



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**Estimación de salud de bosque para el Parque Nacional
Cumbres del Ajusco, CDMX por medio de copas y su
evaluación con ayuda de inteligencia artificial en el año
2024**

T E S I S

Que para obtener el título de

Biólogo

PRESENTA

María Fernanda Torres Fernández

JURADO DE EXAMEN

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. Germán Calva Vásquez

ASESOR: M. en C. Armando Cervantes Sandoval

ASESOR: Dra. Patricia Rivera García

SINODAL: Dr. Monroy Ata Arcadio

SINODAL: Mtra. Nicté Ramírez Priego

PAPIME PE212024



Ciudad de México, 1 abril 2025.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Dedicatorias

A mi mamá, **Sandra**. Por ser mi mayor apoyo, por darme tu amor incondicional y tus sabios consejos, pero sobre todo por confiar en mí. Cada logro en mi vida ha sido gracias a ti, a tus esfuerzos y dedicación. Eres uno de los pilares de mi vida, haz hecho esfuerzos sobrehumanos por nosotros y hoy puedes apreciar una parte de los frutos. Por ser la gran madre que eres, este logro lo comparto contigo y te dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud.

A mi papá, **Carlos**. Por siempre apoyarme, por estar presente en mis logros y acompañarme en mis caídas, por dar tu mejor esfuerzo como padre. Gracias a ti he logrado concluir esta etapa, siempre estaré agradecida por todo el sacrificio que has hecho por nosotras. y siempre llevaré conmigo lo aprendido. Este logro también es tuyo, y con todo mi cariño y gratitud, te dedico este trabajo.

A mis hermanas, **Peniel y Dara**. Espero que este logro sea una inspiración para que persigan sus objetivos y lleguen aún más lejos. Gracias por escucharme a lo largo de este proceso, por acompañarme en mi formación y por brindarme su apoyo incondicional, incluso cuando no siempre comprendían del todo lo que implicaba. Siempre motívense a más, porque son capaces. Con cariño, les dedico este logro en mi vida.

A mis amigos. **Angie**, que siempre me escuchaste y motivaste en este trabajo, por estar presente en mis momentos más felices y en los más difíciles, por ser el amor de mi vida en amistad. **Gerardo**, por siempre orientarme, apoyarme y acompañarme, por estos años de amistad sincera y leal. **Adán**, por ser un amigo leal, por acompañarme y defenderme, por compartir conmigo risas y logros. A ustedes, que sin obligación alguna han estado siempre a mi lado, motivándome, aconsejándome y acompañándome, son parte de este logro.

¡Los quiero!

Agradecimientos generales

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, especialmente a la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza**; que me brindo las herramientas y los conocimientos para formarme profesionalmente con entusiasmo y compromiso. Además de acercarme a personas que me apoyaron en todo este camino, tanto profesional como personalmente.

A mi director de tesis, **M. en C. Germán Calva**; por su inquebrantable compromiso con la enseñanza, motivándome a dar más. Gracias por su respaldo a lo largo de estos años en los proyectos realizados y por inspirarme a desafiarme para explorar mis capacidades, dejando una huella imborrable. Ha sido un privilegio ser su estudiante y aprender de alguien tan excepcional como usted. Gracias por creer y confiar en mí.

A mis sinodales; **M. en C. Armando Cervantes, Dra. Patricia Rivera, Dr. Arcadio Monrroy y Mtra. Nicté Ramírez Priego**. Les expreso mi más sincero agradecimiento por su orientación y conocimiento que fue esencial para realizar este proyecto. Agradezco el tiempo y consejos que me otorgaron para enriquecer y fortalecer este trabajo. Su apoyo ha sido clave en este proceso.

A todos los amigos que me acompañaron en esta travesía. Que, aunque no sean mencionados, siempre estuvieron ahí brindándome su apoyo y compartieron conmigo experiencias enriquecedoras. Gracias por sus enseñanzas, por compartir conmigo momentos de estrés, felicidad y aprendizaje. Por hacer de estos años más amenos y por el respaldo incondicional en cada etapa. Fueron piezas fundamentales, y de cada uno me llevo lo mejor.

Expreso nuevamente mi gratitud a la **UNAM, FES Zaragoza**, a mis respetados **sinodales y profesores** que me formaron durante todos estos años. Asimismo, agradezco profundamente a mis amigos y familiares, cuyo apoyo incondicional hizo de este proceso una experiencia invaluable.

¡Gracias por creer en mí!

Índice

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	2
MARCO TEÓRICO	4
SALUD DE BOSQUE	4
<i>Diversidad de especies como indicador de la calidad de hábitat</i>	<i>5</i>
<i>Fragmentación de bosques</i>	<i>6</i>
DAÑO EN COPA.....	9
ESCALAS DE MEDICIÓN DE DAÑO EN COPA	17
I-TREE ECO	20
IA EN LA EVALUACIÓN DEL DAÑO EN COPA.....	21
ANTECEDENTES	24
PROBLEMÁTICA (Y PREGUNTA).....	26
OBJETIVOS.....	29
GENERAL.....	29
PARTICULARES	29
MATERIAL Y MÉTODO	30
ÁREA DE ESTUDIO	30
TRABAJO DE CAMPO.....	31
TRABAJO DE LABORATORIO.....	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
DIVERSIDAD ARBÓREA DEL PARQUE EN EL AÑO 2024.	34
SALUD COPA DETERMINADO CON I-TREE ECO	37
ESCALAS DE EVALUACIÓN DE SALUD DE BOSQUE CON AYUDA DE IA.....	41
MODELO 1. ESCALA INTEGRADA PARA LA EVALUACIÓN DE ÁRBOLES (EIEA).....	41
<i>Recolecta de datos de campo</i>	<i>41</i>
<i>Integración en la Evaluación</i>	<i>42</i>
<i>Análisis de datos</i>	<i>43</i>
Clasificación y puntuación de datos	43
Calcular el índice de condición de copa	44
Interpretar los resultados	44
<i>Aplicación de la EIEA a muestreo del PNCA</i>	<i>44</i>
Clasificación de la salud Distribución por especie.....	44
Distribución de las clasificaciones de la ICC.....	46
MODELO 2. ESCALA INTEGRADA PARA LA EVALUACIÓN DE ÁRBOLES (EIEA) EN BOSQUE DE CONÍFERAS	47
<i>Datos de campo</i>	<i>47</i>
Criterios de Evaluación para Condición de Copa	47
Elementos adicionales para registrar.....	49
<i>Estructura y Salud del Árbol.....</i>	<i>49</i>
Criterios de Evaluación.....	49
Escala de Evaluación.....	49
Elementos adicionales para registrar.....	49

<i>Factores Ambientales y Espaciales</i>	50
<i>Criterios de Evaluación</i>	50
<i>Análisis de datos</i>	50
Cobertura de Copa.....	51
Densidad del Follaje	51
Homogeneidad del Follaje.....	51
Daños	52
Rango de Interpretación	52
<i>Evaluación del Tronco</i>	53
<i>Aplicación del Modelo 2 EIEA para bosque de Coníferas a inventario del PNCA</i>	55
Índice de Condición de Copa	55
Índice de Condición Estructural de Tronco (ICET)	58
Índice de Condición del Entorno (ICE).....	60
Índice de Condición General (ICG)	62
CONSIDERACIONES FINALES DE AMBAS ESCALAS	64
CONCLUSIONES	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	76

Índice de figuras

<i>Figura 1. Fragmentación del Parque Nacional Cumbres del Ajusco. Imagen tomada del repertorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica (2019).</i>	9
<i>Figura 2. Representación de daños en la copa causada por estrés de ambiente y contaminantes.</i>	11
<i>Figura 3. Evaluación de la transparencia de follaje. La imagen de la izquierda representa la evaluación (IPC, 2006). La imagen de la derecha representa la evaluación en campo.</i>	14
<i>Figura 4. Escalas de copa faltante tomadas del manual de usuarios del software i-Tree (Versión 6, 2021).</i>	20
<i>Figura 5. Paisaje ubicado a una altitud de 3000 msnm donde se observa la mezcla de límite superior del oyamel y el comienzo del rodal de pino, lo cual está fuera del polígono del parque nacional. Además, observa la compactación del suelo y tocones causados a la tala clandestina. Imagen tomada del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica (2019).</i>	24
<i>Figura 6. Imagen capturada en 2019 en el PNCA, donde se evidencian los impactos de la tala clandestina, dicha actividad puede causar erosión del suelo.</i>	27
<i>Figura 7. Hojas de pino afectadas por clorosis, atribuida a la exposición a contaminantes atmosféricos en las proximidades de la zona.</i>	28
<i>Figura 8. Polígono Parque Nacional Cumbres del Ajusco y zonas de muestreo.</i>	31
<i>Figura 9. A) Muestreo en forma de Y, y B) Muestreo de parcela (Conafor, 2012).</i>	32
<i>Figura 10. Grafica comparativa entre especies de los años 2019 y 2024.</i>	36
<i>Figura 11. Condición de copa en muestreo de Ajusco. Información del reporte obtenido de i-Tree ECO, el informe revela que el 61.49% de los ejemplares están en declive.</i>	37
<i>Figura 12. Distribución de salud de copa por especie realizado del reporte de i-Tree.</i>	40
<i>Figura 13. Ejemplo de diferentes formas de copa de árboles en el bosque de San Juan de Aragón. Foto tomada del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica en 2018.</i>	42
<i>Figura 14. Promedios del ICC. En el grafico se observa que de los datos globales el promedio de ICC más alto se encuentra en la categoría “Regular”, seguido de la categoría “Deficiente”, lo que sugiere que la salud de copa está en riesgo.</i>	45
<i>Figura 15. Distribución de la clasificación de ICC para la escala modelo 1. La especie que mejor salud presenta es Pinus teocote con 48 ejemplares muestreados en condición excelente. Las especies clasificadas como “Otras</i>	

<i>especies” son aquellas que tienen menos de 10 ejemplares muestreados; Pinus maximartinezii Quercus spp, Quercus ilex, Quercus rugosa, Quercus polymorpha, Cupressus lusitanica y Melodinus.</i>	45
<i>Figura 16. Promedio del ICC por especie para la escala modelo 1.</i>	46
<i>Figura 17. Escala visual de evaluación de copa para el modelo 2 generada con IA basado en las categorías y porcentajes establecidos.</i>	48
<i>Figura 18. Ejemplo de diferentes formas de copa de árboles en el bosque de San Juan de Aragón. Foto tomada del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica en 2018.</i>	48
<i>Figura 19. Grafica de distribución global del Índice de Condición de Copa para la escala modelo 2.</i>	56
<i>Figura 20. Promedios de Índice de Condición de Copa por especie para escala modelo 2.</i>	57
<i>Figura 21. Distribución de condición de copa por especie para modelo 2.</i>	57
<i>Figura 22. Formas de las copas de pino y oyamel que ilustran el estado de salud en decadencia.</i>	58
<i>Figura 23. Distribución del Índice de Condición Estructural de Tronco.</i>	59
<i>Figura 24. Distribución del Índice de Condición Estructural de Tronco por especie.</i>	60
<i>Figura 25. Distribución del Índice de Condición del Entorno.</i>	61
<i>Figura 26. Índice de Condición del Entorno por especie.</i>	62
<i>Figura 27. Distribución del Índice de Condición General (ICG).</i>	63
<i>Figura 28. Distribución del Índice de Condición General por especie.</i>	63
<i>Figura 29. Ejemplo de copas sanas de oyamel en la cañada del quesero en el parque nacional Zoquiapan.</i>	65

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Evaluación de Sombreado de copa (IPC, 2006).</i>	12
<i>Tabla 2. Evaluación de visibilidad de copa. La clase 3 se distingue de la clase 4, ya que algunos parámetros aún se pueden evaluar cuando solo hay retroiluminación (IPC, 2006).</i>	12
<i>Tabla 3. Categorías de salud para el indicador condición de copa (Randolph, 2004; Randolph y Moser 2004).</i>	16
<i>Tabla 4. Coordenadas de los muestreos.</i>	32
<i>Tabla 5. Clasificación de la morfología de árboles.</i>	41
<i>Tabla 6. Criterios de evaluación.</i>	42
<i>Tabla 7. Recolección de datos de campo y clasificación en categorías. Se enfatiza en la elaboración del puntaje a partir de la estandarización de cada una de las características de la copa</i>	43
<i>Tabla 8. Asignación de puntaje para datos recolectados en la escala modelo 1. La relación características y puntajes se utilizan para la elaboración del índice de condición de copa.</i>	43
<i>Tabla 9. Interpretación de resultados para escala modelo 1.</i>	44
<i>Tabla 10. Escala de evaluación de porcentaje de cobertura de copa para la escala modelo 2.</i>	47
<i>Tabla 11. Escala de evaluación de troncos para escala modelo 2.</i>	49
<i>Tabla 12. Escala de evaluación para disponibilidad de espacio en escala modelo 2.</i>	50
<i>Tabla 13. Asignación de puntos para cobertura de copa en escala modelo 2.</i>	51
<i>Tabla 14. Asignación de puntos para densidad de follaje en escala modelo 2.</i>	51
<i>Tabla 15. Asignación de puntos para homogeneidad de follaje en escala modelo 2</i>	51
<i>Tabla 16. Asignación de puntos para daños en escala modelo 2</i>	52
<i>Tabla 17. Interpretación de ICC obtenido para escala modelo 2.</i>	52
<i>Tabla 18. Escala de evaluación de tronco.</i>	53
<i>Tabla 19. Asignación de puntos para ICET.</i>	53
<i>Tabla 20. Escala de Evaluación del Espacio Disponible y Factores Ambientales</i>	54
<i>Tabla 21. Asignación de puntos para ICE</i>	54
<i>Tabla 22. Interpretación del ICG.</i>	55
<i>Tabla 23. Interpretación el ICET.</i>	58
<i>Tabla 24. Interpretación del ICE.</i>	61

Resumen

En 1936, Cumbres del Ajusco se declaró Parque Nacional (PNCA), contando con una extensión de 69,750ha. Para el año 1947 la superficie se redujo a 920 ha, desde entonces el parque se encuentra sin un plan de manejo y conservación. Vargas-Márquez (1997) reportó que el PNCA tenían problemas de litigios, incendios, sobrepastoreo, erosión y contaminación atmosférica.

La contaminación de la ciudad de México data del siglo pasado y en 1996 se estimó que en la Zona Metropolitana del Valle de México se produjo 121,459 toneladas anuales de contaminantes (NO_x y VOCs), lo que, en consecuencia, de acuerdo con Alvarado-Rosales *et al.* (2021), ha causado un daño visible en las copas de árboles aledaños, como la clorosis en las acículas. Esto resalta la necesidad de implementar nuevas técnicas para el monitoreo de bosques. El uso de tecnologías como la inteligencia artificial (IA) en la evaluación forestal es escasa, pero de aplicarla se puede obtener una caracterización más precisa de la estructura y condición del dosel, mejorando la eficacia del monitoreo y la predicción de cambios ecosistémicos.

Se tomó como referencia escalas establecidas de i-Tree y RED II, se proponen nuevas escalas de medición de daño usando como herramienta la Inteligencia Artificial generativa (Chat GPT) para mejorar y precisar los métodos de evaluación de copas. Estas se probaron con un inventario realizado en el PNCA en los años 2023-2024 y comparadas con reportes del software i-Tree para evaluar la condición de salud del parque. El AI generó dos modelos, uno para evaluar la salud de la copa a partir de la forma del dosel y considerando; **Condición de la Copa** (Densidad vertical, Pérdida del ápice, Ápice dañado), Densidad del follaje, Homogeneidad, y Daños, **Estructura del Árbol**, **Factores Ambientales y Espaciales**, y **Estructura del Árbol**. El modelo 2 se hizo específico para coníferas.

Se concluye que el bosque está atravesando por un proceso de decadencia, causado por contaminantes y pérdida de terreno. Además de probar que la IA es una herramienta robusta para integrar parámetros de evaluación de salud de bosque como zonas, climas, especies, entre otros.

Introducción

Las investigaciones europeas (European Environment Agency, 2022) y de EE. UU. (Bussotti *et al.*, 2024) a través del Programa Cooperativo Internacional de Evaluación y del “Programa de Inventario y Análisis Forestal” sobre monitoreo ecológico comenzaron desde los años 90s, para el año 2005 se llegó a la estandarización de las variables indicativas de salud del bosque, el porcentaje de copa fue uno de ellos, siendo el principal reflejo de los factores de estrés y estado de declive forestal.

