozono en el modelo (C), se graficaron los datos de gs observados contra los esperados con base en los modelos.

Para *Fraxinus uhdei* (tabla 1) en la estación seca las variables RFA, DPV y Ta tuvieron un efecto significativo, siendo el efecto de Ta en gs positivo, favoreciendo la apertura estomática al aumentar su valor, mientras que RFA y DPV tuvieron un efecto negativo. La [O₃] no presentó un efecto significativo en gs.

En la estación húmeda RFA, DPV y [O₃] presentaron un efecto significativo en gs de *Fraxinus uhdei*. El efecto de RFA y [O₃] en gs fue positivo mientras que el de DPV fue negativo. No obstante la Ta no tuvo un efecto significativo. El efecto positivo detectado en este análisis de [O₃] sobre gs también se hizo evidente en el análisis de curva envolvente.

El análisis de regresión múltiple para todo el período de mediciones (ambas estaciones) en *Fraxinus uhdei* destacó a DPV y [O₃] como significativas, DPV con efecto negativo en gs y [O₃] con efecto positivo; mientras que RFA y Ta no fueron significativos.

Para *Ligustrum lucidum* (tabla 2) durante la estación seca los efectos de DPV y Ta en gs fueron significativos; en el caso del DPV fue un efecto negativo, mientras que el de Ta fue positivo; RFA y [O₃] no presentaron un efecto significativo.

Durante la estación húmeda las variables DPV y [O₃] tuvieron un efecto significativo en la gs de *Ligustrum lucidum*, el efecto del DPV en gs fue negativo y el de [O₃] positivo; tanto RFA como Ta no fueron significativas en su efecto a gs.

El análisis de regresión múltiple para todo el período de mediciones (ambas estaciones) en *Ligustrum lucidum* mostró como significativas a DPV con un efecto negativo en gs y [O₃] con un efecto positivo, mientras que RFA y Ta no fueron significativas.

Tabla 1. Análisis de regresión múltiple para determinar el efecto de las diferentes variables microambientales y fisiológicas en la conductividad estomática de *Fraxinus uhdei* ($P < 0.05$).

Variable Independiente	Coefficiente	Error estándar (EE)	t	Nivel de significancia
<u>Estación seca</u> R(ajustada) = 0.91; EE = 0.0038				
Constante	.0564	0.052	10.872	0.000
RFA	-0.0002421	0.000	3.564	0.002
DPV	-0.07405	0.008	-9.368	0.000
Ta	0.01474	0.004	10.872	0.000
[O ₃]	-0.03437	0.063	-0.542	0.595
<u>Estación húmeda</u> R(ajustada) = 0.57; EE = 0.281				
Constante	2.201	0.504	4.369	0.000
RFA	0.001498	0.001	2.930	0.009
DPV	-0.140	0.054	-2.0604	0.017
Ta	-0.03570	0.019	-1.848	0.080
[O ₃]	2.378	0.572	4.159	0.001
<u>Ambas estaciones</u> R(ajustada) = 0.49; EE = 0.3459				
Constante	1.156	0.321	3.600	0.001
RFA	0.00033	0.000	0.690	0.494
DPV	-0.108	0.041	-2.664	0.011
Ta	0.00311	0.018	0.172	0.864
[O ₃]	0.917	0.420	2.184	0.035

Tabla 2. Análisis de regresión múltiple para determinar el efecto de las diferentes variables microambientales y fisiológicas en la conductividad estomática de *Ligustrum lucidum* ($P < 0.05$).

Variable Independiente	Coefficiente	Error estándar (EE)	t	Nivel de significancia
<u>Estación seca</u> R(ajustada) = 0.56; EE = 0.0861				
Constante	0.387	0.080	4.831	0.000
RFA	0.00001562	0.000	0.110	0.913
DPV	-0.06972	0.012	-5.953	0.000
Ta	0.01948	0.006	3.529	0.002
[O ₃]	-0.138	0.228	-0.606	0.550
<u>Estación húmeda</u> R(ajustada) = 0.43; EE = 0.337				
Constante	2.103	0.616	3.416	0.003
RFA	-0.002171	0.002	-1.252	0.227
DPV	-0.136	0.060	-2.254	0.037
Ta	-0.03282	0.027	-1.232	0.234
[O ₃]	6.914	1.735	2.254	0.037
<u>Ambas estaciones</u> R(ajustada) = 0.53; EE = 0.3459				
Constante	0.919	0.275	3.344	0.002
RFA	-0.00064	0.000	-1.301	0.199
DPV	-0.08508	0.035	-2.452	0.018
Ta	0.007122	0.016	0.439	0.662
[O ₃]	1.665	0.611	2.722	0.009

Índice estomático, área foliar y daño foliar

Índice estomático

Las observaciones al microscopio realizadas para evaluar el índice estomático evidenciaron que en *Fraxinus uhdei* la distribución de sus estomas es en areolas (manchones), a diferencia de *Ligustrum lucidum*, en donde la distribución de sus estomas es uniforme en toda la hoja (imagen 1 y 2).

El índice estomático en *Ligustrum lucidum* ($X = 37.2 \pm 7.5$) fue mayor que en *Fraxinus uhdei* ($X = 27.9 \pm 7.81$) ($F = 13.82_{(1,61)} P = 0.00$) (figura 13A), y se mantuvo así a lo largo del periodo de mediciones (febrero-septiembre) (figura 14A). Cuando se comparó entre los meses no se encontraron diferencias significativas en *Fraxinus uhdei* ($F = 0.39_{(4,19)} P = 0.81$) ni en *Ligustrum lucidum* ($F = 2.52_{(4,34)} P = 0.06$), aunque en ambas especies se presentó una tendencia a disminuir el índice estomático.

El índice estomático de *Fraxinus uhdei* fue semejante en todas las localidades ($F = 1.65_{(2,21)} P = 0.21$), caso similar al de *Ligustrum lucidum* ($F = 3.09_{(2,36)} P = 0.06$) en donde a pesar de no existir diferencias significativas los valores de índice estomático en Viaducto Tlalpan tendieron a ser mayores a las otras localidades (figura 15A) (ver anexo).

Área foliar

El área foliar de *Fraxinus uhdei* ($X = 35.6 \pm 10.7 \text{ cm}^2$) fue mayor a la de *Ligustrum lucidum* ($X = 29.7 \pm 6.29 \text{ cm}^2$) ($F = 7.52_{(1,62)} P = 0.008$) (figura 13B). Esta relación no se modificó en todo el periodo de mediciones (febrero-septiembre) y no se encontraron diferencias significativas al comparar el área foliar de *Fraxinus uhdei* por meses ($F = 0.852_{(4,19)} P = 0.510$) así como con *Ligustrum lucidum* ($F = 1.196_{(4,34)} P = 0.330$) (figura 14B). En *Fraxinus uhdei* abril se caracterizó por una media inferior a febrero y en junio el área foliar media fue mayor a abril, coincidiendo con un segundo evento de foliación.

Para *Fraxinus uhdei* la localidad con mayor área foliar fue Viaducto Tlalpan ($X = 40.2 \pm 8.9$ cm²) seguida por el Parque Tagle ($X = 29.9 \pm 13$ cm²) y Boulevard de la Luz ($X = 28.15 \pm 3.31$ cm²) ($F = 3.869_{(2,21)}$ $P = 0.037$). En el caso de *Ligustrum lucidum* el Parque Tagle fue la localidad con mayor área foliar ($X = 33.2 \pm 7.5$ cm²) seguida de Boulevard de la Luz ($X = 28.9 \pm 5.9$ cm²) y Viaducto Tlalpan ($X = 27.6 \pm 4.3$ cm²) ($F = 3.15_{(2,36)}$ $P = 0.054$) (figura 15 B) (ver anexo).

Daño Foliar

El daño que se presentó en *Fraxinus uhdei* consistió en manchas aclaradas y zonas necrosadas. Observaciones al microscopio de cortes transversales y epidermis de sus hojas (imagen 3, 4, 5 y 6), evidenciaron daño severo en el parénquima esponjoso, así como huecos en la epidermis, que de acuerdo a Kolb (1998) son signos típicos del daño causado por ozono, a diferencia de *Ligustrum lucidum* cuyo daño se debía más a causas mecánicas (granizo) o herbivoría y que no presentó daño en el parénquima (imagen 7).

