

## Indicadores de descomposición interna del tronco de fresno (*Fraxinus uhdei*) en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcōyotl, México.

Internal trunk decay indicators of ash tree (*Fraxinus uhdei*) in the Molino de Flores Netzahualcōyotl National Park, Mexico.

Pablo Hernández-López <sup>a</sup> , Tomás Martínez-Trinidad <sup>\*\*</sup> , Leopoldo Mohedano Caballero <sup>b</sup> , Patricia Hernández de la Rosa <sup>a</sup> , Manuel de Jesús González Guillén <sup>a</sup> , Juana Fonseca González <sup>c</sup> 

\* Autor de correspondencia: <sup>a</sup> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Postgrado en Ciencias Forestales, Texcoco, Estado de México, México, [tomtz@colpos.mx](mailto:tomtz@colpos.mx)

<sup>b</sup> Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

### RESUMEN

La evaluación del estado estructural del tronco de los árboles es fundamental en la determinación del riesgo para las personas y la infraestructura urbana. Los objetivos fueron: 1) evaluar indicadores de la presencia y severidad de descomposición interna del tronco de fresno (*Fraxinus uhdei*) en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcōyotl, 2) determinar la asociación entre el nivel visual básico de riesgo y la severidad de descomposición, y 3) determinar las características visuales externas del árbol que influyen en la probabilidad de presencia de descomposición interna del tronco. Se evaluó el riesgo de 50 árboles mediante el método de Porkorny y se determinó la presencia de la descomposición mediante un resistógrafo en dos zonas del tronco: a 30 cm (Base) y a 1,3 m (DN) de altura del suelo. La severidad de la descomposición se determinó mediante la relación “madera sana y el radio del tronco”. De manera general, la presencia de descomposición interna fue de 30 %, siendo más frecuente y severa en la zona de la base que en el DN. Existe una asociación moderada negativa entre la severidad de la descomposición y la calificación de riesgo. Finalmente, la presencia de indicadores visuales externos de descomposición en la base del tronco y la presencia de raíces expuestas con lesiones son los dos factores que predicen la presencia de descomposición interna del tronco del fresno. Estos resultados contribuyen a la generación de calificaciones más certeras en las evaluaciones de riesgo de un nivel básico.

*Palabras clave:* Resistógrafo, riesgo de árboles, compartimentación, Parque Nacional.

### ABSTRACT

The evaluation of the structural trunk condition is fundamental in determining the risk to people and urban infrastructure. The objectives were: 1) to evaluate indicators of the presence and severity of internal decomposition of the trunk of ash (*Fraxinus uhdei*) in the Molino de Flores Netzahualcōyotl National Park, 2) to determine the association between the basic visual level of risk and the severity of decay, and 3) determine the external visual characteristics of the tree that influence the probability of the presence of internal trunk decay. The risk of 50 trees was evaluated using the Porkorny method and the presence of decay was determined using a resistograph in two areas of the trunk: 30 cm (Base) and 1.3 m (DN) height from the ground. The severity of decay was determined by the sound wood- stem radius ratio. In general, the presence of internal decomposition was 30 %, being more frequent and severe in the base area than in the DAP. There is a moderate negative association between decay severity and risk rating. Finally, the presence of external visual indicators of decay at the base of the trunk and the presence of exposed roots with lesions are the two factors that predict the presence of internal decay of the ash tree trunk. These results contribute to the generation of more accurate ratings in basic level risk assessments.

*Keywords:* Resistograph, tree risk, compartmentalization, National Park.

### INTRODUCCIÓN

La evaluación del riesgo de caída de árboles o una de sus partes en el entorno urbano y periurbano considera que los evaluadores deben identificar y evaluar la condición

estructural del árbol, basándose principalmente en las características externas visibles (Matheny y Clark 2009). La presencia de grietas, canchales, cavidades, heridas, corteza incluida y descomposición en el árbol, son usualmente considerados como defectos estructurales (Pokorny *et al.*

2003, Calaza e Iglesias 2016). De estas características, la descomposición es una de las más estudiadas, debido a que la pérdida de madera en buen estado reduce la capacidad de carga y resistencia de las partes afectadas del árbol (Dahle *et al.* 2017) y aumenta la probabilidad de que los árboles o una de sus partes caiga (Soge *et al.* 2021, Son *et al.* 2022). Sin embargo, el nivel de riesgo debe considerar la extensión de la descomposición y no solo la presencia de esta (Kobza *et al.* 2022), debido a que el crecimiento de madera sana, alrededor de la descomposición, puede compensar la pérdida de resistencia por madera podrida (Suchocka *et al.* 2022). Por tal motivo, el conocimiento sobre la dispersión de la descomposición de la madera interna de los árboles es un tema fundamental en la evaluación del riesgo (Li *et al.* 2022).

La presencia de áreas considerables con descomposición interna en el arbolado urbano es un problema que afecta tanto a árboles jóvenes con tronco delgado como árboles viejos con diámetros grandes (Luley *et al.* 2009). Los evaluadores deben decidir aquellas situaciones en donde la descomposición representa un peligro y problema estructural grave (Suchocka *et al.* 2022). Sin embargo, evaluar la presencia y extensión de la descomposición interna de manera visual resulta complejo (Son *et al.* 2022). Ante esta situación, se han desarrollado diversos indicadores de la pérdida de resistencia de la madera ante la presencia de descomposición (Dahle *et al.* 2017). Uno de los más conocidos y utilizados es la relación del espesor de la madera intacta o residual  $t$  (denotada como  $t$  por thickness en inglés) con el radio del tronco ( $R$ ) (Mattheck *et al.* 1993). Este indicador considera que los árboles con relaciones  $< 0,3$  tienen una pérdida de madera sana y son peligrosos. Luley *et al.* (2009) y Koeser *et al.* (2016) se basaron en esta relación para determinar la severidad de la descomposición interna del arbolado urbano, medida con un resistógrafo en cuatro ciudades del Estado de New York y en Tampa, Florida, respectivamente. Aunque los valores de referencia de esta relación tienen algunas desventajas y críticas (Gruber 2008), en general, ha presentado buenos resultados en el desempeño de la estimación de severidad de la descomposición y caída o falla de árboles (Kane y Ryan 2004, Huang *et al.* 2017).