Derivado de los programas europeos para el monitoreo de bosques (UN-ECE, 1988 y EC), se obtuvieron patrones visuales del porcentaje copa viva, densidad de copa, transparencia de copa, y muerte regresiva como elementos a evaluar para determinar la salud de copa y por ende del bosque. Los patrones son una forma de evaluar el efecto y nivel de declive forestal, basado en la percepción visual (patrón de daño y copa faltante), sin embargo, son múltiples los factores que intervienen en el desarrollo y forma de la copa

Estos registros de campo pueden ser analizados por medio del software i-Tree ECO (2016) para obtener la condición de copa del árbol y los servicios ecosistémicos del bosque en estudio, lo que lo convierte en una herramienta de gran ayuda en el monitoreo del declive del bosque.

Los métodos de evaluación visuales a través de patrones obtenidos se han estandarizado de Europa central (European Environment Agency, 2022), en donde participó EE. UU. y Canadá. Para el caso de los bosques del Norte y centro de México poco se sabe. El presente, usa el apoyo de AI para construir una evaluación de copa con base en datos del Parque Nacional Cumbres del Ajusco (PNCA), mismo que desde 1947 fue declarado área natural

protegida y Vargas-Márquez (1997) manifestó que se encuentra abandonado con problemas de sequía, mortalidad arbórea, y disminución de la masa forestal. No cuenta con un plan de manejo y conservación y son escasos los estudios sobre la salud forestal. El estudio pretende conocer el estado de salud del bosque a través del registro de la salud de copa (muerte regresiva y copa faltante) en 657 árboles localizados en 35 rodales del Parque, a fin de crear una escala con ayuda de inteligencia artificial y visualizar los daños reflejados en estas.

Marco Teórico

Salud de bosque

La definición de bosque se basa en "ocupación del suelo" o "de utilización de las tierras", o en la combinación de ambas. La FAO (2002), define el bosque basado en la estructura de la población, porcentaje de cubierta arbórea, altura de las especies leñosas y su superficie. Wilson (1991) (González 1998) referido por (González-Medina, 2016) definen un bosque sano como un ecosistema productivo resistente y diverso. La productividad de las áreas naturales está en función de su calidad ambiental. Para la estimación se usan elementos de diagnóstico bióticos o abióticos, los cuales se fundamentan en las características propias del ecosistema.

Randolph y Thompson, 2010; Riitters y Tkacz, 2004, describen que la evaluación de salud de bosques inició en 1990 por el Programa de Monitoreo de la Salud Forestal (FHM) del Servicio Forestal de los Estados Unidos, tomando la condición de copa como criterio de evaluación clave para la salud del bosque. En 1999, la red de parcelas del FHM se incorporó como parte de la "fase 3" del Programa de Inventario y Análisis Forestal (FIA) mejorado del Servicio Forestal de los Estados Unidos. Desde entonces, el FIA evalúa el estado de la copa de los árboles como uno de los criterios de salud forestal. El sistema de Monitoreo de la Salud Forestal de los Estados Unidos tiene como metas:

- 1) Identificar los ecosistemas forestales donde las condiciones puedan estar empeorando de manera sutil en áreas extensas, lo que requiere un monitoreo consistente, a gran escala y a largo plazo de indicadores clave.

2) Determinar las condiciones deterioradas y desarrollar estrategias de manejo para estos casos, lo que implica realizar encuestas y actividades de seguimiento más detalladas.

3) Comprender los procesos específicos que causan problemas de salud forestal, para así poder desarrollar estrategias para la mitigación y prevención de estos problemas (Bechtold *et al*, 2007).

Diversidad de especies como indicador de la calidad de hábitat

AECID, (2023) define la biodiversidad se define como la diversidad dentro de las especies en función de genes, entre las especies y la de los ecosistemas. El porcentaje de bosque primario en la región puede ser un buen indicador de conservación de la diversidad biológica; según los datos de FRA correspondientes a 2020, hay un 65% de bosques primarios en la región de América Latina y el Caribe.

Hocker (1984, citado en Benavides y Fernández, 2012) reconoce que el conocimiento de la estructura, conformación, distribución y desarrollo del arbolado es esencial para clasificar los tipos de masas arboladas y comprender la influencia de los procesos naturales y humanos en su dinámica. Esta información es clave para la gestión forestal, la conservación de la biodiversidad y la planificación ambiental. La diversidad de especies es un componente fundamental, ya que su composición, densidad y estratificación pueden servir como indicadores de la calidad del hábitat, reflejando la estabilidad ecológica y su capacidad de resiliencia ante disturbios.

Groombridge y Jenkins (2002, citado en Bourne y Conway, 2014) afirman que una mayor biodiversidad permite un funcionamiento más complejo y eficiente de los ecosistemas, favoreciendo una mayor productividad general. Además, la presencia de una variedad de especies contribuye a la estabilidad del ecosistema al incrementar su capacidad de adaptación y resistencia frente a cambios ambientales y eventos impredecibles, como invasiones de plagas (Alvey, 2006). Así, la diversidad de especies no solo refleja la salud del ecosistema, sino que también actúa como un mecanismo de protección ante perturbaciones.

De acuerdo con Alvey (2006), la preservación de la biodiversidad depende de la conservación de hábitats naturales en extensiones significativas. Sin embargo, la degradación y pérdida de bosques naturales han generado la necesidad de estrategias de conservación, especialmente en entornos urbanos, donde la biodiversidad cumple un papel aún más crucial como indicador de la calidad del hábitat. La evaluación de la riqueza y distribución de especies en estos ecosistemas permite diagnosticar su estado de conservación y orientar acciones de manejo forestal que favorezcan su estabilidad y funcionalidad.

Fragmentación de bosques

De acuerdo con Krupa (1999), los asentamientos humanos se han establecido en zonas cercanas a los bosques de coníferas debido a recursos esenciales como alimentos,

combustibles, materiales de construcción y agua pura, causando la reducción a de los bosques a fragmentos modificados.

Greenpeace (2006) reportó, con base en datos del INEGI, que la población de la Ciudad de México y la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) experimentó un crecimiento significativo, pasando de 1.6 millones de habitantes en 1940 a 17.7 millones en el año 2000. Este crecimiento demográfico ha traído consigo una fuerte presión sobre el uso del suelo, modificando drásticamente el paisaje urbano y rural.

En este sentido, Schteingart (1987) menciona que, según la Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agropecuario del D.F., los suelos planos y fértiles fueron utilizados para la agricultura intensiva hasta inicios del siglo XX. Sin embargo, con la expansión urbana, estas áreas fueron absorbidas por la ciudad, desplazando la actividad agrícola hacia zonas más elevadas y áreas forestales. Esta transformación se ha visto acelerada por la construcción de autopistas y la expansión de la infraestructura, facilitando la urbanización de antiguas áreas rurales y boscosas. Actualmente existen 804 asentamientos irregulares en las alcaldías Cuajimalpa, Tlalpan y Xochimilco, afectando directamente los ecosistemas naturales.

La expansión urbana también ha propiciado una pérdida alarmante de áreas verdes. De acuerdo con Benítez et al., 1987; Ezcurra, 1996 citado en Saavedra et al. (2016), diversos estudios han documentado la disminución de espacios naturales en México a una tasa anual del 3.7%. Esta reducción ha llevado a que la cantidad de áreas verdes disponibles sea insuficiente para la población (Jáuregui-Ostos & Heres-Pulido, 2008) y que su manejo

no haya sido adecuado (Escobedo & Chacalo, 2008), lo que ha resultado en un deterioro ambiental progresivo.

La contaminación se ha convertido en un problema crítico en la ZMVM. Según Gómez Ugalde (2003), esta región es una de las megalópolis con mayor densidad poblacional, albergando alrededor de 30,000 industrias y 3.1 millones de vehículos en 1994, con un consumo diario de 18 millones de litros de combustible. Para 1996, la producción estimada de contaminantes atmosféricos alcanzó 121,459 toneladas anuales de NO_x, 579.03 toneladas anuales de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y 31,854 toneladas de PM₁₀, incluyendo emisiones derivadas de incendios forestales. Estos factores han contribuido significativamente al deterioro ambiental, afectando la calidad del aire y la salud de la población.

Vargas Márquez (1997), reportó que, en 1936, el Ajusco fue declarado zona protegida con 69,750 hectáreas, pero en 1947, se redujo a 920 ha. Su deterioro se debe a la falta de gestión por una institución, el exceso de contaminantes volátiles (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) emitidos por las fábricas en la Cuenca de México. Así mismo, los gases emitidos por los autos (N₂O, CO, CO₂) y camiones (hidrocarburos) de la CDMEX parten del norte centro y desembocan en el sur poniente, provocando la muerte paulatina del arbórea y de la fauna acompañante, deteriorando la salud del bosque (figura 1).



Figura 1. Fragmentación del Parque Nacional Cumbres del Ajusco. Imagen tomada del repertorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica (2019).

Schteingart op cit. reporto que, para esos años, en los bosques predomina el pino y oyamel, cubriendo el 35% de la superficie del sur de la hoy CDMX, con una extensión de 36 000 ha. Entre los años de 1959-1984 la población arbórea descendió en un 15%, alterando el equilibrio biológico de las especies, impactando la recarga de acuíferos.

Daño en copa

Landsberg y Gower (1997) describen la copa de un árbol como la cubierta continua de hojas y ramas que forma su capa superior. La estructura del rodal, que incluye el número, el espaciamiento, la altura y la distribución del tamaño de los árboles, influye directamente en la arquitectura de estas. A nivel individual, los factores ambientales y genéticos son determinantes en la forma y disposición de la estructura, permitiendo que el entorno atmosférico interactúe con las comunidades vegetales a través de estas. Los procesos

fisiológicos que regulan el crecimiento de la copa están impulsados, o fuertemente influenciados, por las interacciones entre factores físicos como la radiación, la temperatura, la humedad del aire y el viento y factores ecológicos, tales como la disponibilidad de nutrientes, la disposición de las ramas y la longevidad de las hojas (figura 2).

Greene *et al.* (2018) reconoce que la cubierta en áreas urbanas proporciona múltiples ventajas de tipo ecológico, social y económico, pues de acuerdo con Schomaker *et al.* (2007), son determinantes de la producción primaria neta.

Aquellos árboles con buen diámetro de copa, porcentaje de copa viva y densidad de copa, poca muerte regresiva y transparencia de follaje, son mejores en el secuestro de carbono, además retienen más nutrientes, lo cual favorece el crecimiento y supervivencia. La copa es considerada un reflejo de su salud y vigor (figura 2). Árboles con una copa grande, densa y bien desarrollada es probable que sea más saludable y tenga un crecimiento más vigoroso. Por ello, la apariencia de las copas resulta una buena variable de medición de salud del bosque en los EE.UU.

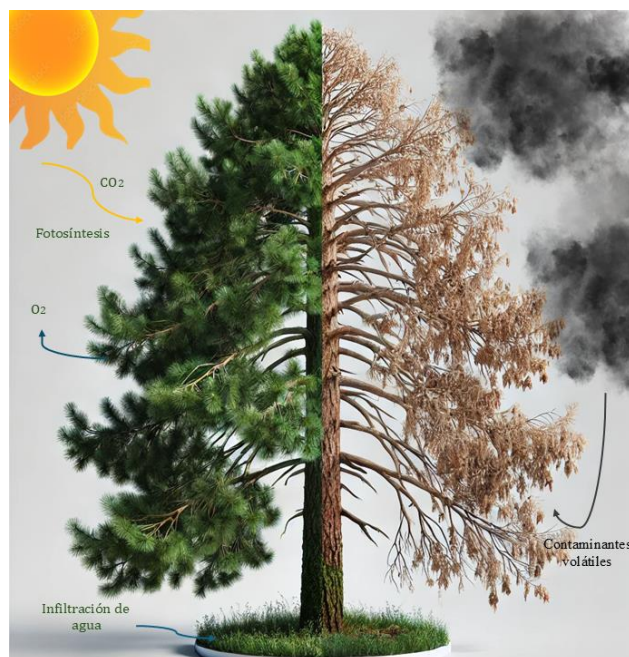


Figura 2. Representación de daños en la copa causada por estrés de ambiente y contaminantes.

El Programa Cooperativo Internacional (IPC) de Evaluación y Vigilancia de los Efectos de la Contaminación del Aire en los Bosques (2006) indica que la evaluación de las copas tuvo origen en Europa por el Program Canopy Index Forests bajo la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) desde 1985.

Los métodos de evaluación elaborados a mediados de 1980 para el Nivel I fueron la base de las evaluaciones en las parcelas del Nivel II. Se describieron en el manual “Evaluación visual del estado de las copas” y el “Submanual sobre la evaluación visual del estado de las copas en parcelas de monitoreo intensivo”. La combinación de casi 6,000 parcelas en una cuadrícula sistemática de 16 x 16 km y casi 900 parcelas de monitoreo intensivo, proporcionaron información científica que llevó a la aprobación en Europa o América del Norte. Los datos por recolectar fueron:

- **Sombreado de copa:** Estimación de la apertura de la copa del árbol. Un cambio en el grado de sombreado puede tener efectos significativos en el estado de la copa. La

evaluación se realiza al grado de sombreado en el momento de la evaluación. Este puede cambiar de un año a otro, por lo que debe registrarse anualmente.

Se evalúa en una escala de seis puntos de la siguiente manera:

Tabla 1. Evaluación de Sombreado de copa (IPC, 2006).

Grado	Estado de copa
1	Copa significativamente afectada (sombreado o interacciones físicas) en un lado
2	Copa significativamente afectada (sombreado o interacciones físicas) en dos lados
3	Copa significativamente afectada (sombreado o interacciones físicas) en tres lados
4	Copa significativamente afectada (sombreado o interacciones físicas) en cuatro lados
5	Copa abierta o sin evidencia de efectos de sombreado
6	Árboles suprimidos

- **Visibilidad:** Grado en el que se pueden ver diferentes partes de la copa, es evaluable desde el suelo. Se evalúa de la siguiente manera.

Tabla 2. Evaluación de visibilidad de copa. La clase 3 se distingue de la clase 4, ya que algunos parámetros aún se pueden evaluar cuando solo hay retroiluminación (IPC, 2006).

Grado	Estado de copa
1	Copa completa visible
2	Copa solo parcialmente visible
3	Copa solo visible con retroiluminación (es decir, en el contorno)
4	Copa no visible

- **Defoliación:** Se define como la pérdida de acículas u hojas en la copa evaluable en comparación con un árbol de referencia. Se evalúa independientemente de la causa de la pérdida de follaje, p. e., incluye daños causados por insectos. También

puede incluir copas delgadas causadas por la falta de follaje, al ser indistinguible de la defoliación verdadera. ***Existen problemas con su definición, de modo que es imposible una armonización completa de su definición y método de evaluación entre países.*** La floración se maneja de manera diferente entre países.

Se evalúa en pasos del 5%. Estas clases son 0, 5 (>0-5%), 10 (>5-10%), etc. Un árbol con entre >95% y 100% de defoliación, que aún está vivo, se puntúa con 99. La puntuación 100 se reserva para árboles muertos (Reglamento CE). Los árboles deben incluirse en estas clases del 5% y no en grupos agregados.

- **Transparencia del follaje:** La cantidad de luz visible a través de la porción viva y normalmente foliada de la copa o rama. Los cambios en el follaje ocurren como resultado de un daño actual, frecuentemente denominado defoliación, o de una reducción del follaje como resultado de las tensiones durante los años de retroceso.