Las hojas de *Fraxinus uhdei* presentaron mucho mayor daño foliar ($X = 0.29 \pm 0.26$) que las de *Ligustrum lucidum* ($X = 0.038 \pm 0.06$) ($F = 33.19_{(1,62)}$ $P = 0.00$) (figura 13C). A través del período de estudio (febrero-septiembre) el daño de *Fraxinus uhdei* se incrementó desde casi cero en febrero a $0.42 (\pm 0.3)$ en abril para luego reducirse nuevamente en junio y posteriormente incrementarse (figura 14C), esto coincide con los picos de incremento del área foliar en febrero y junio cuando ocurrieron los dos eventos de foliación.

Al comparar el daño foliar en *Fraxinus uhdei* por localidades (figura 15 C), el Parque Tagle ($X = 0.65 \pm 0.20$) presentó el mayor daño seguido por Boulevard de la Luz ($X = 0.24 \pm 0.14$) y Viaducto Tlalpan ($X = 0.16 \pm 0.16$) ($F = 17.28_{(2,21)}$ $P = 0.00$). Sin embargo *Ligustrum lucidum* no presentó diferencias significativas al comparar el daño foliar por localidad ($F = 2.61_{(2,36)}$ $P = 0.087$). El Parque Tagle fue la localidad con mayor daño foliar ($X = 0.075 \pm 1$), mientras que en Boulevard de la Luz ($X = 0.027 \pm 0.02$) y Viaducto Tlalpan ($X = 0.01 \pm 0.018$) el daño foliar fue casi nulo (ver anexo).

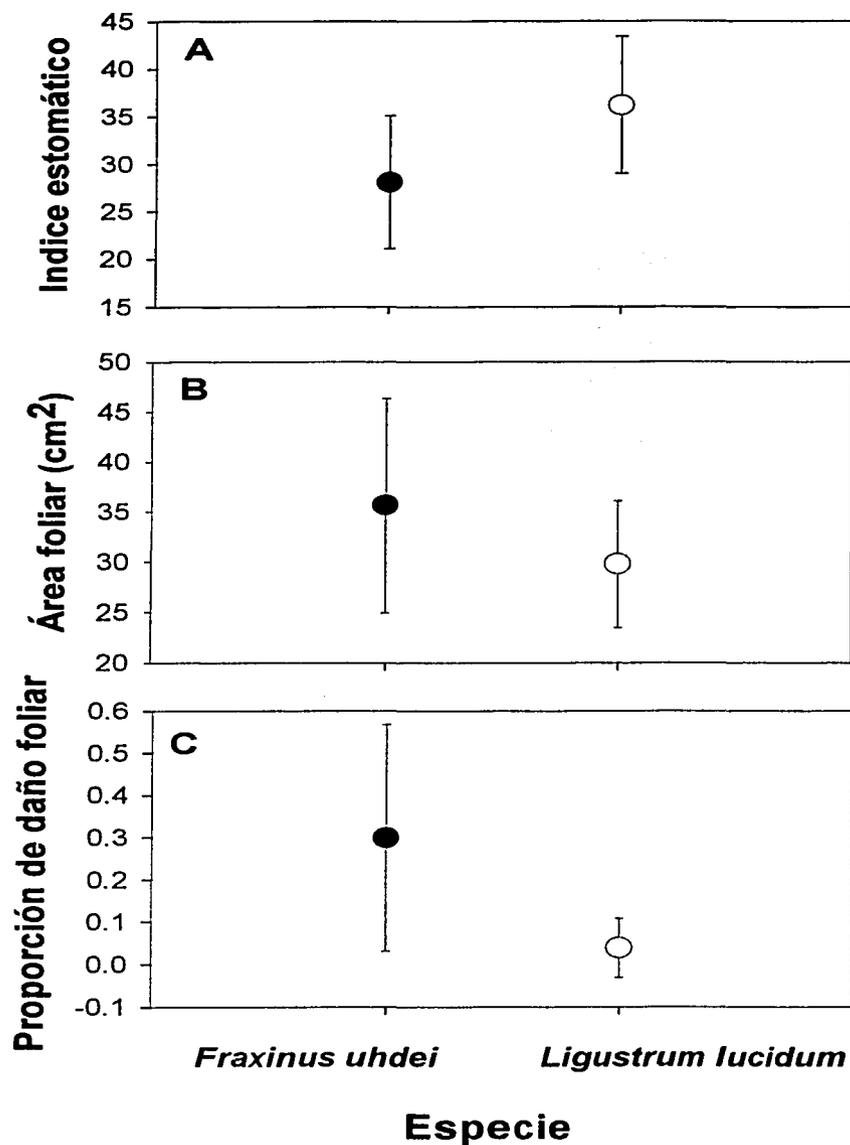


Figura 13. Índice estomático (A), área foliar (B) y daño foliar (C) de *Fraxinus uhdei* (símbolos cerrados) y *Ligustrum lucidum* (símbolos abiertos). Los símbolos representan la media de los valores medidos durante todo el período de mediciones (febrero a septiembre del 2001) en todas las localidades y las barras el error estándar.

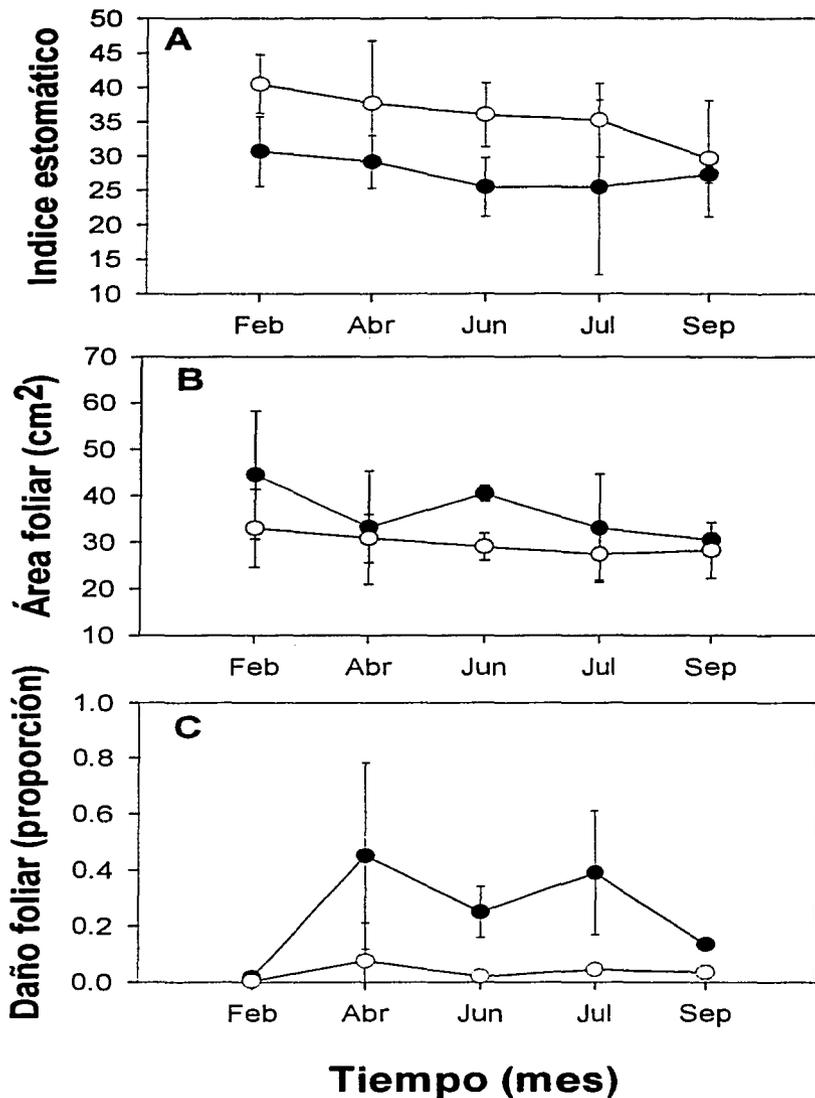


Figura 14. Índice estomático (A), área foliar (B) y daño foliar (C) en *Fraxinus uhdei* (símbolos cerrados) y *Ligustrum lucidum* (símbolos abiertos) en todas las localidades de estudio a través del tiempo. Los símbolos representan la media de todos los valores de cada mes en todas las localidades y las barras el error estándar.