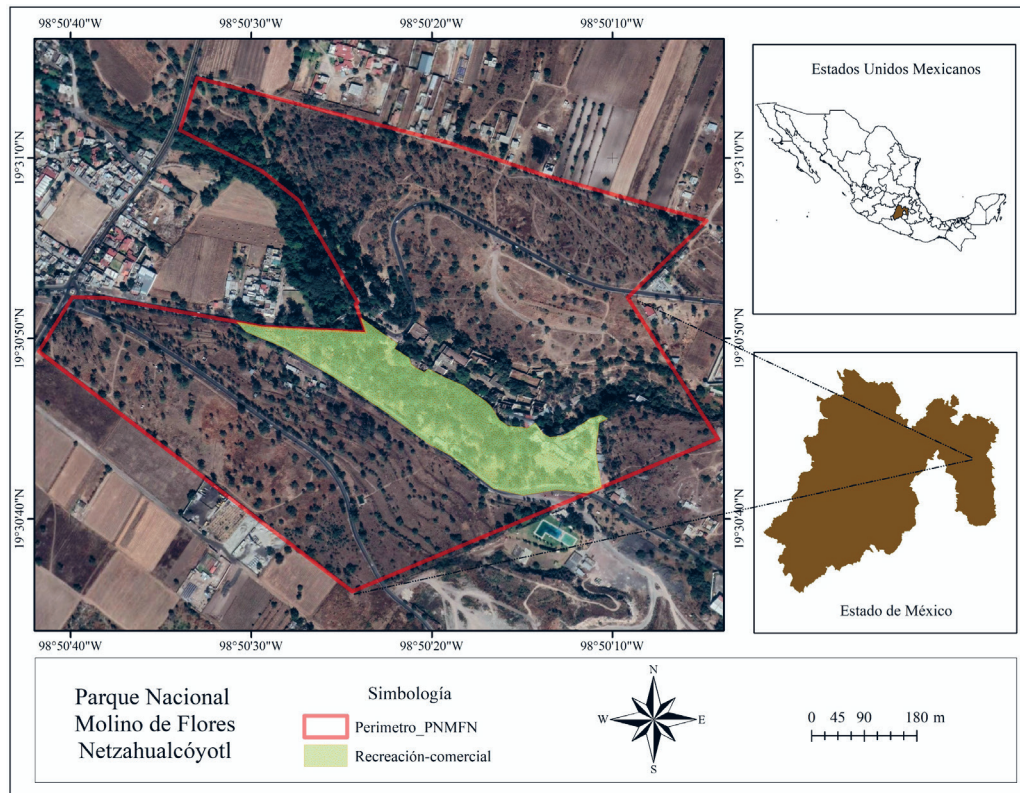
Actualmente, los procesos de evaluación del riesgo generalmente se realizan en un nivel básico basado en una inspección visual del árbol y su entorno (Koeser *et al.* 2017), ya que el uso de herramientas especializadas avanzadas para la detección de la descomposición, como el resistógrafo o tomógrafo sónico, implica un alto costo de adquisición (Papandrea *et al.* 2022). Incluso, requieren conocimientos técnicos especializados para la operación e interpretación de resultados (Johnstone *et al.* 2010). Por tal motivo, se han estudiado las características externas del árbol como indicadores de presencia de descomposición en la parte interna del tronco (Terho 2009). Por ejemplo, la probabilidad de presencia y severidad de descomposición interna aumenta con la edad de los árboles (Luley *et*

*al.* 2009, Koeser *et al.* 2016, Assefa 2020), además la presencia de características externas como cavidades, grietas, cuerpos fructíferos y bultos son buenos predictores de la presencia de descomposición interna del tronco en *Quercus virginiana* Mill y *Q. laurifolia* Michx. (Koeser *et al.* 2016). Los objetivos de este trabajo son: 1) evaluar indicadores de la presencia y severidad de descomposición interna del tronco de árboles de fresno (*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh) en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, 2) determinar si existe una asociación entre el nivel de riesgo obtenido mediante una evaluación básica y la severidad de descomposición observada, y 3) determinar las características externas que influyen en la probabilidad de presencia de descomposición interna que permitan a los evaluadores tener mayor certeza en las decisiones sobre el nivel de riesgo y medidas de mitigación.

## MÉTODOS

*Área de estudio.* La investigación se realizó en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl ubicado en el Municipio de Texcoco, Estado de México, el cual tiene una superficie total de 49,2 ha (SEMARNAT y CONANP 2017). La presión de los visitantes ha generado un daño al arbolado, erosión y compactación del suelo, principalmente en la zona conocida como “convivencia y ruta equina” siendo una de las más visitadas dentro del parque (Herrera *et al.* 2018). Esta zona fue utilizada para llevar a cabo esta investigación debido a que presenta una mayor afluencia de visitantes que pueden generar diversos escenarios de riesgo para las personas y la infraestructura del parque. Para este trabajo, fue nombrada como “recreación-comercial” debido a que se incluyó la parte donde se establecen diferentes tipos de comercio del parque, fue delimitada con base en recorridos de campo e información de la dirección del parque, resultando en un polígono con una superficie de 5,6 ha (figura 1). Se decidió trabajar con la especie fresno debido a que es una de las principales componentes de la población arbórea adulta de la zona (Herrera *et al.* 2018) y una de las principales especies nativas que se encuentran presentes en el entorno urbano del centro de México (Benavides 2023).

*Muestreo y protocolo de medición.* Se seleccionó una muestra de 50 árboles de fresno completamente al azar dentro de la zona de estudio. El tamaño de muestra se calculó utilizando la fórmula para estimar una proporción para una población infinita (Aguilar-Barojas 2005). El nivel de confianza utilizado fue de 95 %, la precisión ( $\delta$ ) se estableció en 15 % y  $P = 0,5$ . El resultado fue de 42,68, decidiéndose aumentar el número de individuos hasta 50. Se evaluó el nivel de riesgo a todos los árboles de la muestra por un mismo evaluador con experiencia básica en evaluación del riesgo mediante el método visual de Pokorny *et al.* (2003). Posteriormente, la evaluación de la descomposición interna del tronco del árbol se realizó utilizando un instrumento



**Figura 1.** Ubicación de la zona de Recreación- comercial en la que fueron evaluados los árboles de *Fraxinus uhdei* dentro del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, Estado de México.

Location of the recreational-commercial area where *Fraxinus uhdei* trees were evaluated in the Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park, State of Mexico.

de medición de la resistencia a la perforación Resi-IML F300® (IML System GmbH, Wiesloch, Germany), el cual cuenta con una broca delgada de 30 cm de longitud y 3 mm de diámetro de la punta. En cada árbol se establecieron dos zonas de evaluación a lo largo del tronco principal: la primera fue localizada a 30 cm del suelo (Base) y la segunda se estableció a 1,3 m del suelo en el diámetro normal (DN).

En cada altura se realizaron tres perforaciones alrededor del tronco, abarcando una profundidad igual a su radio y se registró la presencia de indicadores visuales de descomposición de acuerdo con Pokorny *et al.* (2003). Cuando algún indicador estuvo presente, la primera perforación se realizó sobre dicho indicador, en caso contrario, la primera perforación se tomó siempre en el lado norte del tronco y las demás en el sentido de las manecillas del reloj, separadas 120 ° una de otra con el fin de evaluar la mayor superficie (Koeser *et al.* 2016). Los resistogramas fueron registrados en tiras de papel encerado cuadrado. Para determinar los factores asociados a la descomposición interna del tronco, se registró en cada árbol la presencia de diferentes indicadores de descomposición interna (Pokorny *et al.* 2003, Koeser *et al.* 2016), características estructurales del árbol y presencia de problemas de raíces con la infraestructura (cuadro 1). Para la detección de des-

composición interna del tronco, la longitud (30 cm) de la broca del equipo presentó una limitación para la detección de descomposición en los árboles con radios mayores, situación similar en trabajos anteriores (Luley *et al.* 2009, Koeser *et al.* 2016). Para el diámetro de la base de los árboles evaluados, el valor máximo fue de 72 cm, con lo cual la evaluación del radio de algunos árboles en esta zona fue limitada a la longitud de la broca. Por su parte, el valor máximo del DN fue de 60 cm, por tanto, el radio de todos los árboles en esta zona fue evaluado completamente.

*Análisis de datos.* Los datos obtenidos por árbol se registraron en una hoja de cálculo del software Microsoft Excel® 2019. La calificación de riesgo obtenida del método Pokorny *et al.* (2003), utiliza un sistema numérico que no excede de 10 puntos para calificar el riesgo, esta calificación se obtiene de la suma numérica de tres componentes principales: probabilidad de falla, 1 a 4 puntos; tamaño de la parte defectuosa, 1 a 3 puntos; probabilidad de impactar un objetivo, 1 a 3 puntos; y de manera opcional un cuarto componente, otros factores de riesgo, 1 a 2 puntos. La calificación obtenida de cada árbol se agrupó en cuatro categorías, donde valores de 3 y 4 corresponden a un riesgo muy bajo; 5 y 6 riesgo bajo; 7 y 8 riesgo medio; y 9 y 10

**Cuadro 1.** Variables del modelo saturado de regresión logística para determinar la probabilidad de presencia/ausencia de descomposición interna del tronco de árboles de *Fraxinus uhdei* en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, Estado de México.