Se evalúa en clases del 5% en función de la porción viva y normalmente foliada de la copa y las ramas utilizando el diagrama de transparencia de la figura 3. Las copas grandes y uniformes se califican como si toda la copa debiera estar foliada. Cuando la defoliación es grave, las ramas bloquean la luz, pero los inspectores deben excluir las ramas del follaje y calificar el área como si la luz estuviera penetrando. Debe evaluarse de la misma manera que la defoliación, **por dos observadores y desde diferentes posiciones.**

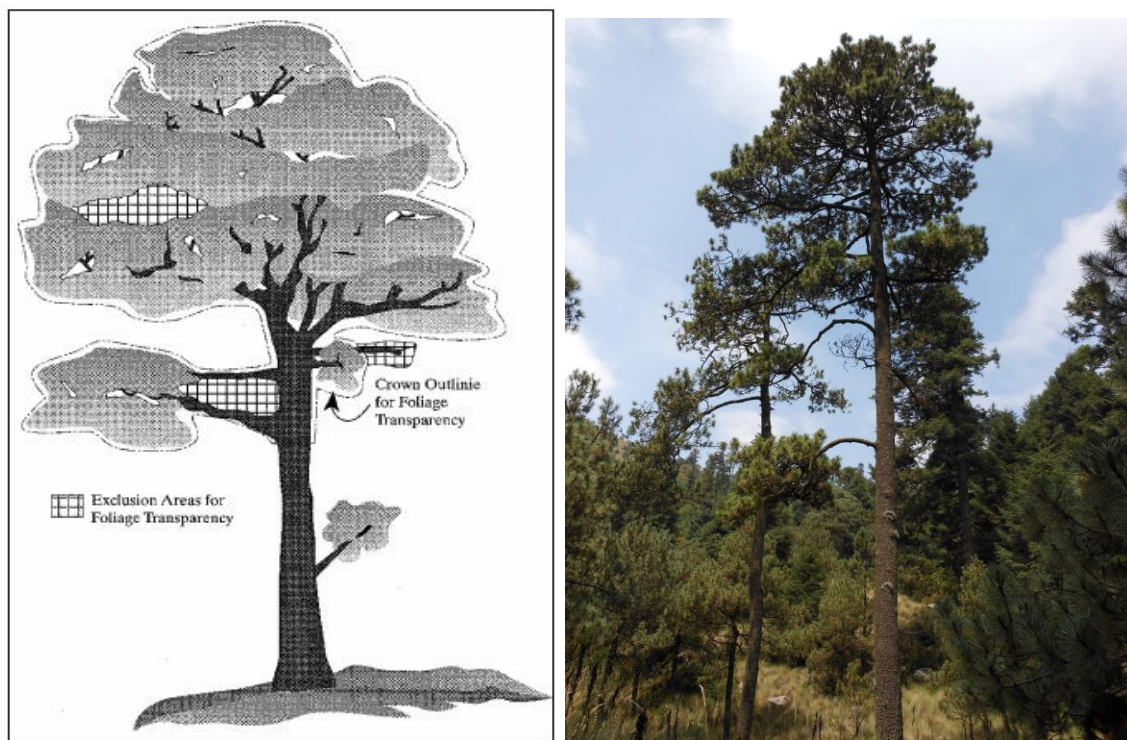


Figura 3. Evaluación de la transparencia de follaje. La imagen de la izquierda representa la evaluación (IPC, 2006). La imagen de la derecha representa la evaluación en campo.

- **Brotes secundarios y epicórmicos:** Brotes que se desarrollan a partir de yemas latentes en el tallo o en las ramas. La puntuación de la presencia de brotes revela si el árbol está respondiendo a la pérdida de follaje y, por lo tanto, la capacidad regenerativa del árbol.

FIA estandarizó los cambios y tendencias a largo plazo, elaborando indicadores de salud forestal para determinar la condición de los ecosistemas forestales, a través de: la condición de copa, daños al arbolado y diversidad y estructura de la vegetación. En la actualidad, son aplicados tanto para los bosques naturales como arbolado urbano (Woodall *et al*, 2010). De los indicadores el más subjetivo es la copa arbórea.

Según el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Schomaker *et al*, 2007), la evaluación de la copa se basa en dos vistas laterales bidimensionales (excepto el diámetro). Para

minimizar errores y asegurar la coherencia y calidad de las observaciones, se recomienda la participación de dos personas desde dos perspectivas diferentes (norte-→ sur y E -→ W). Esto permite cambiar los puntos de observación y repetir las estimaciones, lo cual reduce la probabilidad de evaluar un árbol adyacente, utilizar contornos de copa incorrectos o pasar por alto daños o signos de muerte regresiva. Cada medición de la copa contribuye a la calificación integral que se mide con la clase de vigor, la relación de copa viva no compactada, la exposición a la luz de la copa y la posición de la copa.

Otra manera de evaluar la condición de las copas es a través del método descrito por Baret y Buis (2008), quienes proponen el uso de observaciones de teledetección para estimar las características del dosel. Sin embargo, los autores revelan que las observaciones de teledetección toman muestras del campo de radiación reflejado o emitido por la superficie y, por lo tanto, no proporcionan directamente las características biofísicas requeridas por los modelos para describir algunas variables de estado de la superficie.

En México, desde el 2012, el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFiS) y la Gerencia de Sanidad de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) son los responsables de realizar las mediciones de dos indicadores de salud forestal: condición de copa y daños al arbolado. Destaca los daños a la copa, pues es la principal señal de síntomas de estrés y declinación (Alvarado-Rosales *et al*, 2021).

Alvarado-Rosales *et al*. (2021) destaca que el daño en copas es consecuencia de factores de estrés (enfermedades, plagas, eventos climáticos, senescencia) a lo largo del tiempo, los cuales pueden desencadenar la muerte del árbol. Esta variable expresa las condiciones del sitio y efectos de factores externos o de estrés, como entre otros,

En cuanto a la cuantificación, Alvarado-Rosales *et al.* (2021) realizó una categorización para medir la condición de copa (tabla 3), está basada en estudios de Randolph, 2004; Randolph y Moser, 2004; Bechtold et al., 1992 debido a que en México no se cuenta con umbrales de propios de categorización.

Tabla 3. Categorías de salud para el indicador condición de copa (Randolph, 2004; Randolph y Moser 2004).

Proporción de copa viva	Densidad de copa	Transparencia de copa	Muerte regresiva
Buena >50%	Óptima 51%-	Normal <20%	Ninguna ≤5%
Moderada 31%-	100%	Moderada 21%-	Ligera 6%-20%
50%	Buena 41%-50%	35%	Moderada 21%-
Pobre <30%	Moderada 31%-	Severa 41%-100%	35%
	40%		Severa 36%-
	Pobre 0%-30%		100%

Otra forma de cuantificar la salud de la copa es mediante las escalas generadas por el software i-Tree (figura 4). Esta escala, que considera factores como la muerte regresiva y la copa faltante, y complementada con otros parámetros como el ancho de la copa de norte a sur y de este a oeste, la altura del árbol, la altura del fuste y el DAP, permite obtener datos más precisos sobre la productividad individual del árbol, incluyendo el secuestro de carbono, la producción de oxígeno, y la remoción de contaminantes, entre otros.

Escalas de medición de daño en copa

Inees (1990) reportó un declive forestal en países europeos, en los años 60 pero su estudio se sistematizó hasta 1983 monitoreos de estado de bosque. Las evaluaciones se formalizan en 1988 en el protocolo de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UN-ECE,1988), sin embargo, existen diferencias en la estandarización de los criterios para evaluar. Los programas de UN-ECE y de la Comunidad Económica Europea (EC) consideran dos criterios para caracterizar la salud de los árboles: densidad de copa y decoloración.

De acuerdo con Schomaker et al., (2007) El orden sugerido de recopilación de datos para cada árbol es:

1. **Vigor:** Determinar el potencial de crecimiento y los niveles futuros de población forestal. Si los árboles jóvenes son vigorosos, es indicativo de masas forestales sanas y de crecimiento rápido, en cambio, árboles jóvenes poco vigorosos indican una disminución de la masa forestal.
2. **Relación de copa viva sin compactar:** Longitud de un árbol que soporta follaje vivo en relación con la "longitud real del árbol". Usada para calcular el volumen y la biomasa de la copa. Las relaciones más altas son indicativas de árboles más saludables y de crecimiento más rápido (anexo 1).
3. **Exposición a la luz de la corona:** Mide la cantidad de luz solar directa que recibe un árbol. Proporciona información sobre la estructura y la competencia de la masa, el vigor del árbol y de la masa, y el potencial de crecimiento.

4. **Posición de la corona:** La posición relativa de una copa individual en relación con la zona del dosel superior es un indicador que aporta información sobre la estructura del rodal y el nivel de competencia entre los árboles.
5. **Densidad de copas:** Se refiere a la cantidad de tallos, ramas, ramitas, brotes, yemas, follaje y estructuras reproductivas que bloquean la penetración de la luz a través de la copa. Este indicador se utiliza para estimar el porcentaje de volumen de la copa que contiene biomasa. Los árboles con densidades de copa inferiores a la media suelen tener un crecimiento reducido en comparación con aquellos que presentan copas completas y simétricas (anexo 2).
6. **Muerte regresiva de la corona:** Se refiere a la mortalidad reciente de las ramas con ramitas finas que comienza en la porción terminal de una rama y continúa hacia el tronco. Estima la gravedad de las tensiones recientes en los árboles. El aumento de la muerte regresiva reduce el crecimiento. Sirve como un indicador temprano de pérdida de vigor y potencial de crecimiento en respuesta a tensiones o daños (anexo 3).
7. **Transparencia del follaje:** Es la cantidad de luz visible a través de los microagujeros en la parte viva de la copa (donde se encuentra el follaje o los restos de follaje). Se utiliza como medida de defoliación o estrés (anexo 4).
8. **Diámetro de la corona:** Promedio de dos mediciones de diámetro: (1) la distancia más ancha en cualquier parte de la copa entre las líneas de goteo de dos ramas vivas, y (2) la distancia perpendicular a la medición más ancha. Está asociado con el vigor, la densidad de árboles y los diámetros de los tallos de la mayoría de las especies. Se espera que los árboles con diámetros de copa grandes tengan un mayor

crecimiento que los árboles de la misma especie con diámetros de copa pequeños (anexo 5).

9. **Ramas epicórmicas:** Los árboles que no tienen follaje vivo excepto las ramas epicórmicas se clasifican de la siguiente manera: proporción de copa viva no compactada = 0, exposición a la luz de la copa = 0, posición de la copa = 3, densidad de la copa = 0, muerte regresiva de la copa = 100 por ciento, transparencia del follaje = 100 por ciento y diámetro de la copa = 0.

Dichos criterios son **evaluados en porcentajes**, fijando escalas del 5% como lo más ideal, se vinculan a los protocolos, con dos escalas cuyos criterios de medición del estado de copa son:

1. **Estado Sanitario del arbolado en las parcelas** de la Red Europea de Nivel II

Se basa en el estudio de los síntomas aparentes de decaimiento que pueden tener los árboles que componen la parcela, y la determinación de las posibles causas. Los parámetros básicos son la defoliación y la decoloración, además del estado que presentan: follaje, ramas y tronco. Las mediciones se instauran en parcelas permanentes registro continuo.

2. **Estimación de salud de copa** por el software i-Tree Eco

Es una valuación visual de la cantidad de ramas muertas (muerte regresiva) en la copa de un árbol. Para registrar la muerte regresiva, se ingresa el porcentaje de la copa que está compuesta por ramas muertas. Para registrar la condición, es inverso del porcentaje de muerte regresiva (es decir, 100 - por ciento de muerte regresiva). Eco tiene 22 clases

predeterminadas de muerte regresiva o condición. La aplicación de los patrones visuales según comparación con la copa del árbol en campo (figura 4).

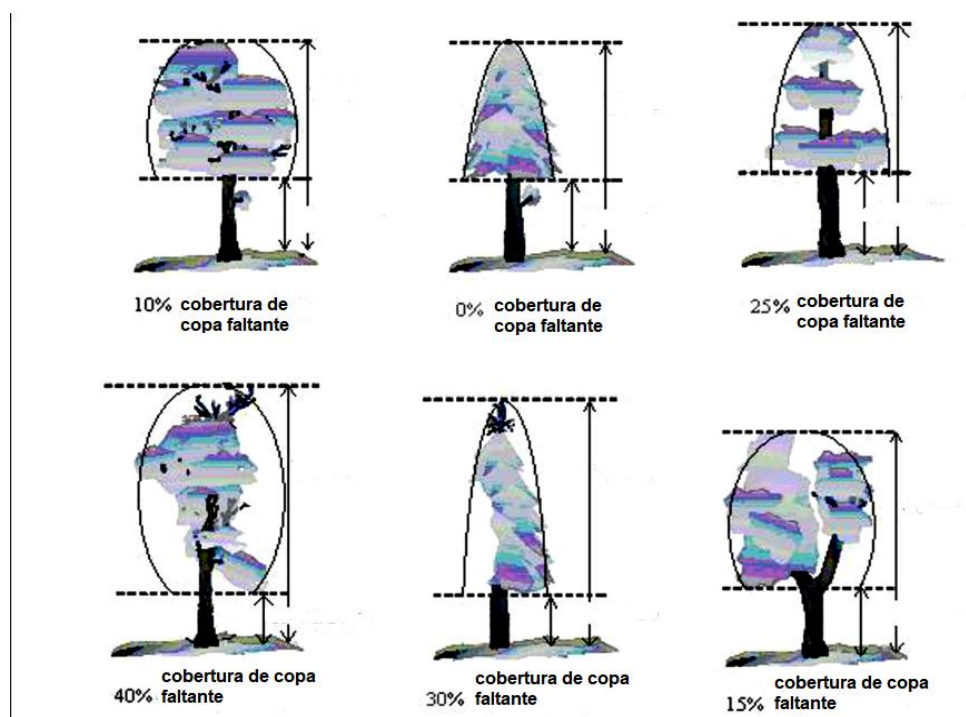


Figura 4. Escalas de copa faltante tomadas del manual de usuarios del software i-Tree (Versión 6, 2021).

i-Tree ECO

El Servicio Forestal de los Estados Unidos de América (USFS por sus siglas en inglés) fue el encargado de desarrollar un software de nombre i-Tree, que permite caracterizar la estructura del bosque urbano, siendo una herramienta de apoyo a la gestión de recursos para la protección, conservación y mejoramiento de los bosques (US Forest Service International Program, 2019). Sus estimaciones las realiza por medio de inventarios de arbolado urbano. Emplea datos dendrométricos obtenidos en el inventario y la evaluación de la condición del arbolado, así como la información de clima y contaminantes atmosféricos, para estimar las

características estructurales de la población arbórea (US Forest Service International Program, 2019).

IA en la evaluación del daño en copa

De acuerdo con el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2022), existen cerca de 65 millones de hectáreas de bosques y selvas donde se realiza “Manejo Forestal Sustentable”. Por el contrario, como lo señala el informe de Greenpeace 2016, la tala ilegal reportada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) indica que cada año se extraen de 5 a 7 millones de metros cúbicos de madera ilegal, que se suman a los 8 millones de metros cúbicos de producción legal. Además de reportar que el Ajusco ha perdido, desde 2007, al menos unas tres mil hectáreas de zonas verdes a manos de talamontes ilegales, lo que causa la disminución de la biomasa, reducción de la densidad y diversidad de especies, impactando la salud del bosque.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2024), la Inteligencia Artificial es útil para el manejo de los bosques de manera eficaz para diferentes aspectos: monitoreo, detección de incendios forestales, modelos de distribución de especies, predicción del crecimiento y rendimiento, prevención de plagas y enfermedades, optimización de la cosecha y detección temprana de erosión de tierras.

El Dr. Quiñonez Barraza (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2024). Los algoritmos considerados en la Inteligencia Artificial deben contribuir en la toma de decisiones basada en los inventarios forestales. Sin embargo, los

profesionales en ciencias forestales y arquitectura han estado encargados de la vegetación de la ciudad de México desde 1991 (Benavidez 1989) hasta la fecha, y una herramienta que ha contribuido a la gestión es el programa i-tree de uso libre que permite gestionar un área verde de cualquier dimensión, bosque urbano y natural, ya que proporciona alternativas de plantación y ataque de insectos.

FlyPix IA: es una plataforma geoespacial diseñada para analizar la superficie de la Tierra mediante inteligencia artificial avanzada. Se especializa en detectar y analizar objetos dentro de imágenes geoespaciales. El modelo de IA se puede programar para identificar datos vinculados a coordenadas geográficas.

Community Forests International: se centra en las soluciones climáticas a través de la conservación y restauración de los bosques. La organización colabora con las comunidades para proteger y restaurar los bosques, que son fundamentales para mitigar el cambio climático. Su trabajo incluye la protección de los bosques antiguos, la restauración de paisajes degradados y el apoyo a sistemas agroforestales innovadores. Prioriza el clima y comunidades vulnerables, su objetivo es mejorar la resiliencia ambiental y social.