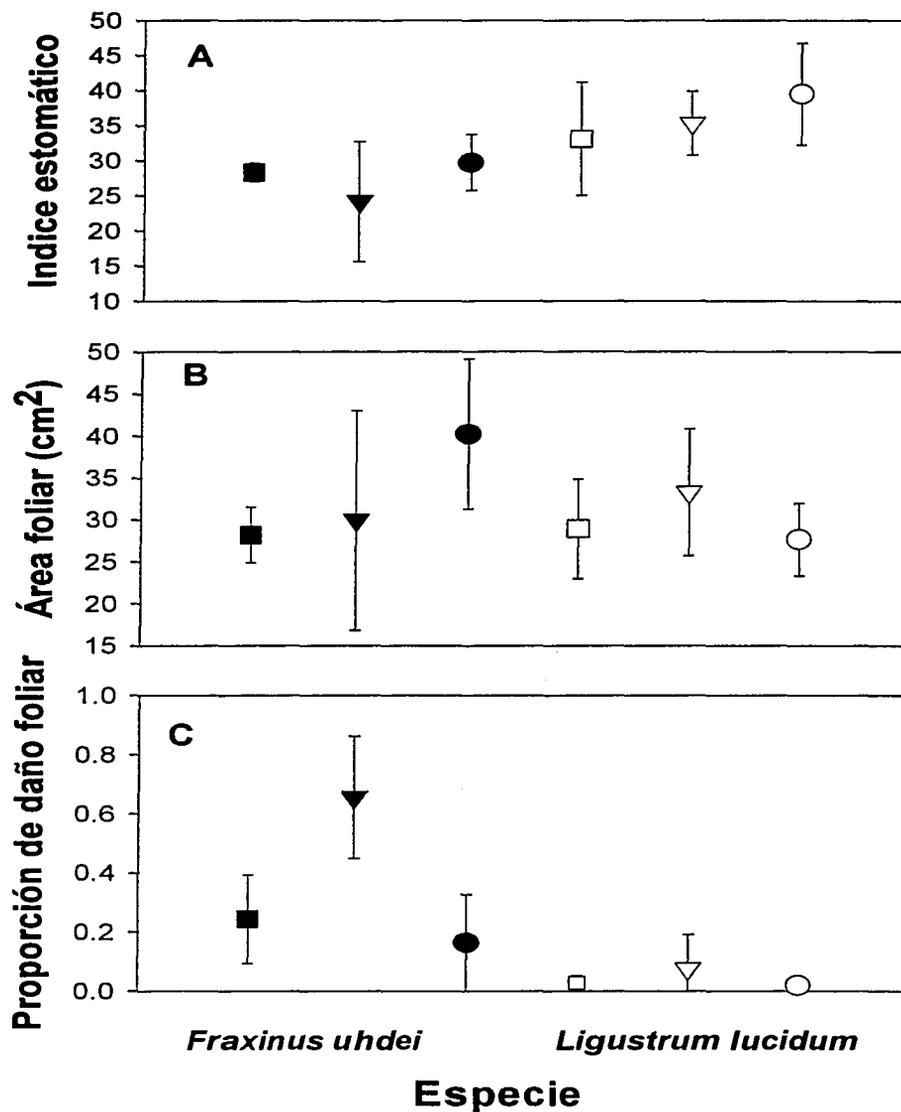


Figura 15. Índice estomático (A), área foliar (B) y daño foliar (C) en el Boulevard de la Luz (□), Parque Tagle (▽) y Viaducto Tlalpan (○) para *Fraxinus uhdei* (símbolos cerrados) y *Ligustrum lucidum* (símbolos abiertos). Los símbolos representan las medias de los valores obtenidos durante todo el período de medición (febrero a septiembre del 2001) y las barras el error estándar.



Imagen 1. Fotomicrografía, réplica en cianoacrilato que permite observar la imagen negativa del envés de las hojas de *Fraxinus uhdei*, iluminación de contraste de doble interferencia (DCI), objetivo 20x, zoom 2x y aumento 100x.

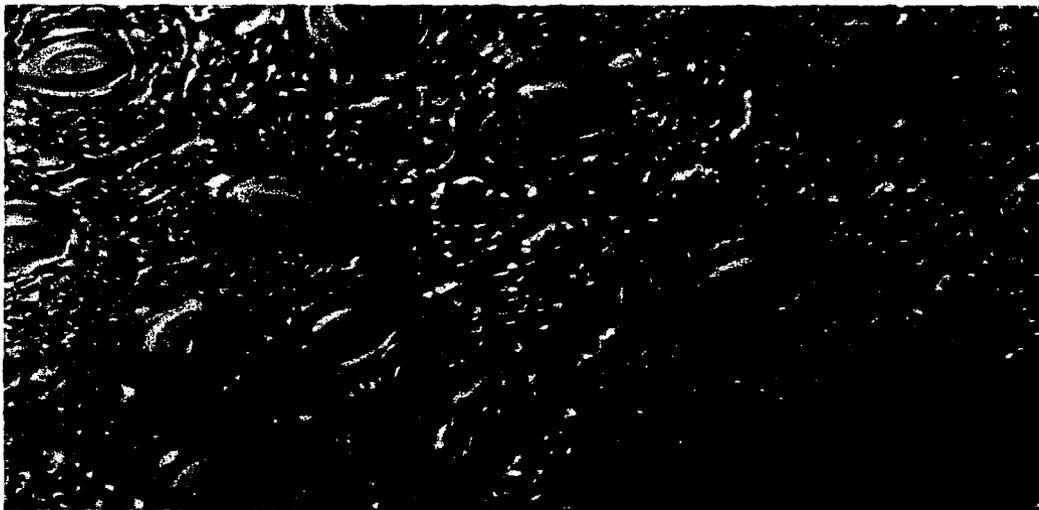


Imagen 2. Fotomicrografía, réplica en cianoacrilato que permite observar la imagen negativa del envés de las hojas de *Ligustrum lucidum*, iluminación de contraste de doble interferencia (DCI), objetivo 20x, zoom 1x y aumento 20x.



Imagen 3. Fotomicrografía de la epidermis de *Fraxinus uhdei* obtenida por disociado mecánico, la muestra se obtuvo al final del período de mediciones (septiembre), cuando el daño folia era elevado; los huecos que se observan se repiten en varias muestras.

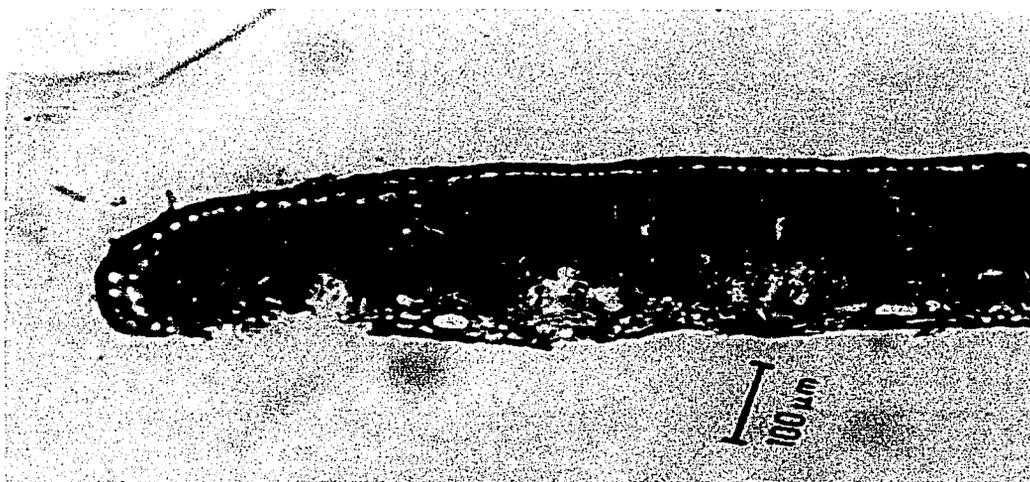


Imagen 4. Fotomicrografía de corte transversal de hoja de *Fraxinus uhdei*, la muestra se obtuvo al final del período de mediciones (septiembre) cuando el daño foliar era elevado; se observan huecos en el parénquima esponjoso llegando incluso al parénquima en empalizada.