Variables of the saturated logistic regression model to determine the probability of presence/absence of internal trunk decay of *Fraxinus uhdei* trees in the Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park, State of Mexico.

| Variable  | Código | Descripción  | Tipo                        |
|---|--------|--|-----------------------------|
| Diámetro de la base del tronco                  | Dbase  | Diámetro medido a 30 cm de altura  | Número entero y decimal     |
| Inclinación del tronco                          | Gi     | Grados de inclinación del tronco principal respecto a la vertical  | Número entero y decimal     |
| Descomposición visual en la zona de perforación | Dv     | Presencia de uno o más indicadores de descomposición visual en alguna de las zonas de perforación (incluyen canchros, grietas, cavidades y/o lesiones con madera muerta) | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Ramas muertas                                   | Rm     | Presencia de ramas y ramillas muertas en la copa del árbol   | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Raíces heridas                                  | Rh     | Presencia de raíces expuestas con algún tipo de daño (cortes, heridas, canchros)   | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Raíces en conflicto con el pavimento            | Rp     | Presencia de pavimento, concreto o construcciones sobre las raíces dentro de la línea de goteo   | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Uniones débiles                                 | Ud     | Presencia de corteza incluida y/o brotes epicórmicos   | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Grietas   | Gr     | Presencia de cualquier tipo de grieta (vertical, horizontal o enrollada) en cualquier parte del árbol diferente a las zonas de perforación                               | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Canchros  | Cc     | Presencia de canchros o heridas en cualquier parte del árbol diferente a las zonas de perforación  | 1 = Presente<br>0 = Ausente |
| Cavidades                                       | Ca     | Presencia de cavidades en cualquier parte del árbol diferente a las zonas de perforación   | 1 = Presente<br>0 = Ausente |

riesgo alto. Se utilizó estadística descriptiva para analizar la calificación de riesgo y sus componentes, la altura total del árbol, el diámetro del tronco de la base y el DN. Para determinar la presencia de descomposición interna se utilizó la regla de decisión establecida por Luley *et al.* (2009), la cual refiere que una caída en la resistencia de perforación de más de 13 mm de largo presente en el resistograma indica descomposición, el resto de la lectura se interpretó como madera sana.

Se establecieron cuatro categorías de severidad de la descomposición con base en los resultados de la relación de “madera sana y el radio del tronco” (Luley *et al.* 2009, Koeser *et al.* 2016) y que corresponden al espesor de la pared de madera sana o residual del tronco calculado: sano (1), incipiente ( $]1 - 0,5[$ ), moderado ( $]0,5 - 0,3[$ ) y grave ( $\leq 0,3$ ). La severidad fue determinada para cada una de las zonas de evaluación utilizando el promedio de madera sana de las tres perforaciones. Además, se calificó la severidad general promediando el resultado de las dos evaluaciones. Para determinar si existe diferencia estadística en la severidad entre zonas de evaluación, se aplicó la prueba de rangos de Wilcoxon con una confiabilidad del 95 %, debido a que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad. Posteriormente, para evaluar el grado de asociación que existe entre la severidad de la descomposición en cada zona de evaluación con la calificación de riesgo (Cri) de

cada árbol y la calificación de probabilidad de falla (PF) evaluado, se realizó un análisis de correlación de Spearman con una confiabilidad del 95 %. Para mejorar la percepción de los patrones de asociación, se realizaron gráficos de dispersión con un efecto *jitter* que evita la sobreposición de puntos utilizando el software estadístico R Studio.

Para modelar los factores asociados con la presencia de descomposición interna del tronco, se realizó un análisis de regresión logística binaria múltiple. La variable dependiente fue la presencia o ausencia de descomposición interna del tronco, donde los árboles con relación “madera sana y el radio del tronco” menor a 1 se consideraron con presencia de descomposición. La relación utilizada para este análisis fue la calificación de severidad general. La selección del modelo se realizó iniciando con el modelo saturado mediante la función *glm()* y aplicando el método por pasos hacia atrás utilizando la reducción del criterio de información de Akaike (AIC) de la función *stepAIC()* del software estadístico R Studio (Ripley *et al.* 2023). Se utilizó la función *anova()* para determinar la significancia de las variables del modelo resultante, las variables no significativas fueron eliminadas y se generó un modelo reducido, el cual fue comparado con su antecesor mediante análisis de la devianza (Fox y Weisberg 2019); sin embargo, en el cual no se encontró diferencia estadística significativa ( $P > 0,05$ ) al eliminar las variables del modelo. Finalmen-

te, con la función *predictorEffect()* de la librería *effects* (Fox y Weisberg 2020) se realizaron gráficas del efecto predictor de cada variable independiente incluida en el modelo final, utilizando como referencia la presencia de todos los predictores.

## RESULTADOS

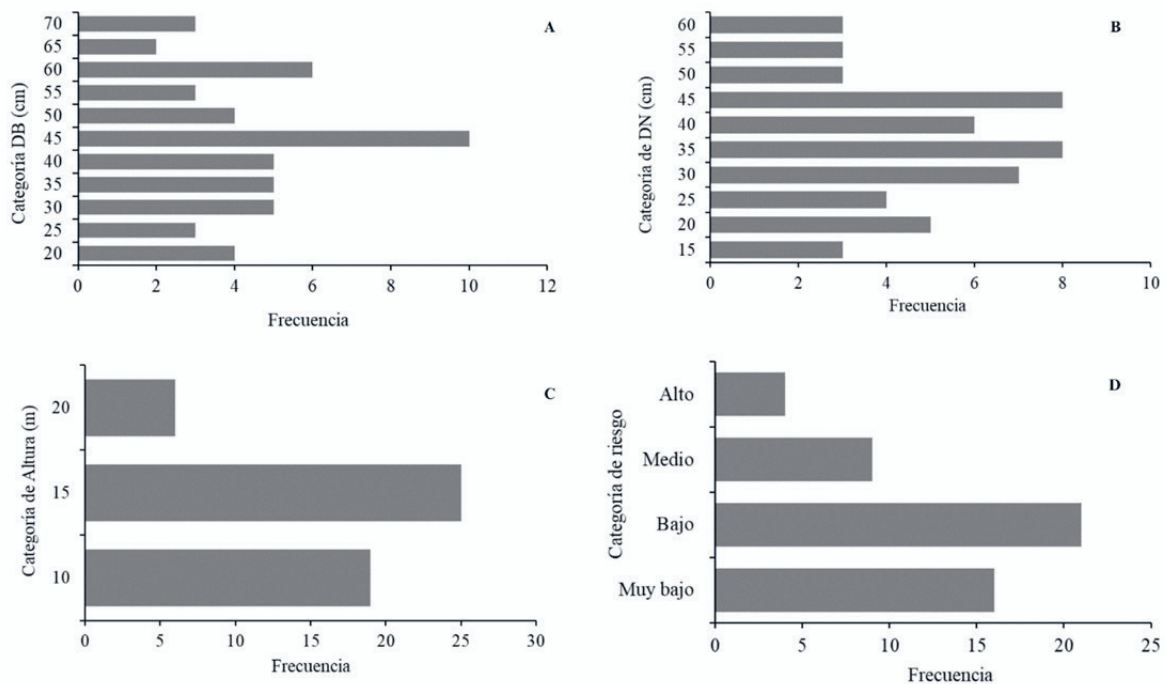
*Características dendrométricas y nivel de riesgo.* Los árboles evaluados tuvieron un diámetro normal de  $36 \pm 12$

cm, mientras que en la base fue de  $44 \pm 14$  cm (cuadro 2). La distribución por categoría diamétrica se concentró principalmente en la categoría de 45 para la base y 35 a 45 para el diámetro normal (figuras 2A y 2B). El 50 % de los árboles presentaron una altura en la categoría de 15 m (figura 2C). La calificación de riesgo se concentró principalmente en el nivel bajo (figura 2D) con una mediana de 6 (cuadro 2) y ningún árbol se calificó con riesgo muy alto. En cuanto a la probabilidad de falla, probabilidad de impacto y consecuencias, todas obtuvieron una calificación mediana de 2.