AFRY Smart Forestry Manager. gestiona los datos de inventario y las actividades forestales. Integra la experiencia forestal moderna con tecnología avanzada para ofrecer un enfoque simplificado de la gestión forestal. La herramienta permite a los usuarios mantener datos de alta calidad mediante validación y simulación de crecimiento integradas. Es compatible con sistemas forestales locales e internacionales, lo que permite

una gestión eficiente. Herramienta útil para decisiones informada, garantizando que los datos forestales sigan siendo pertinentes y precisos.

TreePlotter™ es una plataforma SIG basada en la web diseñada para la gestión de bosques urbanos y el inventario de árboles. Permite a los usuarios recopilar, gestionar y analizar datos de árboles a través de una interfaz basada en mapas. El software está adaptado para dispositivos móviles y de escritorio en tiempo real. Realiza la gestión de inventarios de árboles hasta la divulgación y la elaboración de informes comunitarios. Ofrece herramientas para visualizar datos forestales urbanos, programar órdenes de trabajo y generar propuestas.

ChatGPT de OpenAI: el pionero de la IA generativa. OpenAI desarrolló el modelo ChatGPT con el objetivo de automatizar tareas repetitivas y generar resultados textuales desde cero en cuestión de segundos. El modelo ChatGPT se ha adaptado a las tecnologías de IA en desarrollo y ha recibido mejoras como la búsqueda web y la generación de imágenes. La mayor diferencia entre ChatGPT y otras herramientas de IA es que no ofrece soluciones específicas.

Microsoft Copilot: surgió como resultado de seguir de cerca el desarrollo de la tecnología de IA y el objetivo de integrarla en el uso diario. Los usuarios pueden hacer cualquier pregunta a Microsoft Copilot, y éste encuentra inmediatamente las fuentes en línea más relevantes para generar respuestas personalizadas. Además, puedes resumir texto, completar tareas de análisis de datos y generar imágenes de arte, de IA potenciada por DALL-E 3.

Antecedentes

Jiménez Escudero (2010) realizó el diagnóstico ambiental del PNCA, identificando un alto grado de perturbación debido a: *tala ilegal, cambio de uso de suelo, corredores de perros y motocross, siendo este último el de mayor impacto (compactación y contaminación química) del suelo, aunado a la contaminación atmosférica de la ciudad*. Algunos factores coinciden con lo señalado por Vargas-Márquez (1991). En la Figura 5 se muestran algunas de las consecuencias de estas afectaciones en el parque.



Figura 5. Paisaje ubicado a una altitud de 3000 msnm donde se observa la mezcla de límite superior del oyamel y el comienzo del rodal de pino, lo cual está fuera del polígono del parque nacional. Además, observa la compactación del suelo y tocones causados a la tala clandestina. Imagen tomada del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica (2019).

Del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica (2019) se tomaron los registros del monitoreo de la salud forestal del Parque Nacional Cumbres del Ajusco (1996-1998), registrándose 2,595 árboles los cuales fueron analizados con i-tree Eco para determinar el estado de salud de copa. La cobertura foliar fue del 53.0 % conferida por

Pinus teocote (63.8 por ciento), *Abies religiosa* (23.8 por ciento) y *Pinus hartwegii* (4.8 por ciento).

De esa población el 29.6 % se consideró como árboles de talla pequeña menor a 15.2 cm de diámetro. La densidad arbórea general en Ajusco era de 1,050 árboles en 0.40 de hectárea muestreada. **Si bien es cierto que no hay estudios realizados en PNCA, se citan las evidencias del efecto de la contaminación del aire en bosques aledaños.**

Pérez Suarez (2000) refiere que de acuerdo con la evaluación visual de las copas de *Abies*, son de las especies más sensibles a la deposición de contaminantes atmosféricos e identifico que existe una relación entre la retención de copa y el diámetro. Además, resalta que esta especie es tolerante a la sombra y de crecimiento lento, por lo que requieren condiciones favorables entre el primer y tercer año posterior a la germinación. Por lo que se puede inferir que, de tener altos niveles de contaminantes, esta especie puede reflejar daños visuales en la copa o en el diámetro.

Saavedra-Romero et al., (2017) replicó el método propuesto por De Vrides (2000) en Europa central registrando las variables

- **Proporción de copa viva:** Relación entre el largo de la copa y la altura total del árbol.
- **Densidad de copa:** Representa la cantidad de los componentes de la copa, refiriéndose a follaje, ramas y estructuras reproductivas.
- **Transparencia de copa:** Densidad del follaje sobre las ramas. Se cuantifica la cantidad de luz atravesada por la copa.

- **Muerte regresiva:** Indica pérdida de vigor o de crecimiento potencial.
- **Posición de copa:** Posición vertical de cada individuo en la parcela.
- **Exposición a la luz:** Cantidad de luz solar que recibe el individuo.

con la finalidad de medir la salud del bosque urbano, San Juan de Aragón, CD-Mex.

Alvarado-Rosales *et al* (2021) presenta un análisis de 88 162 árboles, datos colectados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INPyS) en 2014, con la finalidad de determinar la salud forestal en los bosques y selvas de México. Las variables analizadas fueron: proporción de copa viva (Pcv), densidad de copa (DenC), transparencia de follaje (TraF) y muerte regresiva (Mreg), de coníferas y latifoliadas. Resaltaron la importancia de realizar el monitoreo de bosques que se encuentren en categorías “Normales” y de estandarizar parámetros de salud ambiental para especies mexicanas.

Problemática (y pregunta)

Greenpeace (2016) reportó que el Parque Nacional Cumbres del Ajusco y otras áreas boscosas de la Ciudad de México pierden casi 2,400 ha de bosque al año, pudiendo llegar a su desaparición en 50 años. Las principales causas son el crecimiento de la mancha urbana y la tala clandestina. Se destaca que los efectos de la deforestación (figura 6), conllevan a la disminución de la captación e infiltración de agua, ya que las copas de los árboles retardan la llegada del agua al suelo y facilitan su infiltración, permitiendo la recarga de los mantos acuíferos.



Figura 6. Imagen capturada en 2019 en el PNCA, donde se evidencian los impactos de la tala clandestina, dicha actividad puede causar erosión del suelo.

La pérdida de cobertura favorece la erosión del suelo y reduce la disponibilidad de agua, afecta el ciclo del agua de la Cuenca del Valle de México. Son pocos los estudios relacionados directamente con el daño de la copa y sus implicaciones en la estructura del ecosistema boscoso. Las investigaciones de Contreras et al. (2014) “Zonificación del territorio de parajes del Ajusco y desarrollo rural sostenible”; de Perevochtchikova (2018) “Estudio de los efectos del programa de pago por servicios Ambientales, la Experiencia en Ajusco, México” y de Jiménez Escudero (2010) “Diagnostico ambiental de Cumbres del Ajusco” hacen testimonio del daño que padece.



Figura 7. Hojas de pino afectadas por clorosis, atribuida a la exposición a contaminantes atmosféricos en las proximidades de la zona.

Estudios puntuales como: *el efecto de contaminantes foto oxidantes, metales pesados y ozono en las acículas de pinos y oyamel* (figura 7) *de bosques* del Sur de CVM (Skelly et al., 1997; Alvarado et al., 1993; Zambrano & Nash III 2001; De Bauer et al., 2007; Fenn 2002) han revelado los efectos de los contaminantes en las acículas causando clorosis.

Además, la integración de nuevas tecnologías, como la Inteligencia Artificial, en la evaluación forestal sigue siendo limitada. La actualización y optimización de las escalas establecidas mediante estas herramientas permitirá una caracterización más precisa de la estructura y condición del dosel, mejorando la eficacia del monitoreo y la capacidad de predicción de cambios ecosistémicos.

Esto, a su vez, contribuiría a una gestión forestal más informada y adaptativa, favoreciendo la conservación y resiliencia de los bosques frente a factores de perturbación. Sumado a ello, Vargas-Marques (1997) señala que el parque carece de un plan de manejo, una condición que persiste hasta la actualidad. Esta falta de gestión ha provocado una notable degradación del ecosistema, afectando tanto su biodiversidad como su estabilidad ambiental.

De lo anterior deriva las siguientes preguntas de investigación:

Tomando como referencia la condición de las copas del arbolado, ¿Cuál es el estado de salud del bosque en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (CDMX)?

¿La inteligencia artificial es una herramienta de apoyo al evaluar y monitorear la salud de un bosque mexicano?

Objetivos

General

Evaluar la salud del bosque en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco por medio de las copas de árboles y con una estimación apoyada con inteligencia artificial

Particulares

- Establecer el cambio de diversidad arbórea del parque en el año 2024.
- Determinar la salud de la copa y el impacto que tiene sobre el parque.
- Realizar una nueva escala de evaluación de salud de bosque con ayuda de IA
- Realizar comparación de la estimación realizada con una estimación dada por inteligencia artificial para determinar el rango de error de la IA.

Material y método

Área de estudio

Al suroeste de la Ciudad de México, en la alcaldía Tlalpan, se encuentra el Parque Nacional Cumbres del Ajusco. Cuenta con una extensión de 920 hectáreas (Vargas-Márquez, 1997). Su característica distintiva es su topografía montañosa y accidentada, con elevaciones que van de 2,800 m.s.n.m y alcanzando su punto máximo en el cerro pico del águila a 3,930 m.s.n.m.

Vegetación. De acuerdo con Saavedra y Perevochtchikova (2017), la distribución es de tipo pastizal en la parte más alta, con algunos ejemplares aislados de *Pinus hartwegii* de menos de 5 metros. Al ascender la ladera, el pastizal pasa a matorral y, entre las cotas de los 3 700 msnm y los 3 600 msnm, se observa una franja con bosque de *Pinus hartwegii*. Por debajo de esta cota y hasta los 3 200 msnm aparece el bosque de oyamel (*Abies religiosa*), seguido de bosques mixtos donde se observan oyameles, pinos (*Pinus hartwegii*, *montezumae* y *pseudostrous*), encinos (*Quercus laurina*, *rugosa* y *lanceolata*), ailes (*Alnus firmifolia* y *zorullensis*) y madroños (*Arbutus xalapensis*).

Clima. Saavedra y Perevochtchikova (2017) describen un clima semífrio, subhúmedo con veranos frescos. Una temperatura anual de entre 5-12 °C y una precipitación promedio anual de 1,086mm.

Edafología. Se presentan suelos delgados del tipo andosol y litosol, con abundante materia orgánica, (si se retira la capa de hojarasca) lo que causa condiciones para drenaje rápido por las texturas lino-arenosas-arcillosas, susceptibles a la erosión.

Geología. Se observan rocas ígneas extrusivas, que por su origen volcánico tienen un alto potencial de infiltración de agua, evitando escurrimientos perennes en la superficie y favoreciendo la captación de agua subterránea.

Hidrología. Alrededor del Volcán Ajusco hay cuatro ríos cuyo caudal crece durante las temporadas de lluvias: el río San Buenaventura, río Eslava (también conocido como Viborillas), río Santiago y río Seco (Castillo-Torres, 1976).

Trabajo de campo

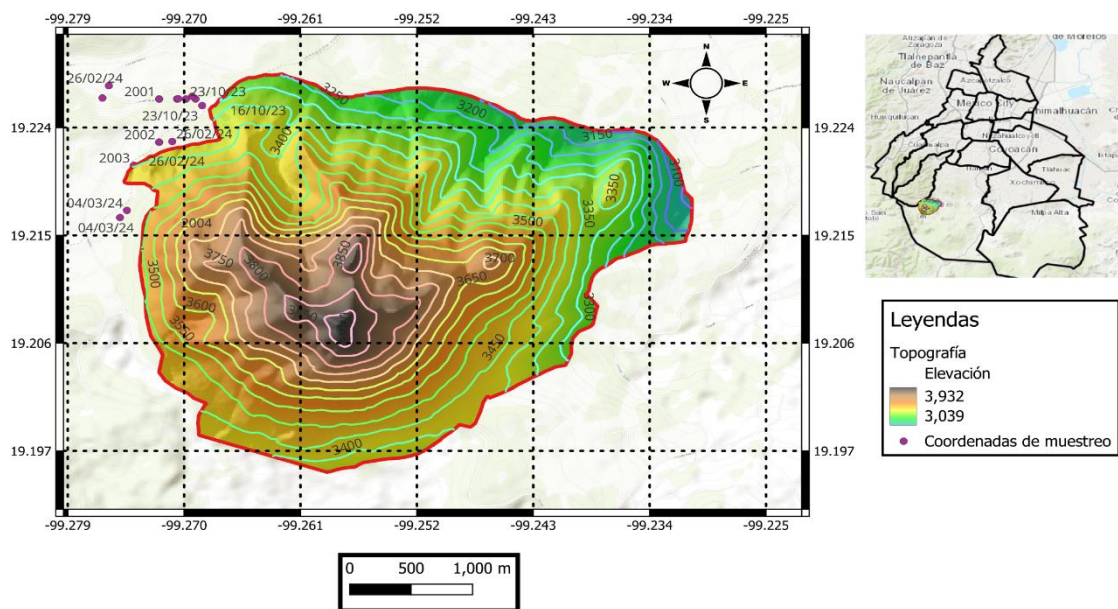


Figura 8. Polígono Parque Nacional Cumbres del Ajusco y zonas de muestreo.

Parque Nacional Cumbres del Ajusco. Cuenta con 920 hectáreas de bosque que abastecen el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Se realizó un muestreo en seis ubicaciones (coordenadas en tabla 4).

Tabla 4. Coordenadas de los muestreos.

Salida	Coordenadas
16 octubre 2023 (Primera salida)	19°13'25" N 99°16'1' O
23 octubre 2023 (Segunda salida)	19°13'35" N 99°16'14" O
19 febrero 2024 (Tercera salida)	19°13'22" N 99°16'19" O
26 febrero 2024 (Cuarta salida)	19°13'15" N 99°16'26" O
04 marzo 2024 (Quinta salida)	19°12'58" N 99°16'14" O

En cada zona de muestreo (rodal) se aplicó un muestreo por parcelas circulares que consta de cuatro círculos de 22 m² de diámetro (figura 6). El procedimiento se replicó en los 35 rodales. Para tener un mejor control de los registros diamétricos de cada círculo, se dividió en 4 cuadrantes (figura 9), realizando un levantamiento por el método del vecino más cercano descrito en The Urban Forest Effects (UFORE) Manual (315).

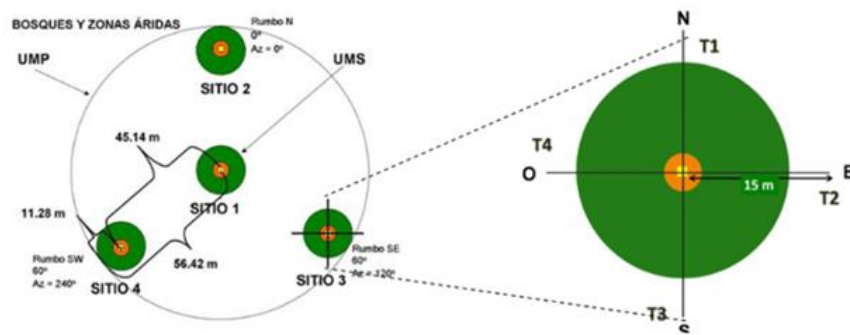


Figura 9. A) Muestreo en forma de Y, y B) Muestreo de parcela (Conafor, 2012).

Se recolectaron datos diamétricos: especie, DAP, alturas (total y al fuste), ancho de la copa, porcentaje de muerte regresiva y porcentaje faltante de copa, de acuerdo con lo descrito en los manuales de i-Tree Eco 2016. La altura se midió con la app Trees versión 4.1.8, previamente calibrada. Cuando la cercanía de árboles fue mucha, se usó la pistola Haga, considerando la distancia de entre 10 a 25 m con respecto al árbol, dependiendo de la visibilidad de la copa; considerando únicamente árboles con un DAP mayor a 8 cm y 1.30 de altura total.