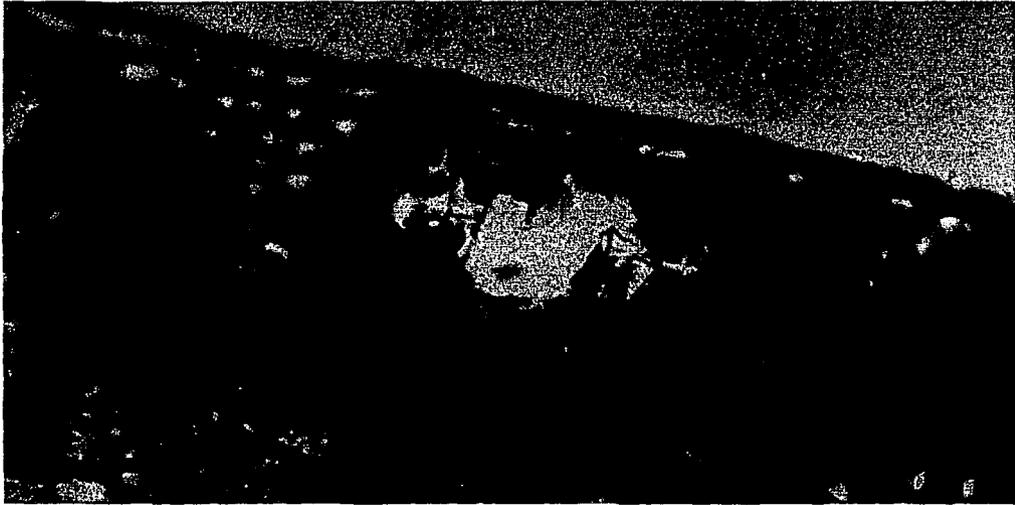


Imagen 5. Fotomicrografía de corte transversal de hoja de *Fraxinus uhdei*, la muestra se obtuvo al final del período de mediciones (septiembre) cuando el daño foliar era elevado; es posible observar un hueco en el parénquima en empalizada.

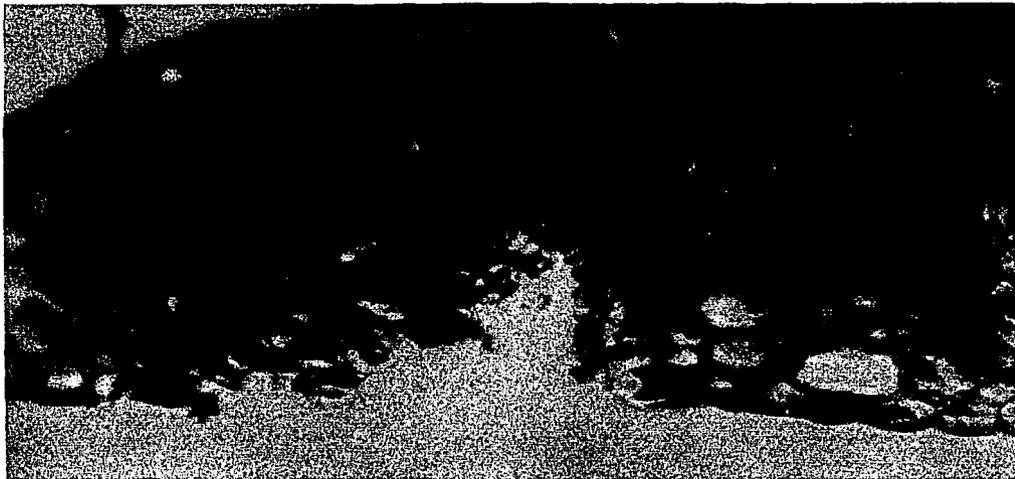


Imagen 6. Fotomicrografía de corte transversal de hoja de *Fraxinus uhdei*, la muestra se obtuvo al final del período de mediciones (septiembre) cuando el daño foliar era elevado; es notorio el daño a la epidermis y como se extiende por el parénquima esponjoso.

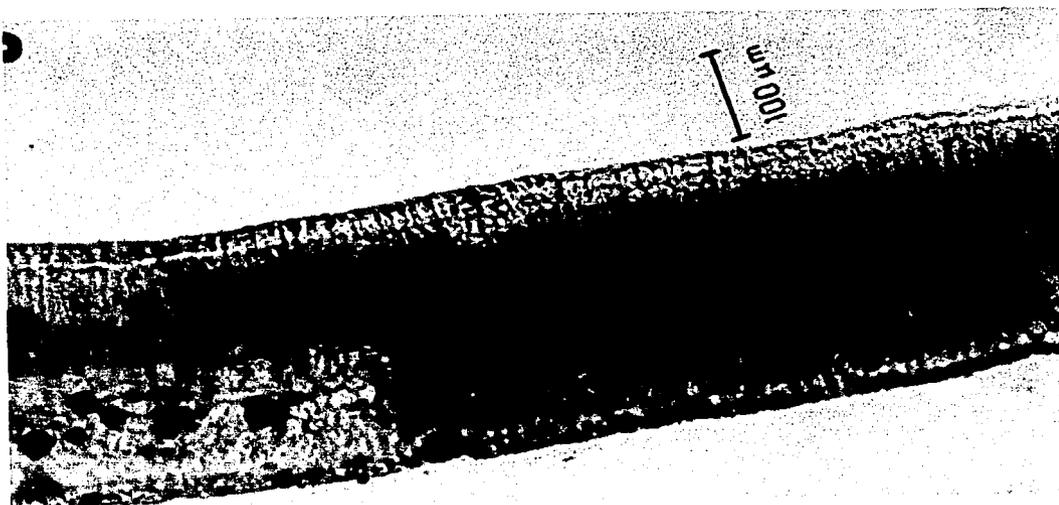


Imagen 7. Fotomicrografía de corte transversal de hoja de *Ligustrum lucidum* aclarado con hipoclorito, no se observa daño en ninguna de las estructuras.

Discusión

El comportamiento estomático de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* se vio asociado a la estacionalidad climática, de tal modo que en la estación seca la $g_{s_{max}}$ de ambas especies fue menor que en la época húmeda. Esta respuesta ya había sido descrita para *Buddleia cordata* por Vázquez-Ramos y Barradas (1998) en el Pedregal de San Ángel. Otros investigadores han demostrado la reducción de la g_s durante las estaciones secas o en condiciones de estrés hídrico (e.g. Bray, 1997; Mansfield, 1998; Maier-Maercker, 1998; Sperry, 2000). Por lo tanto, el comportamiento estomático de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* y su fuerte dependencia de la estacionalidad son razonablemente semejantes a los resultados obtenidos en diferentes comunidades vegetales del mundo.

La g_s tanto de *Fraxinus uhdei* como de *Ligustrum lucidum* presentó mayor variabilidad en la estación húmeda comparada con la estación seca. En parte por que las mediciones realizadas entre febrero y abril (estación seca) aportaron datos similares, mientras que en las mediciones de junio, julio y septiembre (estación húmeda) se vio un incremento desde valores de g_s bajos en junio hasta septiembre cuando se alcanzaron los valores más altos de g_s con diferencias de hasta un orden de magnitud entre septiembre y junio. Esto evidencia el cambio en la respuesta fisiológica de la planta al tener mayor disposición de agua, que en la estación seca era escasa y los primeros días de junio en la estación húmeda, cuando se realizaron las mediciones de ese mes las lluvias aún no eran tan abundantes como en los meses consecutivos, pues hacia julio y septiembre se vio un incremento en g_s que coincide con el período de lluvia regular.

La gran semejanza entre la respuesta estomática de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum*, evidencia que ambas especies responden de manera semejante a los factores microambientales, lo que se resaltó aún mas con los análisis de curvas envolventes y de regresión múltiple. Esta similitud es valida sólo para el periodo de mediciones, caracterizado en parte por la presencia de hojas en *Fraxinus uhdei* que es un árbol caducifolio, a diferencia de *Ligustrum lucidum* que es perennifolio.

Entre las localidades, como era de esperarse, se reflejó plenamente el efecto de la estacionalidad, con gs mayores y con mayor variabilidad en la estación húmeda que en la seca, la excepción fue el Parque Villa, que a diferencia de las otras localidades tiene mayor cuidado y mantenimiento, con un frecuente riego (cada tercer día) Esta diferencia se evidenció en sus características microambientales y por ello gs fue mayor a las otras localidades. Sin duda también influyó en que las mediciones de gs de febrero fueran tan variables, lamentablemente no fue posible realizar las mediciones en el Parque Villa durante la estación húmeda, cuestión que habría aportado información valiosa.

Los datos microambientales presentaron una variabilidad importante en las cuatro localidades, en especial la RFA y la [O₃]. En el caso del RFA el diferente ángulo de incidencia solar durante el día y el movimiento del follaje influyó en los datos obtenidos. El ozono al ser un contaminante fotoquímico, depende de la luz para su generación, y por ello fue que a las horas de mayor intensidad de luz se presentaron sus mayores concentraciones. La Ta y el DPV presentaron menor variabilidad, el comportamiento de la Ta se reflejó en el DPV, registrándose los valores mas altos de DPV a las horas de mayor temperatura. Es obvio también que el DPV fue afectado por la poca humedad ambiental, especialmente en la estación seca. La variación existente entre localidades se debió sin duda a las diferentes arquitecturas, arreglos y mantenimiento que cada una tenía.