**Cuadro 2.** Resumen estadístico de las variables dendrométricas de *Fraxinus uhdei* (n = 50) y componentes de la calificación de riesgo evaluadas mediante el método de Pokorny.

Statistical summary of the dendrometric variables of *Fraxinus uhdei* (n = 50) and components of the risk score evaluated using the Pokorny method.

| Variable   | Media | Desviación estándar | Mediana | Mínimo | Máximo |
|--|-------|---------------------|---------|--------|--------|
| Diámetro base (cm)                                   | 43,52 | 13,61               | 43,15   | 20,30  | 72,00  |
| Diámetro normal (cm)                                 | 36,49 | 11,75               | 36,75   | 16,50  | 60,30  |
| Altura (m)   | 13,79 | 2,98                | 14,00   | 7,50   | 18,80  |
| Calificación de riesgo                               | 5,58  | 1,70                | 6,00    | 3,00   | 9,00   |
| Probabilidad de falla                                | 1,80  | 0,93                | 2,00    | 1,00   | 4,00   |
| Probabilidad de impacto                              | 2,00  | 0,57                | 2,00    | 1,00   | 3,00   |
| Consecuencias (tamaño de la parte con algún defecto) | 1,78  | 0,62                | 2,00    | 1,00   | 3,00   |



**Figura 2.** Distribución de: A. Categoría diamétrica de la base del árbol (DB). B. Categoría diámetro normal (DN). C. Categoría de altura. D. Categoría de riesgo de árboles de *Fraxinus uhdei* (n = 50) evaluados.

Distribution of: A. Diameter class of the tree base (DB). B. Diameter class at breast height (DN). C. Height class. D. Risk category of *Fraxinus uhdei* trees (n = 50) evaluated.

**Presencia y severidad de la descomposición.** La presencia de descomposición fue mayor cuando la evaluación se realizó en la zona de la base del árbol que en la zona del DN, con 28 % y 12 % de la muestra, respectivamente (cuadro 3). No se identificó descomposición interna en tres categorías del diámetro normal (25, 50 y 60) en las zonas de evaluación. Mientras, un número mayor de árboles con descomposición en la base se encontraron en las categorías de 35 y 45, y la mayoría de árboles con descomposición en el DN perteneció a la categoría de 40 (figura 3A). La

evaluación en la base del tronco permitió identificar la presencia de descomposición interna en las categorías diamétricas de 15 y 55, en las cuales la evaluación en el DN no detectó descomposición (figura 3A).

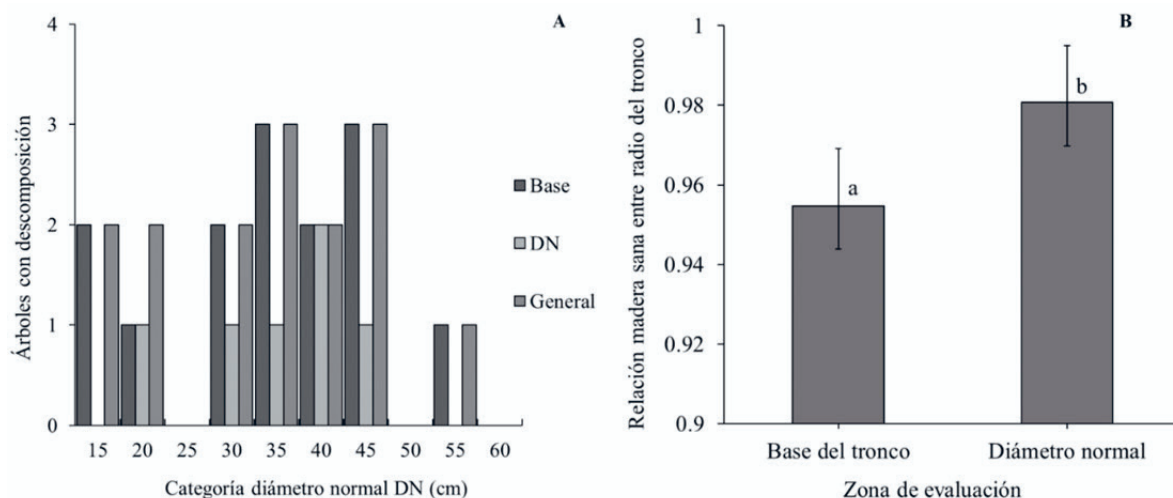
La relación “madera sana y el radio del tronco” (severidad de la descomposición) entre las dos zonas de evaluación mostró diferencias estadísticas significativas ( $P < 0,05$ ) a través de la prueba de rangos de Wilcoxon. De tal manera que la severidad de la base tuvo una relación promedio de 0,954 mientras que en el DN fue de 0,98 (figura 3B).

**Cuadro 3.** Presencia y severidad de descomposición de la madera interna a 30 cm (Base) y a 1,3 m de altura (DN) en árboles de *Fraxinus uhdei* (n = 50) en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, Estado de México.

Presence and severity of internal wood decay at 30 cm (Base) and 1.3 m height (DN) in *Fraxinus uhdei* trees (n = 50) in the Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park, State of Mexico.

| Zona de evaluación | Árboles con descomposición | Proporción | IC 95 %  |          | Severidad descomposición (relación “madera sana y radio del tronco”) |                            |                          |                      |
|--------------------|----------------------------|------------|----------|----------|--|----------------------------|--------------------------|----------------------|
|                    |                            |            | Inferior | Superior | Sano (1)   | Incipiente ( $< 1 > 0,5$ ) | Moderada ( $0,5 > 0,3$ ) | Grave ( $\leq 0,3$ ) |
| Base               | 14                         | 0,28       | 0,16     | 0,40     | 36,00  | 13,00                      | 1,00                     | 0,00                 |
| DN                 | 6                          | 0,12       | 0,03     | 0,21     | 44,00  | 6,00                       | 0,00                     | 0,00                 |
| Promedio general   | 15                         | 0,30       | 0,17     | 0,43     | 35,00  | 14,00                      | 1,00                     | 0,00                 |

IC = Intervalo de confianza al 95 % de confiabilidad.



**Figura 3.** A. Árboles con presencia de descomposición por categoría diamétrica (DN) en cada zona de evaluación y B. Promedio y barras de error de la relación “madera sana y radio del tronco” por zona de evaluación. Letras diferentes presentan diferencia estadística significativa de acuerdo con la prueba de rangos de Wilcoxon ( $P < 0,05$ ).