Trabajo de laboratorio

Los datos recolectados en campo se registraron en el software i-tree, de acuerdo con los algoritmos de la suite y del tipo de proyecto fue un inventario completo. Una vez obtenido el inventario, se descargó el reporte por especie de salud de copa, para posteriormente ser depurados y clasificados con ayuda de Excel para elaborar las gráficas y obtener los porcentajes de condición de copa. Para la elaboración de escalas, se pidió a IA que con las escalas proporcionadas de RED II y i-Tree Eco realizara propuestas de una escala que unificara los datos relevantes de cada una, incorporando variables de bosques mexicanos, puliendo cada una hasta llegar a las escalas finales. Además, se le proporciono el inventario obtenido del programa i-Tree Eco para que se evaluara de acuerdo con los parámetros establecidos siguiendo estos pasos:

1. **Recolección de Datos:** Identificación de los datos obtenidos de campo, como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol, la altura de la copa, el área de cobertura de la copa, y los porcentajes de muerte regresiva y faltante en la copa.
2. **Normalización de Datos:** Para poder comparar diferentes indicadores se requiere normalizar los datos. Esto se hace dividiendo los valores de los porcentajes por el valor máximo o promedio de su respectivo indicador. Por ejemplo, si el porcentaje de muerte regresiva es 70-75%, el valor normalizado sería 72.5.
3. **Asignación de Puntuación:** Cada indicador se pondera según el valor asignado en la evaluación de la salud del árbol

4. **Cálculo del Puntaje de Salud:** Se calcula un puntaje de salud para cada árbol sumando los productos de los valores normalizados y sus respectivas puntuaciones de acuerdo con las fórmulas de los índices creados.
5. **Interpretación del Puntaje:** El puntaje de salud resultante se puede interpretar en una escala de 0 a 5, donde 5 indica un árbol en excelente salud y 0 indica un árbol en muy mala condición. Se definen en rangos para clasificar los árboles en diferentes categorías de salud (por ejemplo, excelente, buena, regular, mala).

Resultados y discusión

Diversidad arbórea del parque en el año 2024.

La diversidad se obtuvo de comparar los reportes de i-Tree ECO para los años 1996-1998 (ingresados a i-Tree en 2018-19, repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica) para realizar la comparación con el año 2023-24 (figura 10). El inventario de 2019 arrojó **seis especies** y para 2024 **catorce**, de lo cual el 43% correspondió *Abies religiosa* y *Pinus teocote* como las más presentes, disminuyendo considerable y predominando *Pinus leiophylla* siendo que no hay registros anteriores de su presencia, lo que podría deberse por efecto de la reforestación.

Otro factor ambiental que se le atribuye es el cambio climático. De acuerdo con Wyman (1991) las plantas son muy sensibles al cambio del patrón del clima. Su distribución espacial cambia conforme el clima. Así Oyamel requiere de poca luz, con alta humedad. Las especies que mueren en las áreas liberan espacios y se colonizan por nuevas especies

(incluye plantaciones) nuevas áreas donde el clima cambiará. De esta manera se puede explicar la introducción de especies como *Pinus leiophylla*, la cual tolera temperaturas medias de entre 14-18°C (CONAFOR, 2003) o especies como *Quercus rugosa* que tolera temperaturas medias anual de 12 a 13° C (CONABIO, 2022).

Comparación de biodiversidad

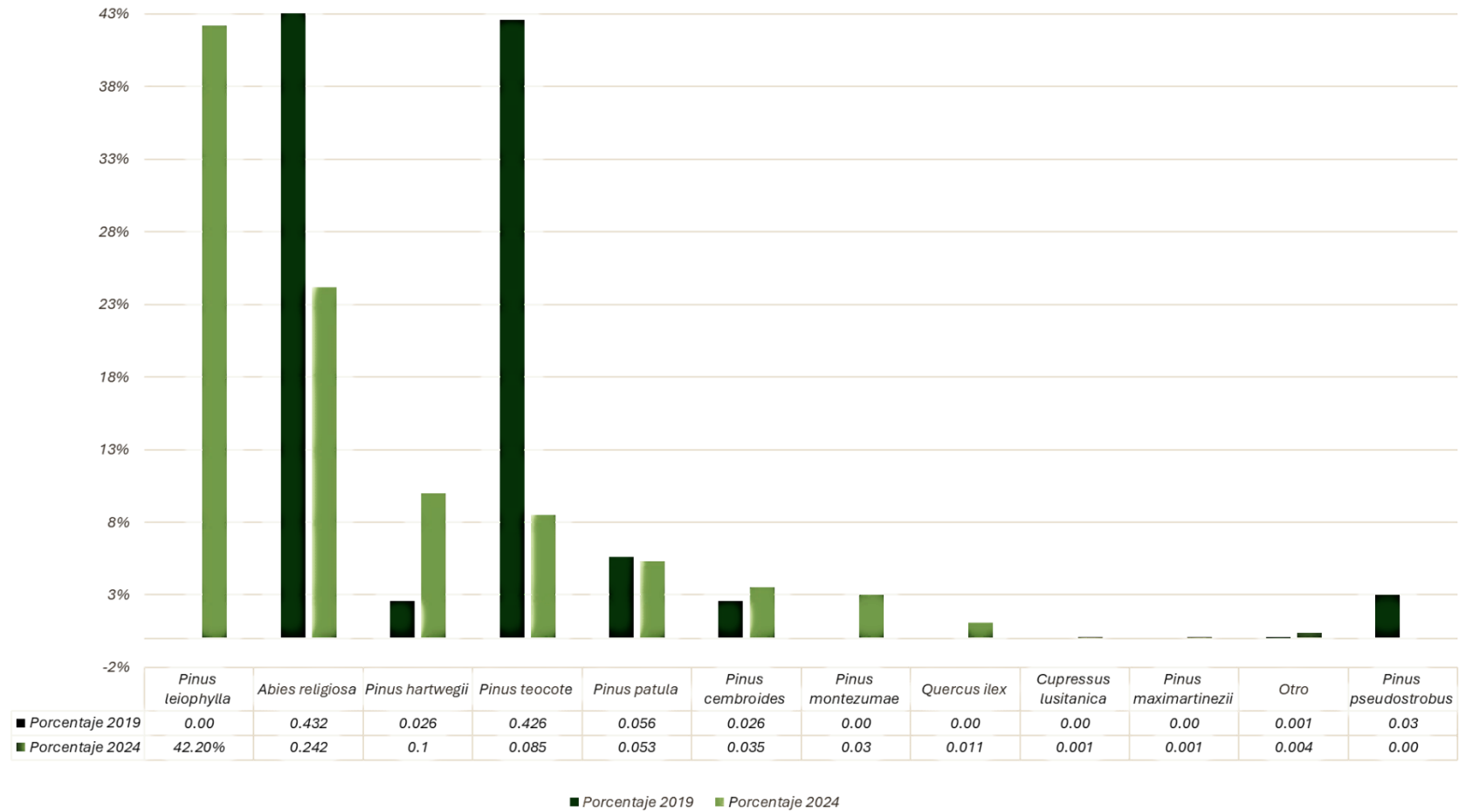


Figura 10. Grafica comparativa entre especies de los años 2019 y 2024.

Salud copa determinado con i-Tree Eco

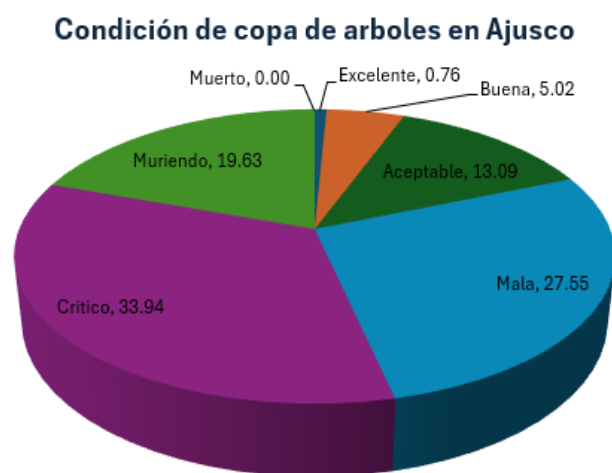


Figura 11. Condición de copa en muestreo de Ajusco. Información del reporte obtenido de i-Tree ECO, el informe revela que el 61.49% de los ejemplares están en declive.

Los resultados del muestreo total obtenidos del software i-Tree (figura 11) muestran que el 33.94% de los árboles evaluados (223 ejemplares del total 657) se encuentran en una condición crítica, mientras que el 27.55% (181 ejemplares) presentan una copa en mala condición. Estos hallazgos indican, que, de acuerdo

con el análisis global, el bosque se encuentra en un estado de deterioro, lo que sugiere que está atravesando un proceso de decadencia.

En comparación a nivel mundial, Bauer *et al* (2000) determinó resultados similares para la Ciudad de México en su evaluación por ozono, donde revelaron que las especies de pino mexicano presentan mayores daños en la copa a comparación a California, EE.UU.

El reporte por especie (figura 12) indica que la mayoría de las comunidades arbóreas se encuentran en un estado crítico o en proceso de deterioro. Así por ejemplo *Pinus cembroides* es la especie más afectada con el 73.9% de los árboles muestreados mostrando copas en estado de decadencia. En contraste, *Pinus patula* presenta las mejores condiciones, ya que, aunque no alcanza una categoría de excelencia, el 51% de los ejemplares se encuentra en un rango aceptable.

La condición de *Pinus teocote* es preocupante, ya que el 69.6% de los ejemplares muestreados muestran signos de deterioro y muerte. Según Miller *et al.* (2002), citado por Campos-Ruíz (2004), esta especie se clasifica como “moderadamente sensible” a los oxidantes fotoquímicos. Esto indica que, si bien presenta una mayor resistencia en comparación con otras especies, la contaminación en la zona está afectándola de manera significativa.

Entre las especies que tienen mayor número de árboles muestreados con una copa en condición crítica y mala se encuentran *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, lo cual resulta coherente con la investigación de Bauer *et al* (2000) que reportan que *P. hartwegii* es el pino más sensible a contaminantes atmosféricos dentro de la CDMX, mostrando un extenso moteado y bandas cloróticas junto con la pérdida de agujas maduras. Además, identifican que *Abies religiosa* es muy sensible al ozono.

A su vez, González-Medina *et al* (2010) reporta para el Desierto de los Leones una disminución en la retención de follaje en *Abies religiosa*, siendo lógico con las medidas de ozono. Por ello, se atribuye el estado crítico de estas especies a los contaminantes atmosféricos provenientes de los asentamientos urbanos cercanos a la zona. Las dos especies son señaladas por Vargaz-Marquez (1997) como las más afectadas. La población de *Abies religiosa* ha disminuido por la tala clandestina y los ejemplares jóvenes los encuentra totalmente secos. *Pinus hartwegii* ha sido desplazado por el pastizal amacollado de *Festuca*, *Calamagrostis* y *Muhlenbergia*.

Pinus montezumae es otra especie que presenta daño en copa crítico y malo, esto es similar a lo descrito por Hernández y Bauer (1984) en El Ajusco, donde esta especie presenta

daños moderados a severos. Concluyen que la defoliación prematura, el moteado clorótico de las agujas y la pérdida progresiva del vigor de copa se debió al ozono.

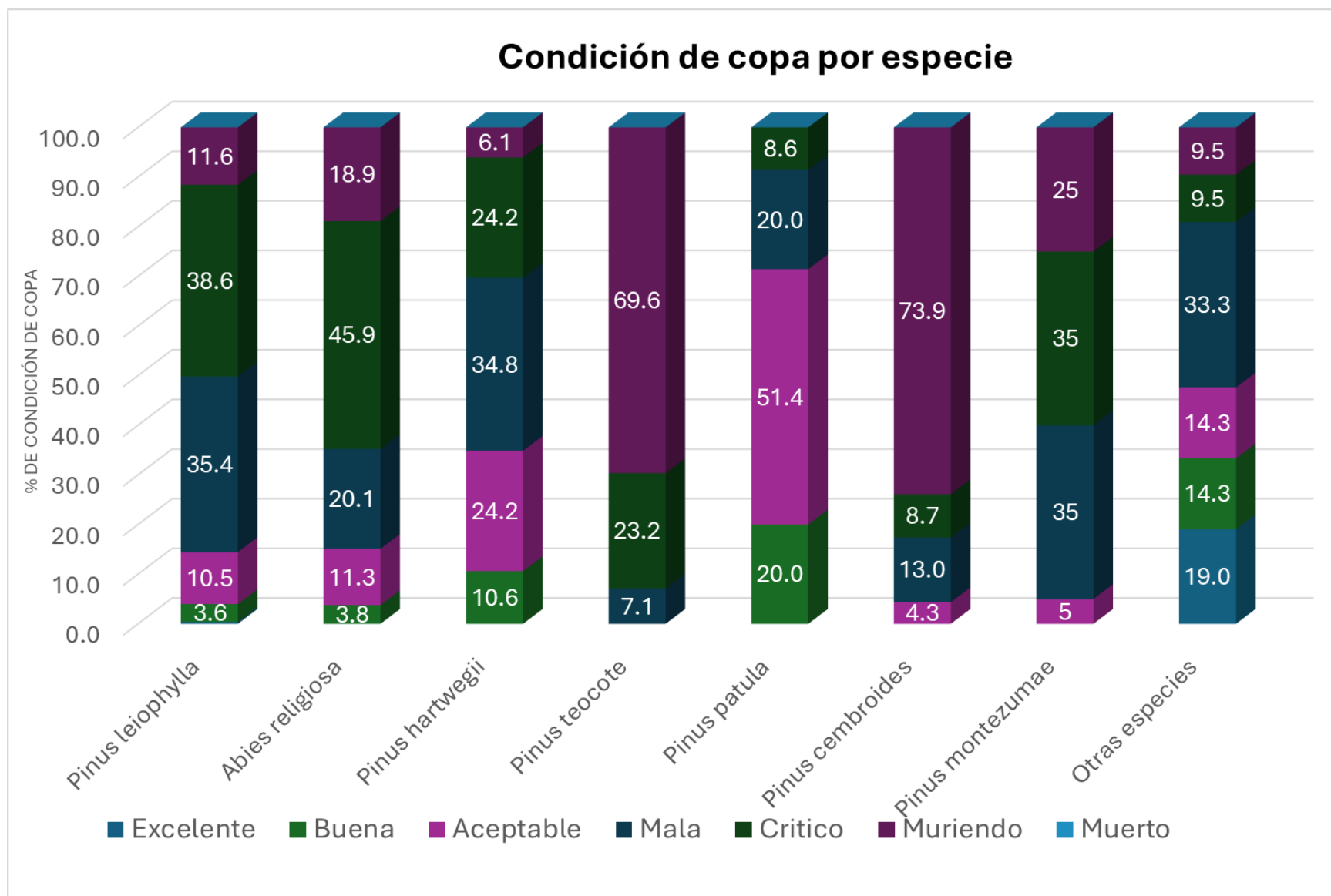


Figura 12. Distribución de salud de copa por especie realizado del reporte de i-Tree.

Entre los indicadores de salud forestal se encuentra la copa por que refiere a la densidad y cobertura del follaje de los árboles en una zona determinada a través de parámetros dendrómétricos. Las razones de elegir a la copa son: Fotosíntesis y producción de oxígeno, Biodiversidad, Protección del suelo, Indicador de estrés y Mitigación del cambio climático.

Las razones expuestas se pidieron a inteligencia artificial crear una nueva escala tomando como referencia las escalas de -Tree y RED II a partir del censo realizado en 2023-2024. La primera versión propuesta se puede describe a continuación.

Escalas de evaluación de salud de bosque con ayuda de IA

Modelo 1. Escala Integrada para la Evaluación de Árboles (EIEA)

Recolección de datos de campo

Se establecieron categorías morfológicas de los árboles para la recolección de datos. Esta característica influye en los criterios de evaluación de la **copa**, la **estructura** y el **entorno**. La figura 13 ejemplifica las diferentes formas de árboles.

Tabla 5. Clasificación de la morfología de árboles.

COPA	CARACTERISTICAS
Globosa o Extensa	Copa ancha y redonda. Simetría y densidad de follaje en función de su forma
Columnares o Piramidales	Copa angosta con predominio de una estructura vertical. Se evalúa la proporción entre altura y cobertura junto con la homogeneidad desde la base hasta la punta.
Irregulares o Escalonados	Copa con crecimiento asimétrico debido a su entorno o genética. Se deben considerar las adaptaciones al ambiente (inclinaciones o ramas)
Palma o Estilo Pluma	No tiene ramas, se evalúan frondas o coronas.



Figura 13. Ejemplo de diferentes formas de copa de árboles en el bosque de San Juan de Aragón. Foto tomada del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica en 2018.

Integración en la Evaluación

Los criterios de evaluación de la copa y la estructura se adaptan para considerar **las** características que expresan la salud individual y grupal a partir de la forma:

Tabla 6. Criterios de evaluación.