Los estudios previos sobre el efecto de las variables microambientales sobre la gs, han demostrado que existe una diversidad considerable en la respuesta de gs a esas variables (RFA, Ta, DPV, [O₃]) (Fanjul y Barradas, 1985; Vázquez-Ramos y Barradas 1998).

Los valores de r² obtenidos para las diferentes curvas envolventes de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* son indicativos de una buena aproximación a los intervalos de operación estomática y con los cuales se puede realizar un buen análisis de la respuesta de gs a las variables microambientales. Los ajustes realizados de gs en función de RFA, Ta, DPV y [O₃] en las dos épocas mostraron una mayor sensibilidad estomática a esas variables

durante la estación húmeda que durante la estación seca, lo que indica que cuando existe una mayor disponibilidad de humedad, la g_s varía ampliamente ante cambios pequeños de estas variables, mientras que en la estación seca la sensibilidad se reduce fuertemente.

Los cambios en la sensibilidad estomática se debieron probablemente a que en la estación húmeda la $g_{s_{max}}$ fue casi cuatro veces mayor que en la estación seca, mientras que los intervalos de operación estomática en función de T_a y DPV se ampliaron en la estación seca, esta ampliación en el intervalo de operación en función de las variables microambientales (T_a y DPV) en las dos estaciones, es un probable mecanismo de adaptación del sistema estomático a la variabilidad ambiental, aunque la $T_{a_{optima}}$ de esta función no cambió significativamente entre las dos estaciones para ninguna de las dos especies. Se hace evidente que tanto la reducción en la g_s como la menor sensibilidad estomática durante la estación seca son un mecanismo de conservación del agua y no implican modificaciones importantes en el arreglo estomático de ambas especies pues, como se observó, el índice estomático no presentó diferencias significativas a través del período de mediciones febrero-septiembre. Esto sugiere que al menos en el caso de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* el índice estomático está definido genéticamente y no ambientalmente (Peat y Fitter, 1994), aunque no es posible excluir el efecto del ambiente en la ontogenia de la hoja. La tendencia que presentó el índice estomático a reducirse, principalmente en *Fraxinus uhdei* probablemente se deba al crecimiento de las células de la hoja.

El análisis de curvas envolventes evidenció también en que momento las variables microambientales analizadas actúan como limitantes de la conductividad estomática. En el caso del RFA en la estación seca, las radiaciones menores a $120 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ limitan la apertura estomática para ambas especies, en cambio, durante la estación húmeda las radiaciones menores a $50 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ limitan la apertura estomática de ambas especies, esto sin duda debe estar asociado a la disponibilidad de agua y al control de la transpiración de la planta en especial en la estación seca, pues el estrés hídrico altera la respuesta de los estomas a la luz (Jones, 1992).

En cuanto a la T_a , las temperaturas mayores o menores que la $T_{a_{\text{óptima}}}$ limitan la conductividad estomática. La principal diferencia entre las estaciones seca y húmeda en ambas especies es que la respuesta estomática presentó una mayor amplitud en la estación seca que en la húmeda, esto sugiere que en la estación húmeda la g_s responde más bruscamente a cambios en la T_a .

El DPV en todos los casos fue limitante de la conductividad estomática, y entre mayor sea su valor, menor será g_s . Esta relación fue más pronunciada en la estación húmeda.

Las respuestas que la g_s de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* tuvieron en función de la $[O_3]$ resulta muy interesante, presentándose un efecto negativo (limitante) en la estación seca y un efecto positivo en la estación húmeda, esto, se refleja plenamente en el análisis de regresión múltiple, coincidiendo en parte por lo propuesto por varios autores en que el ozono tiene un efecto negativo sobre la g_s , la fotosíntesis y en general en toda la fisiología de las plantas (Krupa 1994 y 1998; Larcher, 1995; Musselman, 1999; Massman, et al. 2000) y en parte con otros autores que sugieren que el ozono a ciertas concentraciones tiene un efecto positivo en la g_s y el crecimiento de las plantas (Guzy y Heath, 1993; Mansfield, 1998;) aunque los mismos autores aceptan que a concentraciones elevadas, un efecto negativo es inevitable.

El ozono no sólo presentó un efecto positivo o negativo en la g_s , sino que también influyó en el daño foliar presentado por las hojas de *Fraxinus uhdei*. Gracias a las observaciones realizadas directamente en las hojas y en preparaciones para microscopio, fue evidente la presencia de manchas aclaradas y zonas necrosadas en la hoja, así como daño severo en el parénquima que de acuerdo a Kolb (1998) son signos típicos de daño por ozono. En trabajos realizados en las áreas verdes aledañas a la Ciudad de México se han reportado daños semejantes (Hernández *et al.*, 1984; Bauer, *et al.*, 1985; Alvarado, *et al.*, 1993; Skelly, *et al.*, 1997; Álvarez, et al. 1998).

A diferencia de *Fraxinus uhdei*, que presentó daño principalmente debido al ozono, en *Ligustrum lucidum* el daño foliar se debió principalmente a causas mecánicas y de herbivoría y no fue posible identificar daño por ozono. Esta diferencia entre las dos especies posiblemente se debe a que la hoja de *Ligustrum lucidum* es físicamente más gruesa y fuerte que la de *Fraxinus uhdei*; además es muy probable que *Ligustrum lucidum* también presente antioxidantes que lo protejan del ozono, limitando su efecto en la apertura estomática (Torsethaugen, 1999)

En *Fraxinus uhdei*, a diferencia de *Ligustrum lucidum*, el daño foliar cambió durante el período de mediciones (febrero-septiembre) siendo casi nulo en febrero. Esto coincide con un primer evento de foliación. Posteriormente el daño se incrementa drásticamente para luego reducirse en junio, cuando se presenta un segundo evento de foliación que aunque no reemplaza el total de las hojas, sí aporta un número importante de hojas nuevas y sin dañar, y se prolonga hasta finales de la estación de lluvias. Este evento se refleja también en un incremento del área foliar en el mismo mes. Estas observaciones no concuerdan con la descripción de *Fraxinus uhdei* por Lingelsh (Chacalo y Martínez, 1996) donde no se informa de este segundo evento de foliación. Probablemente esta segunda foliación sea una adaptación a la disponibilidad de agua e indirectamente ayuda a mitigar el daño causado por el ozono.

El Parque Tagle fue la localidad que presentó mayor daño foliar en ambas estaciones, entre esta localidad y las otras hay diferencias importantes en el cuidado y riego que recibe, que sin duda es mayor que el de los camellones de Boulevard de la Luz y Viaducto Tlalpan. Probablemente el mayor daño foliar en esta localidad, el Parque Tagle, esté asociado a la disponibilidad de agua, que al ser mayor hace que las plantas que en él se encuentran transpiren más, tengan más tiempo abiertos los estomas e incluso es probable que no mantengan mecanismos (generación de antioxidantes) contra la sequía que posiblemente mantienen las plantas en localidades con menor riego y de manera indirecta las protegen del efecto del ozono (Maier-Maercker, 1998).

Los modelos generales de curvas envolventes, que se obtuvieron con base en modelos realizados previamente por Jarvis (1976), que consideraban las variables microambientales (RFA, T_a y DPV) y que permiten predecir la respuesta estomática, no fueron tan satisfactorios. Los resultados en la estación seca subestimaron la respuesta estomática, y en la estación húmeda la variabilidad de la respuesta fue muy grande, de cualquier manera la inclusión del ozono en los modelos demostró tener un papel importante, pues al evaluar los modelos sin incluir al ozono los resultados presentaron mayor variabilidad.

El análisis de regresión múltiple presentó para ambas especies en las dos estaciones una constante significativa, lo que hace evidente que aunque se evaluaron variables microambientales que han sido ampliamente estudiadas, y que se sabe que en gran parte explican el comportamiento estomático, faltó incluir otras variables, en este estudio no se consideró el potencial hídrico de la planta, contemplado en otras investigaciones (Vázquez-Ramos y Barradas, 1998). Sin embargo, conocer la distribución de la precipitación durante el período de mediciones permitió tener una idea del estatus hídrico de la planta aunque definitivamente por esa vía no se puede conocer el potencial hídrico real, pero sí obtener una mejor estimación.