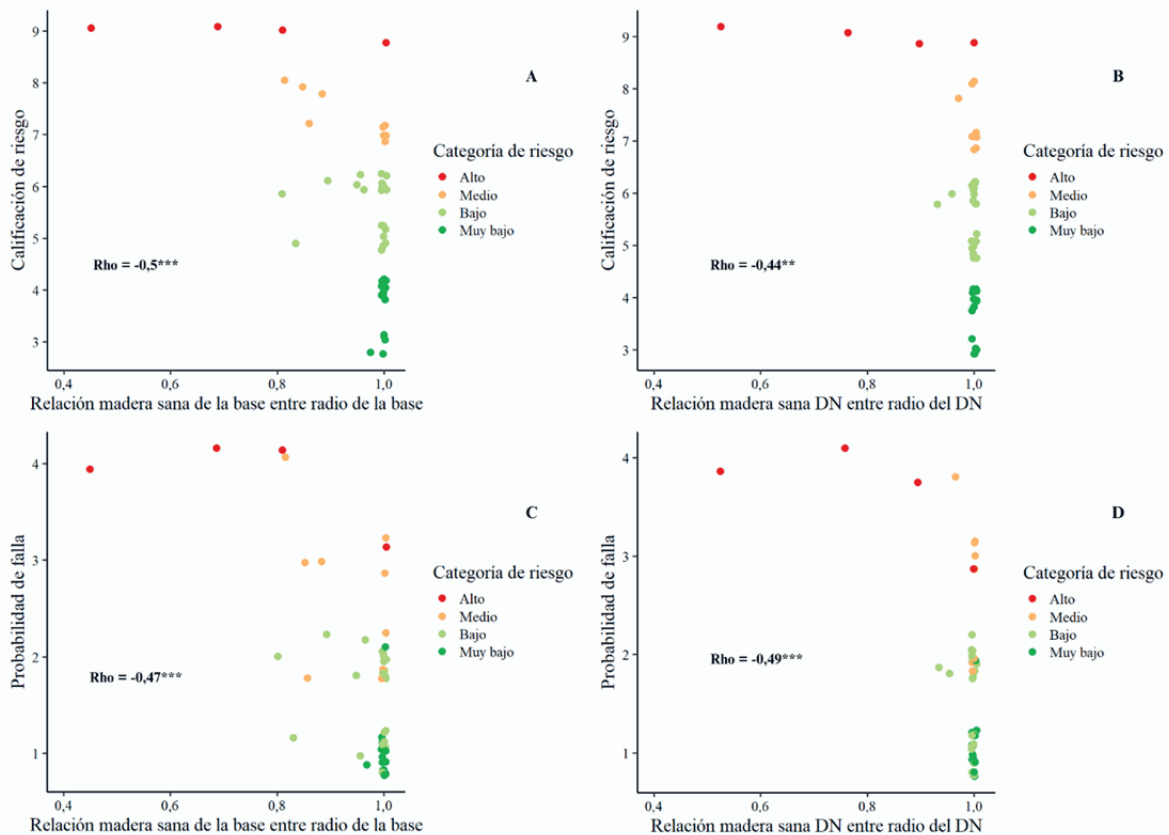
A. Trees with the presence of decay by diameter category (DN) in each evaluation zone and B. Average and error bars of the sound wood-stem radius ratio by evaluation zone. Different letters present a significant statistical difference according to the Wilcoxon rank test ( $P < 0.05$ ).

De acuerdo con la relación de madera sana y el radio del tronco, ningún árbol presentó un nivel de descomposición grave  $\leq 0,3$  (cuadro 3). En la zona de la base, 13 árboles presentaron descomposición interna incipiente ( $]1 - 0,5[$ ) y solo un árbol presentó descomposición moderada ( $]0,5 - 0,3[$ ). En el caso del DN, todos los árboles con descomposición tuvieron un nivel de descomposición incipiente.

*Relación entre la severidad de descomposición, calificación de riesgo y probabilidad de falla.* El grado de asociación entre la relación “madera sana y el radio del tronco” (severidad de la descomposición) de las dos zonas de evaluación, con la calificación de riesgo, y con la calificación de probabilidad de falla fue estadísticamente significativa ( $P < 0,05$ ). La “relación madera sana y el radio del tronco” en las dos zonas de evaluación tiene una correlación negativa moderada y moderada débil con la calificación de riesgo (figuras 4A y 4B). El grado de asociación con la calificación

de riesgo (Cri) fue mayor cuando la evaluación se realizó en la base del árbol ( $Rho = -0,5$ ). Por otra parte, el grado de asociación entre la probabilidad de falla (PF) y la relación “madera sana y el radio del tronco” presentó una intensidad moderada débil con un coeficiente Rho de  $-0,47$  y  $-0,49$  para la base y el DN, respectivamente (figuras 4C y 4D).

*Características externas asociadas a la descomposición interna del tronco.* Los resultados de la regresión logística (cuadro 4) indican que la presencia de indicadores de descomposición en alguna de las zonas de perforación (DV) y la presencia de raíces heridas (Rh) son variables significativas ( $P < 0,05$ ) que contribuyen a predecir la presencia de descomposición interna del tronco de *F. uhdei*. El modelo generado presenta un área bajo la curva (ABC) de 0,82. De acuerdo con el modelo final de regresión logística, árboles con presencia de indicadores visuales de descomposición en la parte baja del tronco (DV) tienen 13 veces más pro-



**Figura 4.** Gráfica de dispersión con correlación de Spearman (Rho) para: A. Relación “madera sana de la base del tronco y radio de la base” y Calificación de riesgo. B. Relación “madera sana del DN (diámetro normal) y el radio del DN” y Calificación de riesgo. C. Relación “madera sana de la base del tronco y el radio de la base” y probabilidad de falla. D. Relación “madera sana del DN” y Probabilidad de falla. Para evitar la sobreposición de puntos se aplicó un efecto *jitter* con variación vertical de 0,25 y horizontal de 0,005. \*\* =  $P < 0,01$  \*\*\* =  $P < 0,001$ .

Scatter plot with Spearman correlation (Rho) for: A. Sound wood - stem radius ratio at the base and Risk Rating. B. Sound wood - stem radius ratio at the DN (diameter at breast height DBH) and Risk Rating. C. Sound wood - stem radius ratio at the base and probability of failure and D. Sound wood - stem radius ratio at the DN and Probability of failure. To avoid overlapping points, a jitter effect was applied with a vertical variation of 0.25 and horizontal of 0.005. \*\* =  $P < 0.01$  \*\*\* =  $P < 0.001$ .

babilidad de presentar descomposición interna del tronco en comparación con árboles sin DV. Por su parte, los árboles con raíces expuestas con heridas (Rh) tienen 8 veces más probabilidad de presentar descomposición interna del tronco en comparación con árboles sin Rh (cuadro 4). El efecto conjunto de los predictores se describe como sigue:

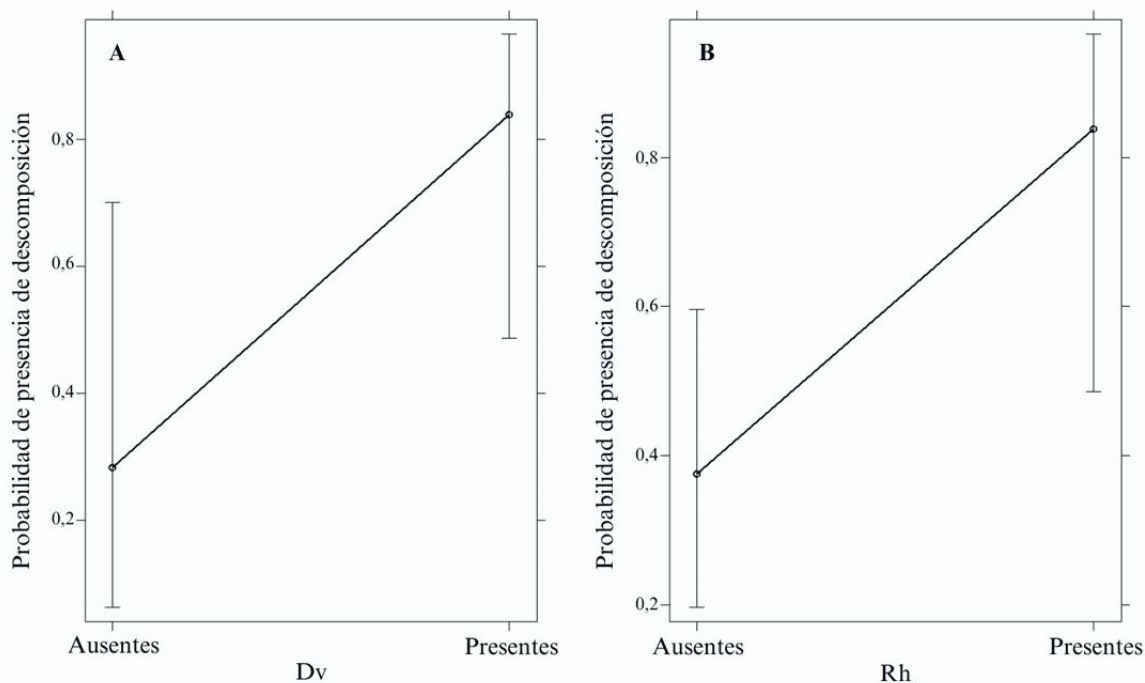
en ausencia de DV y presencia de RH la probabilidad de presencia de descomposición interna del tronco es de 0,28, caso contrario cuando DV y RH están presentes la probabilidad es de 0,84 (figura 5A). En ausencia de Rh y presencia de DV la probabilidad de descomposición interna es de 0,37 (figura 5B).