Criterio	Características
Condición de copa	En árboles globosos, se pondera la simetría lateral . En árboles columnares la densidad vertical . Árboles irregulares tendrán márgenes de tolerancia en asimetrías .
Estructura del Árbol	Equilibrio entre tronco, ramas principales y secundarias, considerando la carga natural de cada tipo. Identificar puntos críticos específicos: ápice dañado en un árbol piramidal o ramas fracturadas en globoso.
Factores Ambientales y Espaciales	Para cada tipo de árbol, ajustar las expectativas sobre espacio disponible y competencia según sus necesidades morfológicas.

Análisis de datos

Clasificación y puntuación de datos

Usar los datos registrados en el formato para organizar la información en categorías específicas (tabla 7) y asignar las puntuaciones correspondientes a las características descritas en la tabla 8.

Tabla 7. Recolección de datos de campo y clasificación en categorías. Se enfatiza en la elaboración del puntaje a partir de la estandarización de cada una de las características de la copa

Características	Forma de evaluar
Porcentaje de condición de copa	91-100% Excelente
	71-90% Buena
	51-70% Aceptable
	31-50% Regular
	11-30% Deficiente
	0-10% Crítica
Densidad del follaje	Determina si es completo, disperso o escaso.
Homogeneidad	Evalúa si la distribución del follaje es uniforme o irregular.
Daños	Identifica los principales factores de afectación, como ramas secas, pérdida de follaje o daños por plagas.

Tabla 8. Asignación de puntaje para datos recolectados en la escala modelo 1. La relación características y puntajes se utilizan para la elaboración del índice de condición de copa.

Aspecto Evaluado	Condición	Puntos
Porcentaje de cobertura	91-100%	5
	71-90%	4
	51-70%	3
	31-50%	2
	11-30%	1
	0-10%	0
Densidad del follaje	Completo	3
	Disperso	2
	Escaso	1
Homogeneidad	Uniforme	2
	Irregular	1
Daños	Sin daños	2
	Con daños	1

Calcular el índice de condición de copa

$$\text{Índice de Condición de Copa (ICC)} = (\text{Cobertura Puntos}) + (\text{Densidad Puntos}) + (\text{Homogeneidad Puntos}) + (\text{Daños Puntos})$$

Interpretar los resultados

Rangos del ICC para clasificar la condición general de la copa:

Tabla 9. Interpretación de resultados para escala modelo 1.

ICC	Clasificación de Condición
9-12	Excelente
7-8	Buena
5-6	Regular
3-4	Deficiente
0-2	Crítica

Aplicación de la EIEA a muestreo del PNCA

Clasificación de la salud Distribución por especie

Se creó en base al Índice de Condición de Copa (ICC), en donde se sumaron las puntuaciones de: Puntuación por Muerte Regresiva (basada en el porcentaje de pérdida de follaje) y la Puntuación por Copa Faltante (Basada en el porcentaje de copa ausente). Los datos obtenidos sugieren que existen diversos problemas de salud en el bosque, pues se obtuvo un predominio de árboles en categorías de salud "Crítica" y "Deficiente" para varias especies (figura 15).

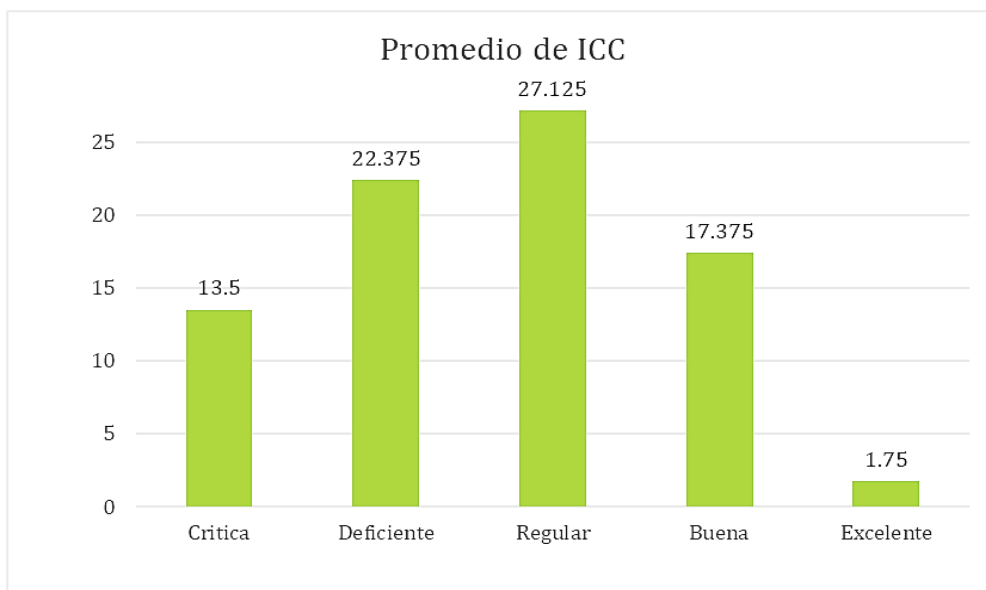


Figura 14. Promedios del ICC. En el grafico se observa que de los datos globales el promedio de ICC más alto se encuentra en la categoría "Regular", seguido de la categoría "Deficiente", lo que sugiere que la salud de copa está en riesgo.

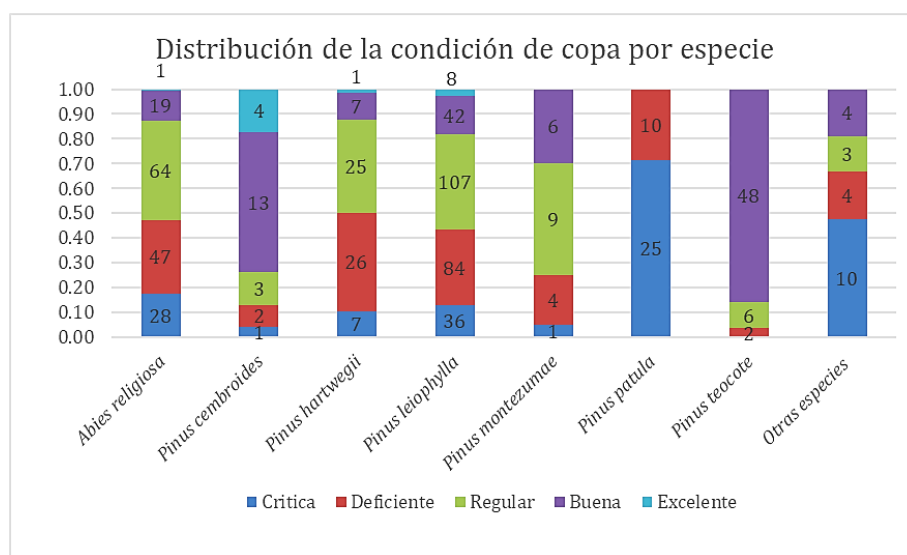


Figura 15. Distribución de la clasificación de ICC para la escala modelo 1. La especie que mejor salud presenta es Pinus teocote con 48 ejemplares muestreados en condición excelente. Las especies clasificadas como "Otras especies" son aquellas que tienen menos de 10 ejemplares muestreados; Pinus maximartinezii, Quercus spp, Quercus ilex, Quercus rugosa, Quercus polymorpha, Cupressus lusitanica y Melodinus.

Distribución de las clasificaciones de la ICC

La figura 16 muestra cómo se distribuyen las clasificaciones de salud ("Excelente", "Buena", "Regular", "Deficiente", "Crítica") entre las diferentes especies de árboles en el bosque. La mayoría de los árboles están en categoría **"Regular"**, indicando que la salud general del bosque no es excelente, pero tampoco completamente crítica. Se observa el promedio de ICC obtenido por especies, donde *Melodinus*, *Pinus cembroides* y *Pinus teocote* son las especies con valores más cercanos a 12.

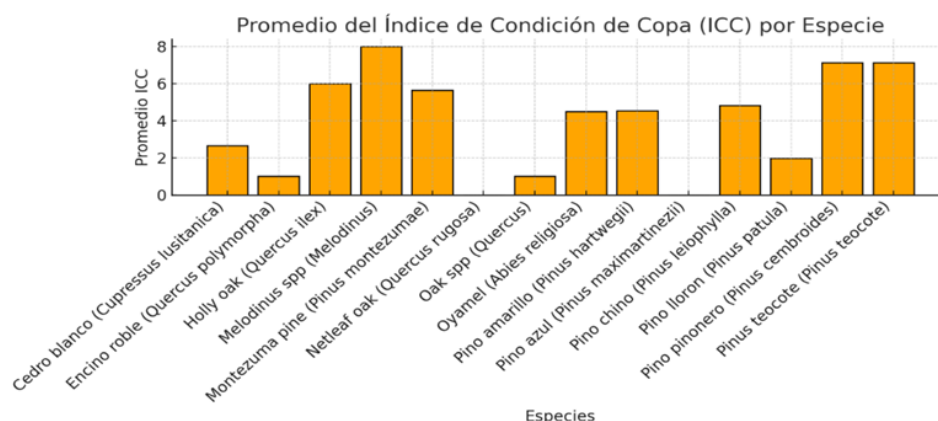


Figura 16. Promedio del ICC por especie para la escala modelo 1.

La escala del modelo 1 dejaba claro qué el tipo de árboles no se encuentran en ecosistemas silvestres, como el Ajusco. Si bien, la intención era hacerla apta para especie del ecosistema de bosque templado; es importante darle un enfoque claro, por lo que se pidió la escala fuera enfocada a un bosque de coníferas como el PNCA. La versión 2 se describe a continuación. Los datos obtenidos del muestreo se procesaron en la IA con esta versión y los resultados fueron los siguiente.

Modelo 2. Escala Integrada para la Evaluación de Árboles (EIEA) en Bosque de Coníferas

La escala se ajustó para la evaluación de árboles en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, con especial enfoque en las especies de **oyamel (Abies religiosa)** y **pinos (Pinus spp.)**. Se basa en la Escala del Modelo 1 e incorpora criterios específicos para bosques de coníferas.

Datos de campo

Criterios de Evaluación para Condición de Copa

La evaluación de la copa en coníferas considera:

Densidad vertical. Desde la base hasta el ápice.

Pérdida del ápice. Ápice dañado o ausente indica un árbol en estrés severo.

Ramas secas inferiores: Se toleran en árboles maduros.

Escala de Evaluación

Tabla 10. Escala de evaluación de porcentaje de cobertura de copa para la escala modelo 2.

Porcentaje de cobertura de copa	Descripción	Observaciones específicas para coníferas
91-100%	Excelente	Copa completa y homogénea; ápice intacto.
71-90%	Buena	Copa funcional; pequeñas áreas de desgaste.
51-70%	Aceptable	Pérdida moderada de follaje; ápice presente.
31-50%	Regular	Pérdida significativa de copa; ramas secas.
11-30%	Deficiente	Ápice dañado o ramas superiores secas.
0-10%	Crítica	Copa muy reducida o completamente seca.

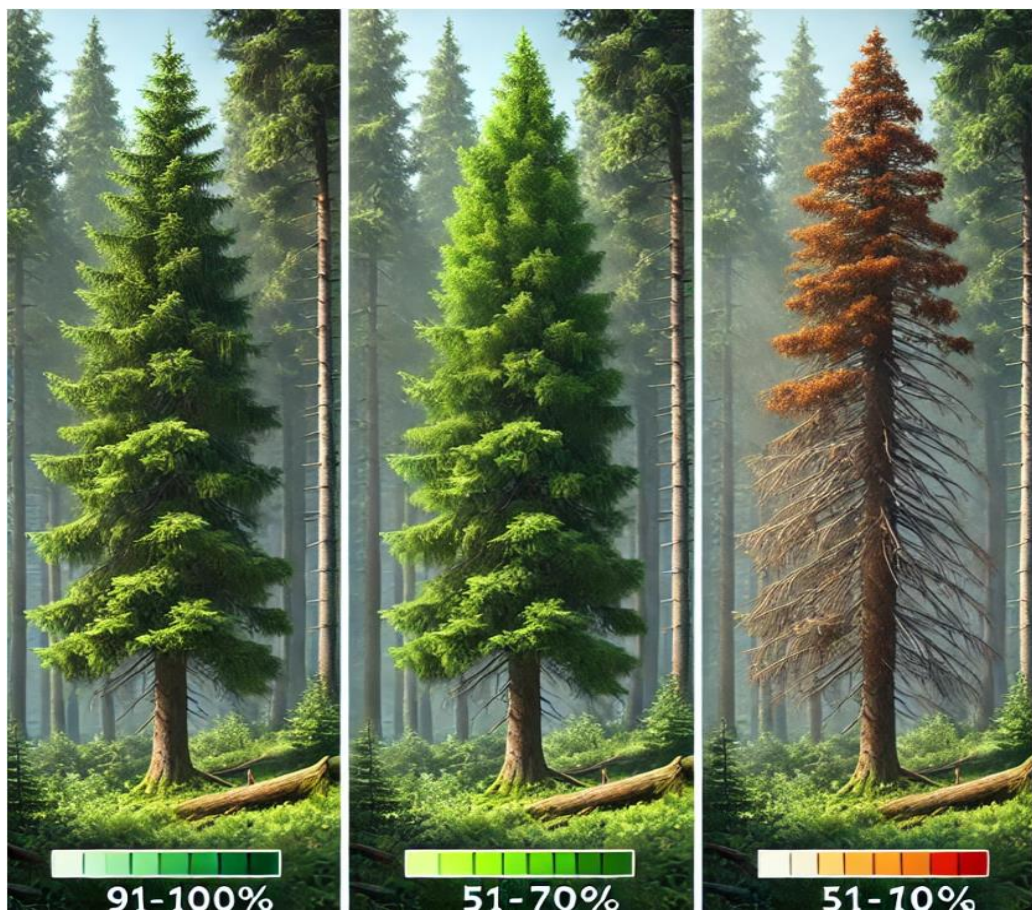


Figura 17. Escala visual de evaluación de copa para el modelo 2 generada con IA basado en las categorías y porcentajes establecidos.



Figura 18. Ejemplo de diferentes formas de copa de árboles en el bosque de San Juan de Aragón. Foto tomada del repositorio del Laboratorio de Contaminación Atmosférica en 2018.

Elementos adicionales para registrar

Presencia de resina en el tronco: Indicador de plagas o estrés.

Color del follaje: Verde oscuro (saludable) vs. amarillento (estrés).

Distribución del follaje: Homogéneo o irregular.

Estructura y Salud del Árbol

Criterios de Evaluación

Estado del tronco: Heridas, inclinaciones, pudrición o fracturas.

Sistema radicular: Nivel de exposición o daños visibles.

Producción de resina: Cantidad y distribución.

Escala de Evaluación

Tabla 11. Escala de evaluación de troncos para escala modelo 2.

Porcentaje	Descripción	Observaciones específicas para coníferas
91-100%	Excelente	Tronco recto y sin heridas.
71-90%	Buena	Pequeñas heridas o inclinación leve.
51-70%	Aceptable	Heridas moderadas o inclinación evidente.
31-50%	Regular	Tronco con pudrición o fracturas visibles.
11-30%	Deficiente	Daños severos; riesgo de caída.
0-10%	Crítica	Árbol muerto o en colapso.

Elementos adicionales para registrar

Estado del ápice: Evaluar si está intacto o dañado.

Diámetro a la altura del pecho (DAP): Como indicador de crecimiento.

Ramas principales: Fracturas o signos de estrés.

Factores Ambientales y Espaciales

Criterios de Evaluación

Espacio disponible: Comprobar que haya el espacio suficiente para crecimiento.

Competencia: Evaluar árboles o variables que restrinjan el desarrollo.

Exposición climática: Registrar si hay exposición a viento intenso, sol directo o cambios bruscos de temperatura.

Los espacios de crecimiento evitan el traslape de copas y la competencia intraespecífica, permite que el árbol principal este protegiendo a los brizales del sol y la radiación, que afectan las yemas apicales y laterales, afectando el crecimiento. También se evita la transpiración de los arbolitos y la evaporación del agua del suelo.

Tabla 12. Escala de evaluación para disponibilidad de espacio en escala modelo 2.