Conclusiones

De este estudio se puede concluir que:

- El microambiente de las localidades estudiadas estuvo muy influenciado por la estacionalidad de las lluvias, presentándose mayores valores de RFA, T_a y DPV en la estación seca. La variabilidad que las caracterizó se debió en parte a la estructura, mantenimiento y ubicación de cada localidad.
- La concentración de ozono ($[O_3]$) varió durante el día, influenciada en gran parte por la intensidad luminosa, debido a su carácter de contaminante fotoquímico, alcanzando las mayores concentraciones en las horas de mayor RFA.
- El comportamiento estomático de las especies *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* resultó ser muy parecido, presentando ambas especies valores bajos de gs en la estación seca, muy por debajo de su gs en la estación húmeda, esto se presentó en todas las localidades y sin duda fue la disponibilidad de agua un factor determinante.
- El análisis de curvas envolventes evidenció la respuesta de la conductividad estomática a las variables microambientales evaluadas, y permitió calcular la conductividad máxima y la amplitud de la respuesta estomática de ambas especies en las dos estaciones climáticas, así como definir qué variables y en qué valores actúan como limitantes de la respuesta estomática.
- Los modelos generales de curvas envolventes respondieron a la inclusión del ozono. Pero durante la estación seca los modelos subestimaron la respuesta. En la estación húmeda la evaluación fue más satisfactoria.
- Los valores bajos de RFA y las temperaturas menores o mayores a la óptima fueron más limitantes para la conductividad estomática de las dos especies en la estación seca. El DPV fue siempre limitante de la gs.
- La concentración de ozono ($[O_3]$) tuvo un efecto negativo en la conductividad estomática de ambas especies durante la estación seca, sin embargo, en la estación húmeda el efecto presentado favoreció la apertura estomática probablemente debido a un incipiente daño causado por dicho contaminante.

- El índice estomático de ambas especies se mantuvo similar a lo largo de todo el período de estudio.
- El grave daño foliar en *Fraxinus uhdei* se debió al ozono y se caracterizó por manchas aclaradas, zonas necrosadas y deterioro del parénquima. En cambio, el escaso daño foliar de *Ligustrum lucidum* se debió principalmente a causas físicas o herbivoría y no se observaron efectos del ozono.
- La localidad con mayor daño foliar en *Fraxinus uhdei* fue el Parque Tagle, que a diferencia de Boulevard de la Luz y Viaducto Tlalpan, era regada frecuentemente.
- *Fraxinus uhdei* presentó un segundo evento de foliación durante junio, que se prolongó hasta septiembre aportando hojas jóvenes, esto se reflejó en cambios en la proporción de daño foliar evaluada durante el período de mediciones.

Referencias bibliográficas

- Alvarado R., Bauer, L.I. y Galindo, A.J. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution*. 80: 115-121.
- Álvarez, D., Laguna, G. y Rosas, I. 1998. Macroscopic and microscopic symptoms in *Abies religiosa* exposed to ozone in a forest near Mexico City. *Environmental Pollution* 103: 251-259.
- Barradas, V L. 1987. Evidencia del efecto de isla térmica en Jalapa, Veracruz. *Geofísica (IPGH)* 26: 125-135.
- Barradas V.L. y J-Seres R. 1988. Los pulmones urbanos. *Ciencia y Desarrollo* 78 año XIII: 61-72.
- Barradas V.L. 1991. Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City. *Int J Biometeorol* 35: 24-28.
- Barradas V.L. 1991. El papel de los bosques en el mejoramiento del ambiente alcance y límites. *Memoria del I Seminario sobre el Papel de los Bosques en el Siglo XXI*: 36-40.
- Bauer, L.I., Hernández, T.T. y Manning, W.J. (1985). Ozone causes needle injury and tree decline in *Prunus hartwegii* at high altitudes in the mountains around Mexico City. *Journal of Air Pollution* 8, 835.
- Bravo H., Sosa R. y Torres R. 1991. Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. *Ciencias* 22: 33-40.
- Bravo H., Sosa R., Sánchez P. y Jardón R. 1998. Air pollution problem in the Mexico City metropolitan zone: photochemical pollution. *Proceedings of the 91st. Annual Meeting, Air & Waste Management Association*.
- Bravo HA, et.al. 1997. Air Pollution problem in the Mexico City metropolitan zone: Photochemical Pollution. *AWMA Paper 97-FA111.03 Air and Waste Management Association*.
- Bravo H.A. y Torres R.J. 2000. The usefulness of air quality monitoring and air quality impact studies before the introduction of reformulated gasolines in developing countries. Mexico City, a real case study. *Atmospheric Environment* 34: 499-506.
- Bray, E.A. 1997. Plant response to water deficit. *Trends in plant science* 2: 48-54.
- Burrows F.J. y Milthorpe F.L. 1976. Stomatal conductance on the control of gas exchange. En: *Water deficits and plant growth*, Vol. 4 (Kozlowski, T.T.) pp. 103-152. Academic Press.

- Chacalo A.H. y Martínez L.G. 1996. *Los Arboles de la Ciudad de México*. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F.
- Chappelka A., Renfro J., Somers G. y Nash B. 1997. Evaluation of ozone injury on foliage of Black Cherry (*Prunus serotina*) and Tall Milkweed (*Asclepias exaltata*) in Great Smoky Mountains National Park. *Environmental Pollution* 95: 13-18.
- Chevone B., Manning W., Varbanov A. y Krupa S. 1998. Relating ambient ozone concentrations to adverse biomass responses of white clover: a case study. *Environmental pollution* 103: 103-108.
- Corona-Nava. 1994. Catálogo de plantas ornamentales más comunes de las áreas verdes del Valle de México. *Revista Chapingo* 2: 61-70.
- Evans y Ting. 1974. Ozone damage to Ponderosa pine: a histological and histochemical appraisal. *American Journal of Botany* 59: 297-304.
- Ezcurra, E. 2000. *De las Chinampas a la Megalópolis*. Fondo de Cultura Económica. México. México, D.F.
- Fanjul L. y Barradas V.L. 1985. Stomatal behaviour of two heliophile understorey species of a tropical deciduous forest in Mexico. *Journal Applied Ecology* 22: 943-954.
- Foster J.R. y Smith W.K. 1986. Influence of stomatal distribution on transpiration in low-wind environments. *Plant, Cell and Environment* 9: 751-759.
- García, E. 1998. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. México, D.F.
- Garza, G. 1987. *Atlas de la Ciudad de México*. Departamento del D.F. y El Colegio de México. México.
- Garza, G. 1999. *La Ciudad de México en el Final del Segundo Milenio*. Departamento del D.F. y El Colegio de México. México.
- Groll, U. y Altmann, T. 2001. Stomatal cell biology. *Current opinion in Plant Biology*. 4: 555-560.
- Guzy, M.R. y Heath, R.L. 1993. Responses to ozone of varieties of common bean. *New Phytologist* 124: 617-625.
- Hall, A.E. Schulze, E.D. y Lange, O.L. (1976). Current perspectives of steady-state stomatal responses to environment. *Water and Plant Life* 169-187.
- Heck, W.W., Taylor, O.C. y Tingey, D.T. 1998. Assessment of crop loss from air pollutants. Elsevier Applied Science, Londres.

- Hernández, T.T. y Bauer, L.I. 1984. Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* en el Ajusco. D.F. *Agrociencia* 56: 183-194.
- Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 273: 593-610.
- Jáuregui, O.E. 1971 *Mesomicroclima de la Ciudad de México*. Imprenta Universitaria. México, D.F.
- Jáuregui E. y Tejeda A. 1997. Urban-Rural humidity contrast in Mexico City. *International Journal of Climatology* 17: 187-196.
- Jones H.G. 1992. *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Jones H.G. y Higgs KH. 1989. Empirical models of the conductance of leaves in apple orchards. *Plant, Cell and Environment* 12: 301-308
- Kickert, R.N. y Krupa, S.V. 1990. Forest responses to tropospheric ozone and global climate change: an analysis. *Atmospheric Environment* 24A: 2991-3005.
- Kley D., Kleinmann M., Sanderman H. y Krupa S. 1999. Photochemical oxidants: State of the science. *Environmental Pollution* 100: 19-42.
- Kolb T.E., Frederichsen T.S., Steiner K.C. y Skelly J.M. 1997. Issues in scaling tree size and age response to ozone: a review. *Environmental Pollution* Vol. 98, No. 2: 195-208.
- Kozlowski T., Kramer P y Pallardy S. 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press Inc. San Diego. EU.
- Krupa S.V., Tonneijck A.E.G. y Manning W.J. 1998. Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Air and Waste Management Association Pittsburgh, PA: 21-228.
- Krupa S.V. y Legge, A.H. 1994. Ambient ozone and crop loss: Establishing a case-effect relationship. *Environmental Pollution* 83: 269-276.
- Krupa, S.V. 1997. Ambient ozone and adverse crop response. *Environmental Reviews* 5: 55-77.
- Krupa, S.V. y Nosal, N. 1989. A numerical analysis of the combined open-top chamber data from the US and Europe on ambient ozone and negative crop responses. *Environmental Pollution* 101: 157-160.
- Larcher W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. Springer, New York.