**Cuadro 4.** Modelo final del análisis de regresión logística para predecir la presencia/ausencia de descomposición interna del tronco de *Fraxinus uhdei* en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, Estado de México.

Final model of the logistic regression analysis to predict the presence/absence of internal decay of the trunk of *Fraxinus uhdei* in the Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park, State of Mexico.

| Variable     | Coeficiente ( $\beta$ ) | EE   | IC       |          | Exp ( $\beta$ ) | P      | ABC  | IC       |          |
|--------------|-------------------------|------|----------|----------|-----------------|--------|------|----------|----------|
|              |                         |      | Inferior | Superior |                 |        |      | Inferior | superior |
| Intercepto   | -3,09                   | 0,90 | -4,86    | -1,32    | -               | < 0,01 |      |          |          |
| DV presentes | 2,58                    | 0,94 | 0,74     | 4,42     | 13,20           | 0,01   | 0,82 | 0,71     | 0,94     |
| Rh presentes | 2,16                    | 0,91 | 0,36     | 3,95     | 8,65            | 0,02   |      |          |          |

ER = Error estándar, IC = intervalo de confianza al 95 % de confiabilidad, ABC = Área bajo la curva.



**Figura 5.** Gráficas del efecto predictor para A. Descomposición visual (DV) presente en alguna de las zonas de perforación y B. Raíces expuestas (Rh) con alguna lesión o herida. Las barras indican el intervalo de confianza al 95 % de confiabilidad.

Graphs of the predictive effect for A. Visual decay (DV) present in any of the perforation areas and B. Exposed roots (Rh) with some lesion or wound. The bars indicate the confidence interval at 95 % reliability.



## DISCUSIÓN

*Riesgo, presencia y severidad de la descomposición.* Las características dendrométricas de la muestra analizada son similares al promedio del arbolado de la zona de estudio reportado por Hernández-López *et al.* (2023) donde se distribuyen los árboles de mayores dimensiones dentro del PNMFN con diámetros de entre 31 a 38 cm y alturas entre 14 y 15 m. Esto indica que son árboles maduros, en comparación con otras zonas del parque donde se considera una población juvenil en crecimiento con diámetro promedio de entre 7,5 y 22 cm (Hernández-López *et al.* 2023). La calificación de riesgo de la muestra analizada se concentró principalmente en los niveles bajos y muy bajos, en donde la mediana de probabilidad de falla indica la presencia de varios defectos moderados en el árbol (Pokorny *et al.* 2003). Por su parte, la probabilidad de impacto, expresada como la tasa de ocupación del sitio, obtuvo una mediana que indica una ocupación de uso intermedio, mientras que el valor de la mediana de consecuencias, estimadas a través del tamaño de la parte defectuosa, indica que esta parte se encuentra en un intervalo de 10 a 50 cm de diámetro (Pokorny *et al.* 2003). La calificación obtenida mediante el método Pokorny en esta evaluación puede ayudar a priorizar los individuos que requieren de acciones de mitigación del riesgo inmediatas (Koeser 2014) y mejorar la gestión del riesgo del arbolado dentro del parque.

De manera general, la proporción de árboles con descomposición (30 %) fue similar a lo reportado para *Quercus virginiana*, el cual tuvo una incidencia de descomposición de 29,4 % en la ciudad de Tampa, Florida, EE. UU., y fue baja comparada con *Quercus laurifolia* que representó un 67,4 % de los árboles evaluados en la misma ciudad (Koeser *et al.* 2016). Las diferencias de incidencia de descomposición en el entorno urbano pueden deberse a la variabilidad entre especies, variación intraespecífica en resistencia a la descomposición y que, de manera general, las angiospermas presentan mayores índices de descomposición interna de la madera que las gimnospermas (Baietto y Wilson 2010). Trabajos previos que indican que la probabilidad de incidencia de descomposición interna aumenta en árboles con mayor diámetro normal (Luley *et al.* 2009, Koeser *et al.* 2016, Assefa 2020) y generalmente disminuye en diámetros superiores a 75 cm (Koeser *et al.* 2016). Sin embargo, los resultados de este trabajo no muestran un aumento en la incidencia en troncos más gruesos, aunque el número de árboles por categoría diamétrica de la muestra utilizada pudo ser un factor limitante para detectar una mayor incidencia de descomposición en diámetros mayores. Además, en algunas especies como *Ulmus procera* Salisb, *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. y *Corymbia maculata* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, la descomposición interna se presenta en un amplio rango de diámetros, afectando tanto a árboles jóvenes como maduros (Orozco-Aguilar *et al.* 2018).

La parte inferior del tronco de los árboles es más susceptible a la descomposición (Koeser *et al.* 2016), generalmente está asociada con la presencia de hongos xilófagos en el sistema de raíces y en el cuello del tronco (Luley 2012). Esto puede explicar la diferencia encontrada entre el promedio de la relación “madera sana entre el radio del tronco” obtenida en la Base y en el DN, la cual indica que existe mayor grado de descomposición en la base del tronco que en la zona del DN. El resultado es similar al reportado para especies como *Ulmus procera*, *Platanus x acerifolia*, *Corymbia maculata*, en donde el área transversal con descomposición fue mayor en la base del tronco en comparación con la descomposición detectada en el diámetro normal (Orozco-Aguilar *et al.* 2018). Los resultados enfatizan que en las evaluaciones de riesgo de *F. uhdei* se deberá poner mayor atención en la base del tronco al momento de evaluar la presencia de descomposición, esto considerando toda la información disponible, como el perfil de falla de la especie.

La pérdida de la resistencia de la madera en árboles vivos se considera grave cuando la proporción de madera sana respecto al radio es igual o menor a 0,3 (Mattheck *et al.* 1993), en muchos casos este límite se toma como referencia para indicar que el tronco de estos árboles tiene mayor probabilidad de fallar y deben ser inspeccionados con prioridad (Calaza e Iglesias 2016). Sin embargo, en algunos casos la descomposición interna en árboles urbanos es frecuente, pero rara vez alcanza un nivel grave, por ejemplo, en *Acer platanoides* y *A. saccharinum* (Luley *et al.* 2009). De acuerdo con los resultados de la relación “madera sana y radio del tronco”, ningún árbol evaluado presentó una severidad de descomposición grave (< 0,3). Estos resultados indicarían que ningún árbol evaluado tiene una alta probabilidad de que su tronco falle, por lo que la baja frecuencia de descomposición y nivel de severidad pueden ser indicios de que *F. uhdei* es una especie que compartimenta adecuadamente, al igual que otras especies del mismo género como *F. americana* L. y *F. pennsylvanica* Marsh. (Smith *et al.* 2001, Watson 2008, Docola *et al.* 2011). Sin embargo, es importante mencionar que se requiere mayor investigación considerando factores adicionales, como un mayor tamaño de muestra, árboles con mayor nivel de riesgo, mayores diámetros de tronco, entre otros, para determinar la capacidad de compartimentación de *F. uhdei*. Aunque el cálculo de la pérdida de resistencia basada en la “relación madera sana y el radio del tronco” puede tener errores en su aplicación, debido a que no se ajustan a la forma natural de los árboles y se asume que la sección evaluada es completamente circular (Li *et al.* 2022), los resultados contribuyen en la toma de decisiones para gestionar el nivel de riesgo del arbolado, pero no debe considerarse como el punto clave de decisión (Calaza e Iglesias 2016). Esto se debe a que el tronco de algunos árboles con relaciones menores a 0,3 puede tener una estabilidad adecuada (Kobza *et al.* 2022).