Porcentaje de adecuación ambiental	Descripción	Observaciones específicas para coníferas
91-100%	Excelente	Condiciones óptimas de espacio y clima.
71-90%	Buena	Pequeñas limitaciones de espacio.
51-70%	Aceptable	Espacio moderadamente limitado.
31-50%	Regular	Competencia notable o exposición intensa.
11-30%	Deficiente	Condiciones adversas significativas.
0-10%	Crítica	Árbol en un entorno altamente desfavorable.

Análisis de datos

Índice de Condición de Copa (ICC)

Se calcula sumando las puntuaciones obtenidas:

Desglose por Factor:

Cobertura de Copa

Evalúa el porcentaje de copa viva y funcional del árbol.

Tabla 13. Asignación de puntos para cobertura de copa en escala modelo 2.

Porcentaje de Cobertura	Puntos Asignados
91-100%	5
71-90%	4
51-70%	3
31-50%	2
11-30%	1
0-10%	0

Densidad del Follaje

Evalúa qué tan denso es el follaje del árbol.

Tabla 14. Asignación de puntos para densidad de follaje en escala modelo 2.

Densidad del Follaje	Puntos Asignados
Completo	3
Moderado	2
Escaso	1

Homogeneidad del Follaje

Determina si el follaje está distribuido de manera uniforme en la copa.

Tabla 15. Asignación de puntos para homogeneidad de follaje en escala modelo 2

Homogeneidad del Follaje	Puntos Asignados
Uniforme	2
Irregular	1

Daños

Considera si hay daños visibles en la copa, como ramas secas o afectadas por plagas.

Tabla 16. Asignación de puntos para daños en escala modelo 2

Daños	Puntos Asignados
Si	2
No	1

$ICC = (\text{Puntos de cobertura de copa}) + (\text{Densidad de follaje Puntos}) + (\text{Homogeneidad de follaje puntos}) + (\text{Daños puntos})$

Rango de Interpretación

Tabla 17. Interpretación de ICC obtenido para escala modelo 2.

ICC Total	Clasificación de Condición
9-12	Excelente
7-8	Buena
5-6	Regular
3-4	Deficiente
0-2	Crítica

Los datos de evaluación del tronco y el espacio disponible forman parte de la escala ya que tiene relación al estado de la copa, sin embargo, no son parte del ICC. Para complementar el estado de salud de bosque, se generan el ICET y ICE. A continuación, se integran y se asignan puntuaciones.

Evaluación del Tronco

El estado del tronco es un criterio importante para determinar la estabilidad del árbol y su nivel de deterioro. Se evalúa con base en el porcentaje de estado estructural del tronco.

Tabla 18. Escala de evaluación de tronco.

Estado del Tronco	Porcentaje	Puntos
Excelente (sin heridas ni inclinación)	91-100%	5
Buena (pequeñas heridas o inclinación leve)	71-90%	4
Aceptable (heridas moderadas o inclinación evidente)	51-70%	3
Regular (tronco con pudrición o fracturas visibles)	31-50%	2
Deficiente (daños severos; riesgo de caída)	11-30%	1
Crítica (árbol muerto o en colapso)	0-10%	0

Estos valores se integran en el **Índice de Condición Estructural del Tronco (ICET)**.

Tabla 19. Asignación de puntos para ICET.

Puntos	Condición	Interpretación
5	Excelente	Tronco recto, sin daños visibles.
4	Buena	Pequeñas inclinaciones o heridas menores.
3	Aceptable	Algunas heridas moderadas o inclinaciones evidentes.
2	Regular	Tronco con pudrición o fracturas visibles.
1	Deficiente	Daños severos, riesgo de caída.
0	Crítica	Árbol colapsado o muerto.

Evaluación del Espacio Disponible y Factores Ambientales

El espacio disponible y la competencia con otros árboles afectan el crecimiento y la estabilidad del árbol. Se evalúa con base en el porcentaje de adecuación ambiental.

Tabla 20. Escala de Evaluación del Espacio Disponible y Factores Ambientales

Adecuación Ambiental	Porcentaje	Puntos
Excelente (sin limitaciones de espacio ni estrés climático)	91-100%	5
Buena (pequeñas limitaciones de espacio)	71-90%	4
Aceptable (espacio moderadamente limitado)	51-70%	3
Regular (competencia notable o exposición intensa)	31-50%	2
Deficiente (condiciones adversas significativas)	11-30%	1
Crítica (entorno altamente desfavorable)	0-10%	0

El puntaje de adecuación ambiental crea el **Índice de Condición del Entorno (ICE)**, que ayudan a interpretar el impacto del espacio y la competencia en la salud del árbol.

Tabla 21. Asignación de puntos para ICE

Puntos	Condición	Interpretación
5	Excelente	Espacio suficiente, sin estrés ambiental.
4	Buena	Mínima competencia, condiciones favorables.
3	Aceptable	Competencia moderada, algunas restricciones de crecimiento.
2	Regular	Alta competencia o exposición climática fuerte.
1	Deficiente	Condiciones adversas severas, estrés ambiental.
0	Crítica	Árbol en un entorno totalmente desfavorable.

Con estos tres índices: Índice de Condición de Copa (ICC), Índice de Condición Estructural del Tronco (ICET) e Índice de Condición del Entorno (ICE) se crea el **Índice de Condición General (ICG)** sumando los tres componentes:

$$\text{ICG} = \text{ICC} + \text{ICET} + \text{ICE}$$

Tabla 22. Interpretación del ICG.

ICG Total	Clasificación General	Interpretación
18 - 22	Excelente	Árbol con copa saludable, buena estructura y espacio adecuado.
14 - 17	Buena	Árbol con buena salud general, pero puede tener un factor limitante.
9 - 13	Regular	Árbol con afectaciones moderadas en copa, tronco o entorno.
5 - 8	Deficiente	Árbol con problemas estructurales, estrés ambiental o deterioro de copa.
0 - 4	Crítica	Árbol en mal estado, con alto riesgo de colapso o muerte.

Aplicación del Modelo 2 EIEA para bosque de Coníferas a inventario del PNCA

Índice de Condición de Copa

La escala aplicada para los datos del PNCA, la mayoría de los árboles tienen un Índice de Condición de Copa “Regular” a “Buena” (figura 19), indicando un estado saludable en general. Sin embargo, un 17% de los árboles presentan una condición "Deficiente", lo que implica que existen sectores del bosque con signos de deterioro, posiblemente debido a factores ambientales, competencia o plagas. Es importante mencionar que los árboles muestreados que no pertenecen a pino y oyamel se omitieron de este muestreo. Las especies excluidas fueron: *Quercus* spp, *Quercus ilex*, *Quercus rugosa*, *Quercus polymorpha*, *Cupressus lusitanica* y *Melodinus*.

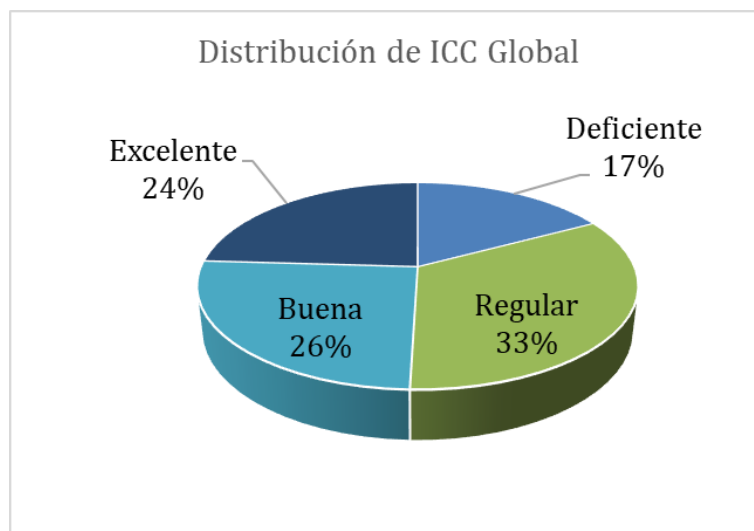


Figura 19. Gráfica de distribución global del Índice de Condición de Copa para la escala modelo 2.

La figura 20 refleja especies con mayor ICC promedio, como *Pinus maximartinezii* y *Pinus patula*, lo que indica que estos árboles tienen mejor condición de copa. Por el contrario, *Pinus cembroides* y *Pinus teocote*. presentan los valores más bajos, lo que sugiere que estos árboles pueden estar más afectados por estrés ambiental, plagas o competencia. Sin embargo, se debe tomar en consideración otra variable.

El número de árboles muestreado de *Pinus maximartinezii* fue de 4 ejemplares, los cuales se encuentran en una condición excelente. Si bien, tienen una buena salud de copa, no representa gran mayoría. Especies como *Abies religiosa* y *Pinus leiophylla* fueron las más predominantes en el bosque, contando con un número total de 159 y 277 ejemplares evaluados respectivamente, los cuales tienen un promedio de ICC que entra dentro de la categoría “Deficiente”. La figura 21 del análisis por especie, *A. religiosa* y *P. leiophylla*

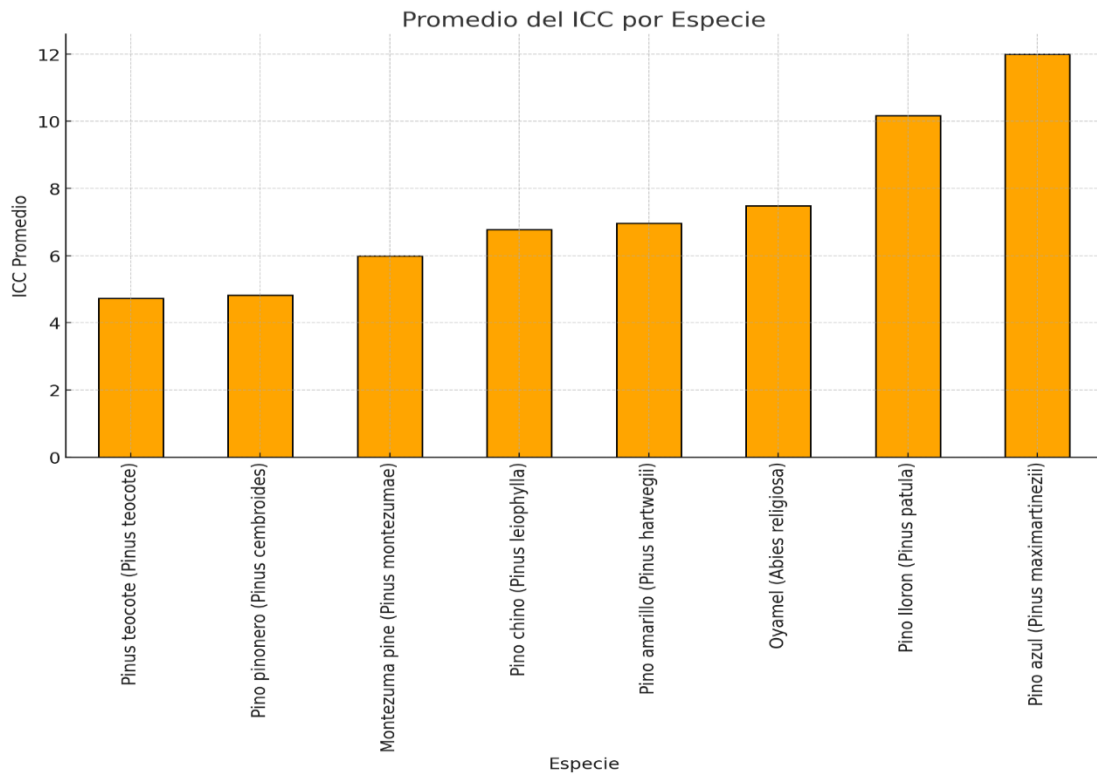


Figura 20. Promedios de Índice de Condición de Copa por especie para escala modelo 2.

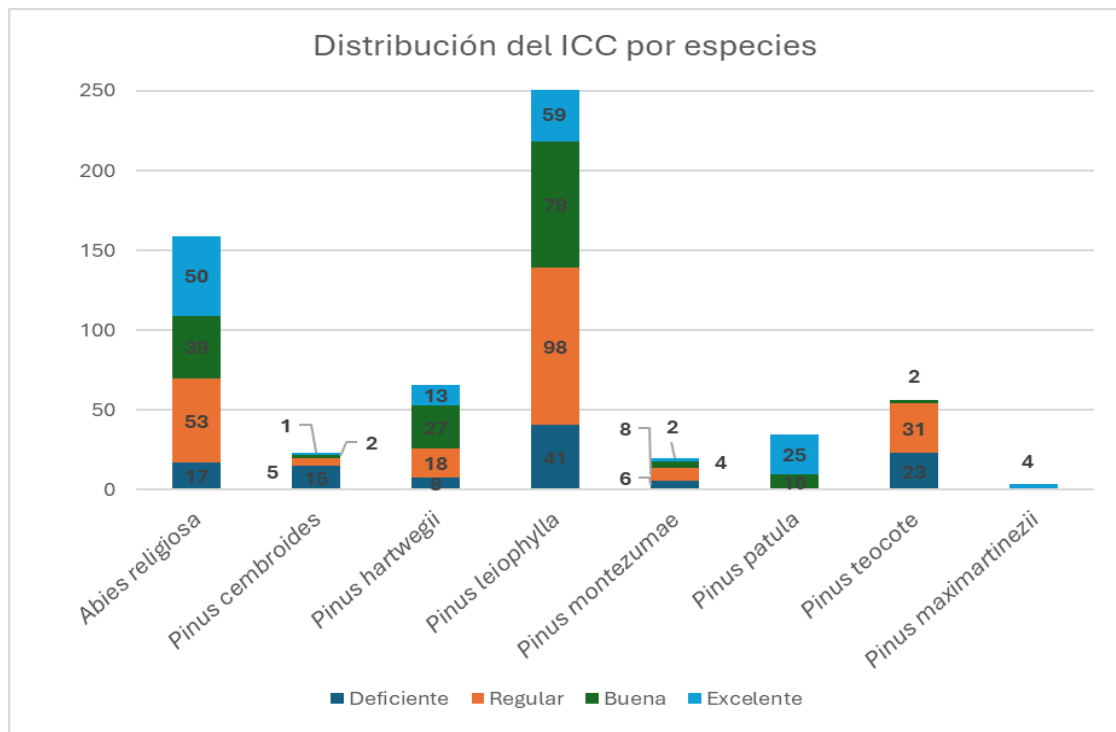


Figura 21. Distribución de condición de copa por especie para modelo 2.

Para la visualización este resultado se extrajo del repositorio del Laboratorio de contaminación atmosférica una imagen tomada el 25 de marzo del 2019 (figura 22) en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, donde se observa las copas de diferentes ejemplares de oyamel en estado deficiente.



Figura 22. Formas de las copas de pino y oyamel que ilustran el estado de salud en decadencia.

Índice de Condición Estructural de Tronco (ICET)

En esta ocasión por los datos recolectados en campo, el índice se basó en el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y Altura Total del árbol, ya que estos valores pueden reflejar la estabilidad y madurez estructural. Por lo que la clasificación fue de la siguiente manera:

Tabla 23. Interpretación el ICET.

DAP (cm)	Altura Total (m)	Puntos ICET	Descripción
>50 cm	>15 m	5	Tronco recto y sin daños.
40 - 50 cm	12 - 15 m	4	Tronco con mínima inclinación.
30 - 40 cm	10 - 12 m	3	Pequeñas heridas o inclinación leve.
20 - 30 cm	8 - 10 m	2	Heridas moderadas o inclinación visible.
10 - 20 cm	5 - 8 m	1	Tronco con pudrición o fracturas.
<10 cm	<5 m	0	Árbol con alto riesgo de caída.

Siguiendo el criterio, se observa que el ICET (figura 23) presenta en mayoría una condición “Deficiente” seguida de una condición “Regular”. Estudios como el de Pérez-Suarez (2000) han demostrado que el DAP tiene una relación estrecha con la condición de copa, por lo que es importante resaltar la condición en la que se encuentran los troncos de árboles muestreados.

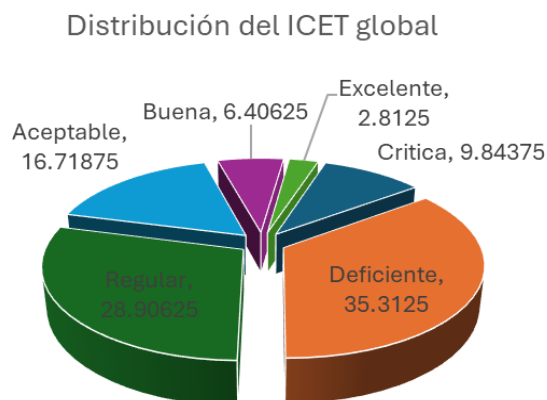


Figura 23. Distribución del Índice de Condición Estructural de Tronco.