- Lehr, P.E. et.al. 1987. *Weather*. Golden Press. NY. EEUU
- Lushnikov A.A., Vesala T., Kulmala M. y Hari P.A. 1994. Semiphenomenological model for stomatal gas transport. *Journal of Theoretical Biology* 171: 291-301
- Maier-Maercker U. 1998. Predisposition of trees to drought stress by ozone. *Tree Physiology* 19: 1-78.
- Manning W.J. y Krupa S.V. 1992. Experimental methodology for studying the effects of ozone on crops and trees.
- Massman W.J., Musselman R.C. y Lefohn A.S. 2000. A conceptual ozone dose-response model to develop a standard to protect vegetation. *Atmospheric Environment* 34: 745-759.
- Mansfield T.A. 1998. Stomata and plant water relations: does air pollution create problems?. *Environmental Pollution* 101: 1-11.
- Meyers T.P. y Baldocchi D.D. 1988. A comparison of models for deriving dry deposition fluxes of O₃ y SO₂ to a forest canopy. *Tellus* 40B: 270-284.
- Mott K.A. y Buckley T.N. 2000. Patchy stomatal conductance: emergent collective behaviour of stomata. *Trends in Plant Science*. 5: 258-262.
- Musselman R.C. y Massman W.J. 1999. Ozone flux to vegetation and its relationship to plant response and ambient air quality standards. *Atmospheric Environment* 33: 65-73.
- Peat H.J. y Fitter A.H. 1994. A comparative study of the distribution and density of stomata in the British flora. *Biological Journal of the Linnean Society* 52: 377-393.
- Raga G.B., Castro T. y Baumgardner D. 2001. The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City. *Atmospheric Environment* 32: 1805-1811.
- Ramos-Vázquez A. y Barradas V.L. 1998. El efecto del microambiente en la conductividad estomática de *Buddleia cordata* H.B.K., en la Reserva del Pedregal de San Ángel. *Bol. Soc.Bot. México* 62: 63-71.
- Rapoport E.H., Betancourt M.D. y López M.I. 1983. *Aspectos de la Ecología Urbana en la Ciudad de México*. Limusa. México.
- Rzedowski, 1979. *Vegetación de México*. Ed. Limusa. México.
- Sanderman H., Dieter E., Heller W. y Langebartels C. 1998. Ozone: an abiotic elicitor of plant defence reactions.

- Schulze E.D., Lange O.L., Bushbom U., Kappen L. y Evenari M. 1972. Stomatal responses to changes in humidity in plants growing in the desert. *Planta* 108: 259-270
- Serna, L. 2001. Stomatal biology. *Trends in Plant Science*. 6: 554-555.
- Skelly J.M., Savage J.M., Bauer M.L. y Alcarado D. 1997. Observations of ozone-induced foliar injury on black cherry (*Prunus serotina*) within the Desierto de los Leones National Park, Mexico City. *Environmental Pollution* 95: 155-158.
- Soda C., Bussotti F., Grossoni P., Barnes J., Mori B. y Tani C. 2000. Impact of urban levels of ozone on *Pinus halapensis* foliage. *Environmental and Experimental Botany* 44: 69-82.
- Sperry, J.S. 2000. Hydraulic constraint on plant gas exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 14: 13-23.
- Torsethaugen G., Pell E.J. y Assmann S.M. 1999. Ozone inhibits guard cell K⁺ channels implicated in stomatal opening. *PNAS* Vol. 96 No. 23: 13577-13582.
- US EPA, 1996. Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. Vol II EPA-600/P-93/00bF.
- Woodward F.I. y Bazzaz F.A. 1988. The response of stomatal density to CO₂ partial pressure. *Journal of Experimental Botany* 39: 1771-1781
- Zambrano A. y Nash III T.H. 2000. Lichen response to short-term transplantation in Desierto de los Leones, Mexico City. *Environmental Pollution* 107: 407-412.

Anexo

Variables		MEDIA	Desviación Estándar	MÍNIMO	MAXIMO
RFA	Viaducto Tlalpan	155.5462	119.3743	23.22	388.00
	Parque Tagle	117.8906	86.4629	17.11	300.77
	Boulevard de la Luz	215.4263	107.7649	59.44	387.33
Ta	Parque Villa	36.5465	25.4938	13.00	90.82
	Viaducto Tlalpan	23.2919	4.9951	13.98	31.13
	Parque Tagle	22.9495	4.1384	14.66	27.85
DPV	Boulevard de la Luz	23.7293	4.8202	15.29	28.69
	Parque Villa	18.1167	1.4747	16.20	19.89
	Viaducto Tlalpan	10.3610	1.3508	7.21	11.90
[O₃]	Parque Tagle	10.4114	0.8956	8.87	11.42
	Boulevard de la Luz	10.3263	1.9168	5.55	12.25
	Parque Villa	5.3460	0.4750	4.76	6.06
[O₃]	Viaducto Tlalpan	0.0548	0.06808	0.02	0.30
	Parque Tagle	0.1015	0.07810	0.03	0.28
	Boulevard de la Luz	0.1770	0.2065	0.02	0.71
	Parque Villa	0.0306	0.01689	0.01	0.06

Análisis descriptivo de las variables ambientales para las localidades en la estación seca

VARIABLES		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
RFA	Entre grupos	159267.156	3	53089.052	5.180	0.003
	Dentro de grupos	502171.476	49	10248.397		
	Total	661438.632	52			
Ta	Entre grupos	186.523	3	62.174	3.174	0.032
	Dentro de grupos	959.935	49	19.591		
	Total	1146.458	52			
DPV	Entre grupos	171.208	3	57.069	32.722	0.000
	Dentro de grupos	85.460	49	1.744		
	Total	256.668	52			
[O₃]	Entre grupos	0.140	3	0.04657	3.850	0.015
	Dentro de grupos	0.593	49	0.01210		
	Total	0.732	52			

ANOVA comparación de las variables ambientales entre localidades en la estación seca

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Variables		MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR	MÍNIMO	MÁXIMO
RFA	Viaducto Tlalpan	50.0154	31.3150	7.67	129.54
	Parque Tagle	117.6282	115.3256	20.44	368.31
	Boulevard de la Luz	143.3911	107.6235	41.67	453.17
Ta	Viaducto Tlalpan	22.3645	3.8980	16.80	29.42
	Parque Tagle	22.1815	2.4900	18.82	25.76
	Boulevard de la Luz	23.4343	2.7132	18.76	27.09
DPV	Viaducto Tlalpan	8.6782	1.1358	6.01	10.81
	Parque Tagle	9.7937	1.2763	7.67	11.36
	Boulevard de la Luz	9.3270	1.2574	7.60	11.47
[O₃]	Viaducto Tlalpan	0.0848	0.07475	0.03	0.37
	Parque Tagle	0.0934	0.03327	0.07	0.20
	Boulevard de la Luz	0.1930	0.1302	0.07	0.45

Análisis descriptivo de las variables ambientales para las localidades en la estación húmeda

Variables		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
RFA	Entre grupos	80079.978	2	40039.989	5.966	0.005
	Dentro de grupos	295284.682	44	6711.015		
	Total	375364.659	46			
Ta	Entre grupos	11.726	2	5.863	0.534	0.590
	Dentro de grupos	483.449	44	10.987		
	Total	495.175	46			
DPV	Entre grupos	10.447	2	5.223	3.608	0.035
	Dentro de grupos	63.692	44	1.448		
	Total	74.139	46			
[O₃]	Entre grupos	0.0994	2	0.04973	6.806	0.003
	Dentro de grupos	0.321	44	0.0073		
	Total	0.421	46			

ANOVA comparación de las variables ambientales entre localidades en la estación húmeda