*Relación entre severidad-riesgo y severidad-probabilidad de falla.* La correlación negativa moderada entre la relación “madera sana y el radio” de las dos zonas de evaluación y la calificación de riesgo indica que cuando la relación de “madera sana y el radio” incrementa hasta 1 (sin descomposición) la calificación de riesgo del árbol disminuye. Es posible que la intensidad moderada de relación se debe a que la Cri depende de tres componentes que incluyen la probabilidad de falla, probabilidad de impacto y consecuencias, mientras que la relación “madera sana y el radio”, obtenida por el resistógrafo, es una medida más detallada sobre la probabilidad de falla de la parte del árbol que se ha evaluado con el aparato (Koeser *et al.* 2017), en este caso del tronco del árbol. Por su parte, la intensidad moderada de asociación entre la probabilidad de falla (PF) y la relación “madera sana y el radio” muestra una tendencia negativa: cuando la relación de “madera sana y el radio” incrementa hasta 1 (sin descomposición), la calificación de probabilidad de falla del tronco disminuye. La calificación de probabilidad de falla considera la cantidad y severidad de características externas visibles consideradas como defectos en un árbol (Pokorny *et al.* 2003). Si bien la calificación de Cri incluye características no solo del tronco, la existencia de un nivel de asociación estadísticamente significativo con la presencia de descomposición interna indica que la evaluación visual básica de riesgo mediante el método Pokorny genera resultados que lo vuelven un método razonable y creíble ya que hasta cierto punto mide lo que tiene que medir (Norris 2007) aunque con ciertas limitaciones del método, como la pérdida de detalles en el registro del historial del árbol, condiciones del sitio de crecimiento y falta de consideración de algunas medidas dimensionales del árbol como la altura y el diámetro de la copa (Koeser *et al.* 2014).

*Predicción de la descomposición interna del tronco.* El diámetro de la base del tronco no fue un factor estadísticamente significativo para predecir la presencia de descomposición interna del tronco del fresno. Esto es contrario a lo reportado por Luley *et al.* (2009) y Koeser *et al.* (2016), quienes demostraron que el diámetro del tronco es buen predictor de descomposición interna en árboles de *Quercus* y algunas especies de *Acer*. Sin embargo, para el caso de DV, el resultado de este trabajo coinciden con Koeser *et al.* (2016), los cuales demostraron que los indicadores de descomposición visual externos (cuerpos fructíferos, grietas, cavidades, protuberancias) predicen de manera significativa la presencia de descomposición interna en *Quercus laurifolia* y *Q. virginiana*. Koeser *et al.* (2016) registraron los indicadores visuales en cualquier parte del árbol, mientras que en este estudio los indicadores fueron separados entre aquellos presentes en la zona de evaluación y en alguna otra parte del árbol, encontrando predictores significativos solo los primeros, en los que se incluyeron las grietas, cavidades, canchros y/o lesiones con madera muerta. La presencia de estas características en el árbol se de-

nomina como defectos estructurales y son inspeccionados en la evaluación visual del riesgo de los árboles (Pokorny *et al.* 2003, Norris 2007). Por tanto, en la evaluación de riesgo de *F. uhdei* sugerimos que el evaluador deberá considerar la presencia de indicadores visuales externos de descomposición como buenas señales de la existencia de descomposición interna, principalmente en la parte baja del tronco; sin embargo, aunque en algunos casos, la probabilidad de presencia es alta, la descomposición presente no necesariamente aumenta el riesgo (Kobza *et al.* 2022). Lo anterior se explica debido a que la estabilidad del árbol depende en gran medida de la cantidad de descomposición que esté presente (Kim *et al.* 2021). Ninguno de los ejemplares analizados con descomposición interna detectada con el resistógrafo presentó una descomposición grave ( $\leq 0,3$ ); por tanto, aunque los DV son buenos predictores de descomposición interna, los evaluadores del riesgo tienen que tener en consideración que algunas características dimensionales de los DV, como la profundidad, pueden tener mayor importancia en la extensión de la descomposición (Lap y Slater 2020). Además, la presencia de descomposición puede no afectar de manera severa la estabilidad del tronco de *F. uhdei*.

El segundo predictor significativo de descomposición interna fueron las raíces expuestas con heridas (Rh). Las raíces dañadas tienen un impacto negativo en la vitalidad y resistencia mecánica del árbol (Ogle 2021) y en algunas especies son uno de los principales defectos externos asociados a la descomposición interna del tronco (Terho 2009). Las raíces expuestas con heridas pueden generar puntos de pudrición que afectan tanto raíces gruesas como a la parte baja del tronco de los árboles (Luley 2012, Alani y Lantini 2020). Lo anterior puede explicar por qué en nuestro análisis, la presencia y severidad de descomposición interna fue mayor en la base del tronco de los árboles evaluados. Evaluar las raíces del arbolado urbano comprende un desafío y su evaluación puede ser un proceso limitado (Alani y Lantini 2020). Ante este panorama, los resultados obtenidos contribuyen en el conocimiento sobre la descomposición interna de árboles de *F. uhdei* en condiciones urbanas.

## CONCLUSIONES

Los indicadores de presencia de descomposición interna de la madera del tronco de *F. uhdei* fueron más frecuentes en la zona de la base del tronco que a la altura de 1,30 m, sin embargo, de acuerdo con la relación “madera sana y el radio del tronco”, el grado de severidad evaluada en ningún caso alcanzó el umbral comúnmente utilizado que indica una reducción de la estabilidad estructural del tronco. La calificación de riesgo y probabilidad de falla de la evaluación básica mediante el método de Pokorny se asocia significativamente con la severidad de la potencial descomposición interna del tronco tanto en la base como en el diámetro normal, por lo que se puede considerar que

el método cumple su función teniendo en cuenta las limitaciones del mismo. La presencia de indicadores visuales externos de descomposición en la parte baja del tronco y las raíces expuestas con heridas predicen de manera significativa la descomposición interna de la madera del tronco de *F. uhdei*, por tanto, la evaluación del riesgo debe poner mayor énfasis en aquellos árboles con estas características para determinar una calificación de riesgo más confiable.

#### CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Pablo Hernández-López: planificación del trabajo, trabajo de campo, análisis de datos, integración y elaboración de manuscrito y correcciones. Tomás Martínez-Trinidad: supervisión del trabajo, revisión del manuscrito y correcciones. Leopoldo Mohedano-Caballero: revisión del manuscrito y aplicación de correcciones. Patricia Hernández-de la Rosa: revisión general del manuscrito y correcciones. Manuel de Jesús González-Guillén: revisión general del manuscrito y correcciones. Juana Fonseca-González: gestión del resistógrafo, revisión general del manuscrito.

#### FINANCIAMIENTO

El trabajo contó con apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT, MX) a través de la beca otorgada para estudios de posgrado del primer autor, así como financiamiento parcial de la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) "Mejoramiento estructural y funcional de los ecosistemas forestales" del Colegio de Postgraduados, MX.

#### AGRADECIMIENTOS

A la dirección del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl por las facilidades brindadas en la toma de datos.

#### REFERENCIAS

- Aguilar-Barojas S. 2005. Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco* 11(1-2): 333-338.
- Alani AM, L Lantini. 2020. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: a focus on ground penetrating radar. *Surveys in Geophysics* 41: 605-646. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09548-6>
- Assefa A. 2020. Estimation of strength loss and decay severity of *Juniperus procera* by Juniper pocket rots fungus, *P. demidoffii* in Ethiopian forests. *Journal of Forest and Environmental Science* 36(2): 143-155. DOI: <https://doi.org/10.7747/JFES.2020.36.2.143>
- Baietto M, AD Wilson. 2010. Relative in vitro wood decay resistance of sapwood from landscape trees of southern temperate regions. *HortScience* 45(3): 401-408. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.3.401>
- Benavides HM. 2023. La cubierta arbórea de la Alameda Central de la Ciudad de México: 1ª parte. *Revista mexicana de ciencias forestales* 14(75): 4-34. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1294>
- Calaza MP, MI Iglesias. 2016. *El riesgo del arbolado urbano. Contexto, concepto y evaluación*. España. Mundiprensa. 503 p.
- Dahle GA, KR James, B Kane, JC Grabosky, A Dettler. 2017. A review of factors that affect the static load-bearing capacity of urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry* 43(3): 89-106. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2017.009>
- Doccola JJ, DR Smitley, TW Davis, JJ Aiken, PM Wild. 2011. Tree wound responses following systemic insecticide trunk injection treatments in green ash (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) as determined by destructive autopsy. *Arboriculture & Urban Forestry* 37(1): 6-12. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2011.002>
- Fox J, S Weisberg. 2019. *An R companion to applied regression*. Third edition. United States of America. Sage publications. 608 p.
- Fox J, S Weisberg. 2020. Predictor effects graphics gallery. Consultado 17 mar. 2023 Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/effects/vignettes/predictor-effects-gallery.pdf>
- Gruber F. 2008. Untenable failure criteria for trees: I. The residual wall thickness rule. *Arboricultural Journal* 31(1): 5-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/03071375.2008.9747514>
- Hernández-López P, T Martínez-Trinidad, P Hernández-de la Rosa, L Mohedano-Caballero, M de J González-Guillén. 2023. Caracterización ecológica del arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 29(3): 93-108. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.002>
- Herrera LA, A Luque-Delgadillo, G Ramírez-García, A Espejel-García, A Vázquez-Alarcón, JD Gómez-Díaz, AI Monterroso-Rivas. 2018. Estado de los recursos naturales en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial* 16(2): 46-57. Consultado 17 mar. 2023. Disponible en: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteologia/article/view/1165>
- Huang YS, FL Hsu, CM Lee, JY Juang. 2017. Failure mechanism of hollow tree trunks due to cross-sectional flattening. *Royal Society open science* 4(4): 160972. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.160972>
- Johnstone D, G Moore, M Tausz, M Nicolas. 2010. The measurement of wood decay in landscape trees. *Arboriculture & Urban Forestry* 36(3): 121-127. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2010.016>
- Kane BC, HDP Ryan. 2004. The accuracy of formulas used to assess strength loss due to decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 30(6): 347-356. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2004.042>
- Kim Y, H Rahardjo, DL Tsen-Tieng. 2021. Mechanical behavior of trees with structural defects under lateral load: A numerical modeling approach. *Urban Forestry & Urban Greening* 59: 126987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.126987>
- Kobza M, R Ostrovský, K Adamčíková, K Pastirčáková. 2022. Stability of trees infected by wood decay fungi estimated by acoustic tomography: a field survey. *Trees* 36: 103-112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02185-w>

- Koeser AK, DC McLean, G Hasing, RB Allison. 2016. Frequency, severity, and detectability of internal trunk decay of street tree *Quercus* spp. in Tampa, Florida, US. *Arbiculture & Urban Forestry* 42(4): 217-225. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.020>
- Koeser AK, G Hasing, D McLean, R Northrop. 2014. Tree risk assessment methods: A comparison of three common evaluation forms: ENH1226/EP487, 11/2013. *EDIS* 2014(1). DOI: <http://doi.org/10.32473/edis-ep487-2013>
- Koeser AK, RJ Hauer, RW Klein, JW Miesbauer. 2017. Assessment of likelihood of failure using limited visual, basic, and advanced assessment techniques. *Urban Forestry & Urban Greening* 24: 71-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.024>
- Lap YC, D Slater. 2020. An investigation into mechanical wound parameters that may affect the extent of internal decay in wounded stems of big-leaved acacia (*Acacia mangium* Willd.) and ear-leaved acacia (*Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.). *Arbicultural Journal* 42(4): 208-227. DOI: <https://doi.org/10.1080/03071375.2020.1798680>
- Li H, X Zhang, Z Li, J Wen, X Tan. 2022. A review of research on tree risk assessment methods. *Forests* 13(10): 1556. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl3101556>
- Luley C. 2012. Indicators of decay in urban trees. *Arborist News* 21(3): 18-20.
- Luley CJ, DJ Nowak, EJ Greenfield. 2009. Frequency and severity of trunk decay in street tree maples in four New York cities. *Arbiculture & Urban Forestry* 35(2): 94-99. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2009.017>
- Matheny N, J Clark. 2009. Tree risk assessment: What we know (and what we don't know). *Arborist news* 18: 28-33.
- Mattheck C, K Bethge, B Erb. 1993. Failure criteria for trees. *Arbicultural Journal* 17(2): 201-209, DOI: <https://doi.org/10.1080/03071375.1993.9746963>
- Norris M. 2007. Tree risk assessments: What works-what does not-can we tell. A review of a range of existing tree risk assessment methods. ISAAC Conference Perth 2007. Consultado 15 en. 2023. Disponible en: [http://unri.org/ECO%20697U%20S14/norris- tree\\_risk\\_assessments.pdf](http://unri.org/ECO%20697U%20S14/norris- tree_risk_assessments.pdf)
- Ogle C. 2021. Structural defects, tree failure, and risk. In Johnson D. (Coor). *Tree steward manual*. Virginia, USA. Virginia Cooperative Extension Master Gardeners-Virginia Tech Publishing. p. 260-291. DOI: <https://doi.org/10.21061/treesteward>
- Orozco-Aguilar L, D Johnstone, SJ Livesley, C Brack. 2018. The overlooked carbon loss due to decayed wood in urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening* 29: 142-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.008>
- Papandrea SF, MF Cataldo, G Zimbalatti, AR Proto. 2022. Comparative evaluation of inspection techniques for decay detection in urban trees. *Sensors and Actuators A: Physical* 340: 113544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113544>
- Pokorny J, J O'Brien, R Hauer, G Johnson, J Albers, P Bedker, M Mielke. 2003. *Urban tree risk management: a community guide to program design and implementation*. USA. USDA Forest Service. 194 p.
- Ripley B, B Venables, DM Bates, K Hornik, A Gebhardt, D Firth. 2023. Package MASS. Consultado 15 jun. 2023. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/MASS/MASS.pdf>
- SEMARNAT, CONANP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, MX). 2017. Áreas naturales protegidas federales de México. Noviembre 2017. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Consultado 20 nov. 2022. Disponible en: <http://geoportail.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>
- Smith KT, WC Shortle, KR Dudzik. 2001. Patterns of storm injury and tree response. USA. USDA Forest Service. Consultado 10 feb. 2023. Disponible en: <https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/na/NA-TP-02-01.pdf>
- Soge AO, OI Popoola, AA Adetoyinbo. 2021. Detection of wood decay and cavities in living trees: A review. *Canadian Journal of Forest Research* 51(7): 937-947. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0340>
- Son J, G Lee, J Shin. 2022. Noninvasive sonic tomography for detecting internal defects in old, large oriental white oak in cultural heritage areas. *Forests* 13(5): 638. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl3050638>
- Suchocka M, MW Heciak, P Jankowski, J Mojski, A Milanowska, M Kubus, HM Kalaji. 2022. Potential hazard characteristics of trees with hollows, cavities and fruiting bodies growing along pedestrian routes. *Scientific Reports* 12(1): 21417. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25946-0>
- Terho M. 2009. An assessment of decay among urban *Tilia*, *Betula*, and *Acer* trees felled as hazardous. *Urban Forestry & Urban Greening* 8(2): 77-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.02.004>
- Watson G. 2008. Discoloration and decay in severed tree roots. *Arbiculture & Urban Forestry* 34(4): 260-264. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.035>
- Wickham H. 2016. *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. USA. Springer-Verlag. Consultado 6 mar. 2023. Disponible en: <https://ggplot2.tidyverse.org>

Recibido: 15/10/2023  
Aceptado: 04/04/2024