VARIABLES	Estación	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR	MÍNIMO	MÁXIMO
RFA	Seca	141.4861	112.7829	13.00	388.00
	Húmeda	91.1189	90.3333	7.67	453.17
Ta	Seca	22.5240	4.6955	13.98	31.13
	Húmeda	22.5909	3.2810	16.80	29.42
DPV	Seca	9.6082	2.2217	4.76	12.25
	Húmeda	9.1287	1.2695	6.01	11.47
[O₃]	Seca	0.0871	0.1187	0.01	0.71
	Húmeda	0.1147	0.0956	0.03	0.45

Análisis descriptivo de las variables ambientales separando estaciones (seca y húmeda)

Variables		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
RFA	Entre grupos	63193.195	1	63193.195	5.973	0.016
	Dentro de grupos	1036803.292	98	10579.625		
	Total	1099996.487	99			
Ta	Entre grupos	0.111	1	0.111	0.007	0.935
	Dentro de grupos	1641.633	98	16.751		
	Total	1641.744	99			
DPV	Entre grupos	5.728	1	5.728	1.697	0.196
	Dentro de grupos	330.807	98	3.376		
	Total	336.535	99			
[O₂]	Entre grupos	0.0189	1	0.01895	1.610	0.207
	Dentro de grupos	1.153	98	0.01177		
	Total	1.172	99			

ANOVA comparación de las variables ambientales entre estaciones (seca y húmeda)

Variables	HORA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	MÍNIMO	MÁXIMO
RFA	8:00	27.2759	22.4170	7.67	69.43
	10:00	66.2481	39.0016	18.89	129.54
	12:00	132.6240	128.3230	38.89	453.17
	14:00	124.5051	82.4817	33.33	310.89
	16:00	44.4331	26.3752	20.06	89.33
Ta	8:00	18.5852	1.9381	16.80	21.62
	10:00	19.6648	1.8443	18.22	23.67
	12:00	23.2857	1.5039	21.87	26.84
	14:00	26.3106	1.5232	24.85	29.42
	16:00	25.0356	1.9155	23.33	28.22
DPV	8:00	7.7141	1.1630	6.01	8.95
	10:00	8.3445	0.9342	7.27	9.72
	12:00	9.4844	0.9081	8.32	10.81
	14:00	10.0090	1.0733	8.91	11.47
	16:00	9.9517	1.0480	8.73	11.08
[O₂]	8:00	0.0448	0.01430	0.03	0.06
	10:00	0.07411	0.01456	0.05	0.09
	12:00	0.1360	0.08026	0.04	0.27
	14:00	0.1494	0.07126	0.07	0.26
	16:00	0.072	0.0253	0.05	0.10

Análisis descriptivo de las variables ambientales por hora en la estación húmeda

VARIABLES		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
RFA	Entre grupos	78039.891	4	19509.973	2.756	0.040
	Dentro de grupos	297324.768	42	7079.161		
	Total	375364.659	46			
Ta	Entre grupos	374.017	4	93.504	32.414	0.000
	Dentro de grupos	121.158	42	2.885		
	Total	495.175	46			
DPV	Entre grupos	32.294	4	8.074	8.104	0.000
	Dentro de grupos	41.845	42	0.996		
	Total	74.139	46			
[O₃]	Entre grupos	0.120	4	0.02988	4.165	0.006
	Dentro de grupos	0.301	42	0.007176		
	Total	0.421	46			

ANOVA comparación de las variables ambientales entre horas en la estación húmeda

VARIABLES	HORA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	MÍNIMO	MÁXIMO
RFA	8:00	143.0484	132.9536	13.00	388.00
	10:00	172.1517	100.9131	23.11	355.33
	12:00	161.9680	81.2833	55.56	300.77
	14:00	98.5164	116.4586	28.44	387.33
	16:00	100.2973	142.8152	23.22	354.60
Ta	8:00	17.4302	2.4088	13.98	21.98
	10:00	21.3880	3.4977	16.20	26.16
	12:00	25.0134	3.5262	18.91	28.53
	14:00	25.8933	3.8977	19.73	31.13
	16:00	26.8000	1.1051	25.93	28.69
DPV	8:00	8.0281	1.7410	4.76	9.53
	10:00	9.3027	1.9612	5.11	10.49
	12:00	10.2165	2.2363	5.44	11.52
	14:00	10.4908	2.3905	5.94	12.24
	16:00	11.5407	0.6197	10.80	12.25
[O₃]	8:00	0.0350	0.01021	0.02	0.05
	10:00	0.9588	0.1116	0.01	0.23
	12:00	0.13881	0.1097	0.03	0.30
	14:00	0.0562	0.03513	0.03	0.28
	16:00	0.0311	0.01194	0.02	0.05

Análisis descriptivo de las variables ambientales por hora en la estación seca

VARIABLES		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
RFA	Entre grupos	43299.261	4	10824.815	0.841	0.506
	Dentro de grupos	618139.371	48	12877.904		
	Total	661438.632	52			
Ta	Entre grupos	658.060	4	164.515	16.169	0.000
	Dentro de grupos	488.398	48	10.175		
	Total	1146.458	52			
DPV	Entre grupos	66.979	4	16.745	4.237	0.005
	Dentro de grupos	189.689	48	3.952		
	Total	256.668	52			
[O₃]	Entre grupos	0.187	4	0.04663	4.100	0.006
	Dentro de grupos	0.546	48	0.01137		
	Total	0.732	52			

ANOVA comparación de las variables ambientales entre horas en la estación seca

<i>Área foliar</i>	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
Entre grupos	510.745	1	510.745	7.520	0.008
Dentro de grupos	4143.155	61	67.921		
Total	4653.900	62			
<i>Índice estomático</i>	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
Entre grupos	791.573	1	791.573	13.820	0.00
Dentro de grupos	3493.984	61	57.278		
Total	4285.558	62			
<i>Daño foliar</i>	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
Entre grupos	1.003	1	1.003	33.197	0.00
Dentro de grupos	1.843	61	0.03021		
Total	2.846	62			

Resultados de ANOVA comparando entre especies las variables área foliar, índice estomático y daño foliar.

<i>Fraxinus uhdei</i>						
Variables		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
área foliar	Entre grupos	710.868	2	355.434	3.869	0.037
	Dentro de grupos	1929.000	21	91.857		
	Total	2639.868	23			
daño foliar	Entre grupos	1.033	2	0.516	17.285	0.000
	Dentro de grupos	0.627	21	0.02987		
	Total	1.660	23			
índice estomático	Entre grupos	205.760	2	102.880	1.653	0.215
	Dentro de grupos	1307.185	21	62.247		
	Total	1512.945	23			
<i>Ligustrum lucidum</i>						
Variables		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
área foliar	Entre grupos	224.438	2	112.219	3.159	0.054
	Dentro de grupos	1278.898	36	35.525		
	Total	1503.336	38			
daño foliar	Entre grupos	0.02334	2	0.01167	2.621	0.087
	Dentro de grupos	0.160	36	0.004453		
	Total	0.184	38			
índice estomático	Entre grupos	290.395	2	145.198	3.092	0.058
	Dentro de grupos	1690.495	36	46.958		
	Total	1980.890	38			

Resultados de ANOVA comparando área foliar, índice estomático y daño foliar entre estaciones en ambas especies, *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum*.

<i>Fraxinus uhdei</i>						
Variables		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
área foliar	Entre grupos	401.650	4	100.413	0.852	0.510
	Dentro de grupos	2238.218	19	117.801		
	Total	2639.868	23			
daño foliar	Entre grupos	0.628	4	0.157	2.892	0.050
	Dentro de grupos	1.032	19	0.05431		
	Total	1.660	23			
índice estomático	Entre grupos	114.785	4	28.696	0.390	0.813
	Dentro de grupos	1398.161	19	73.587		
	Total	1512.945	23			
<i>Ligustrum lucidum</i>						
Variables		SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	SIG.
área foliar	Entre grupos	185.465	4	46.366	1.196	0.330
	Dentro de grupos	1317.871	34	38.761		
	Total	1503.336	38			
daño foliar	Entre grupos	0.02497	4	0.006243	1.338	0.276
	Dentro de grupos	0.159	34	0.004667		
	Total	0.184	38			
índice estomático	Entre grupos	453.766	4	113.442	2.526	0.059
	Dentro de grupos	1527.124	34	44.915		
	Total	1980.890	38			

Resultados de ANOVA comparando área foliar, índice estomático y daño foliar entre meses en ambas especies, *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum*.