Al realizar el análisis del ICET por especie (figura 24), podemos resaltar que *Abies religiosa* y *Pinus leiophylla* presentan una copa en categoría de excelente, solo 9 y 3 árboles, respectivamente.

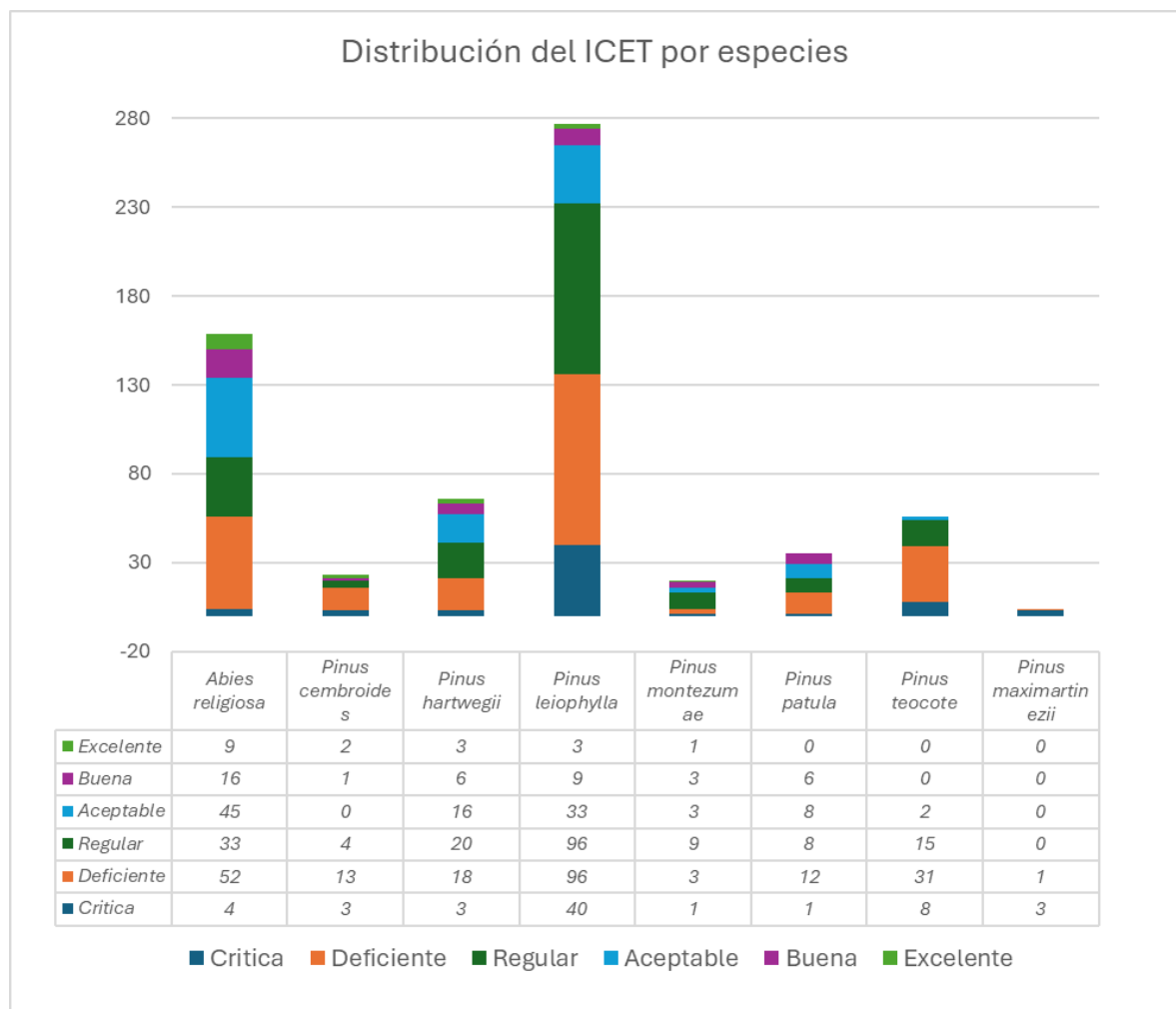


Figura 24. Distribución del Índice de Condición Estructural de Tronco por especie.

Índice de Condición del Entorno (ICE)

De igual manera, por los datos recolectados en campo, el índice se basó en la Cobertura de Copa; convertida a porcentaje real por medio de la formula $\text{Copa Real} = \% \text{Copa faltante} - 100$, y Altura Total del árbol, porque estos factores reflejan el espacio disponible y la competencia con otros árboles. En la tabla 24 se muestra el estado (descripción) de los árboles muestreados en 2024.

Tabla 24. Interpretación del ICE

Cobertura de Copa (%)	Altura Total (m)	Puntos ICE	Descripción
>80%	>15 m	5	Excelente espacio disponible y sin estrés.
70 - 80%	12 - 15 m	4	Buen espacio con mínima competencia.
50 - 70%	10 - 12 m	3	Espacio moderadamente limitado.
30 - 50%	8 - 10 m	2	Competencia notable, estrés presente.
10 - 30%	5 - 8 m	1	Condiciones adversas con alto estrés.
<10%	<5 m	0	Entorno completamente desfavorable.

Siguiendo el criterio, se observa que el ICE presenta en mayoría una condición “Deficiente” a “Regular”, siendo muy similar al ICET.

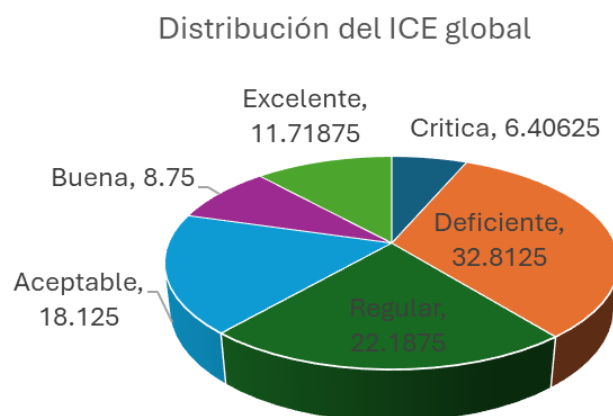


Figura 25. Distribución del Índice de Condición del Entorno.

En cuanto a la distribución de este índice por especie, la mayoría muestran un índice de entre “Deficiente” a “Regular”.

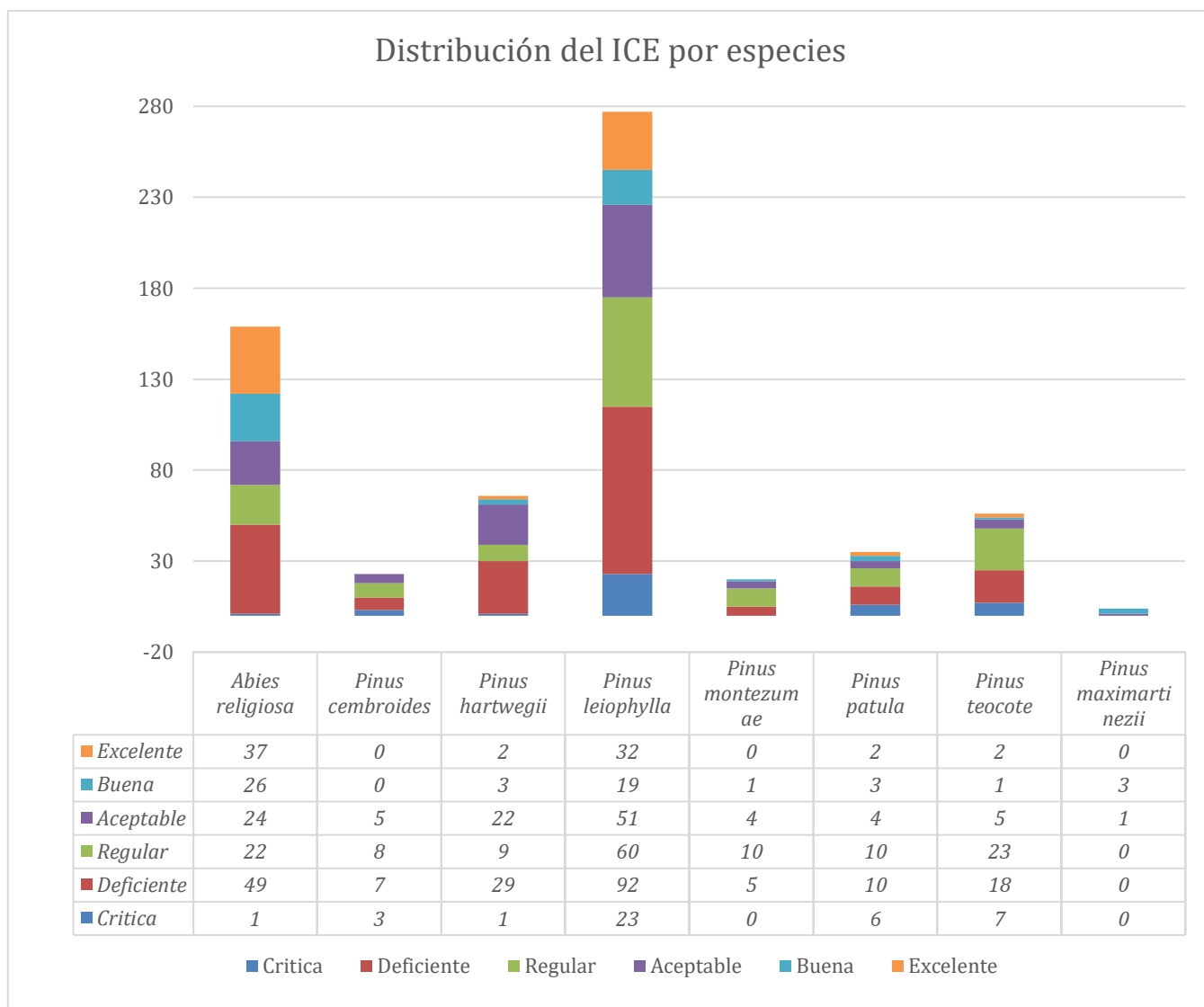


Figura 26. Índice de Condición del Entorno por especie.

Índice de Condición General (ICG)

Los análisis previos nos muestran un panorama específico sobre cada índice, sin embargo, estos puntajes se deben sumar para obtener un resultado integral. De acuerdo con ello, el Índice de Condición General para el bosque revela que este se encuentra en decadencia, pues en su mayoría se clasifica en condición “Deficiente” seguida de “Regular”. Estos resultados

son coherentes a las previas evaluaciones realizadas por el software i-Tree y el primer modelo de escala de evaluación.

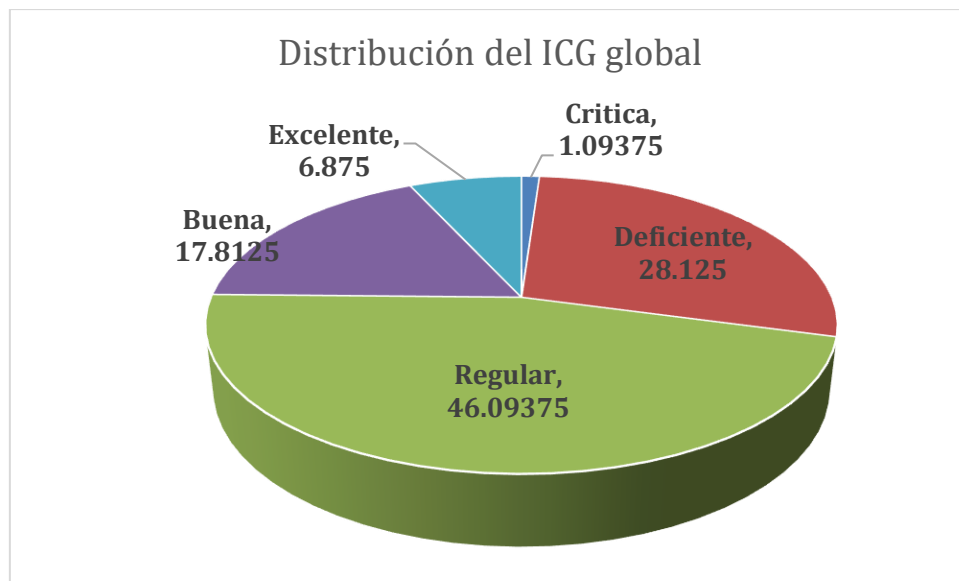


Figura 27. Distribución del Índice de Condición General (ICG).

La evaluación por especie indica que la mayoría, aun teniendo pocos arboles muestreados, se encuentran en condiciones de decadencia.

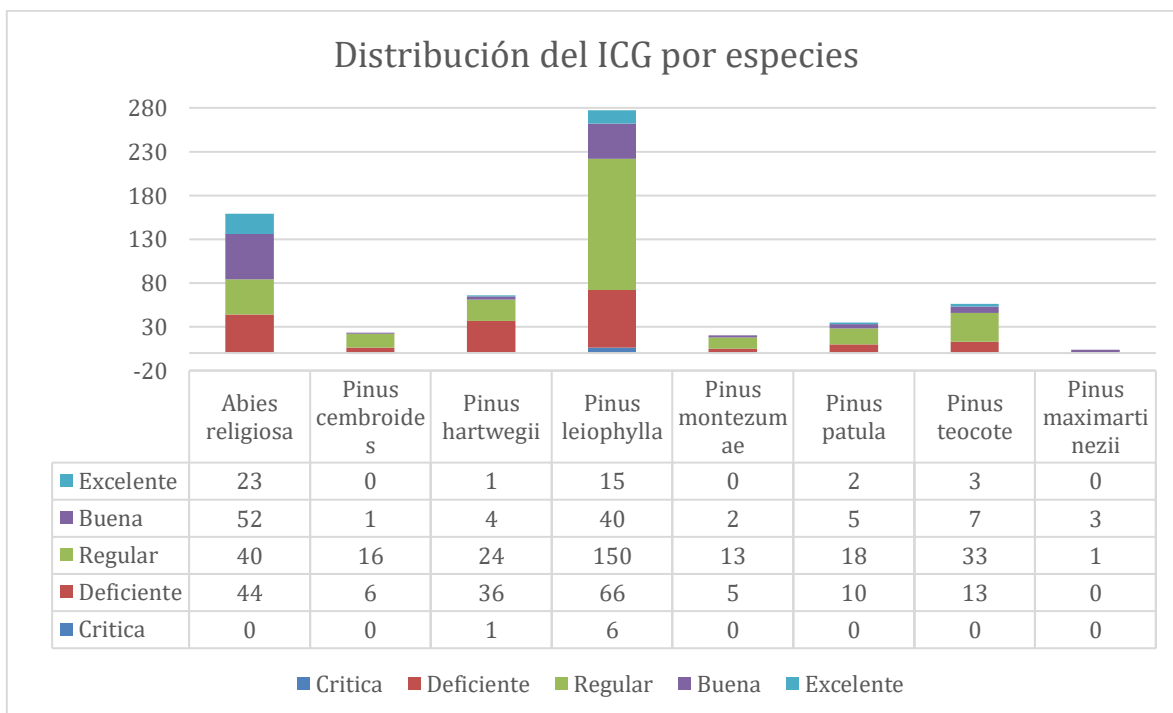


Figura 28. Distribución del Índice de Condición General por especie.

Consideraciones Finales de ambas escalas

Las escalas fueron creadas considerando los criterios estandarizados por i-Tree y RED II, usadas en EE. UU. i-Tree ha sido una herramienta muy útil al realizar el monitoreo de bosques, pues permite obtener diversas salidas basadas en datos dendrómetros que evalúan los servicios ecosistémicos de provisión y soporte. Sin embargo, una desventaja es que no se toma en consideración el tipo de bosque a estudiar, es decir, no discrimina si se evalúa un bosque urbano, natural, bosque de coníferas, bosque tropical, entre otros.

El modelo 2 fue estandarizado para bosque de coníferas con especial enfoque a pinos y oyameles, permitiendo evaluar más zonas del árbol que se relaciona con la copa, como tronco o espacio disponible. Esta variable es incorporada por i-Tree, pero mejorada al crear índices. La escala de defoliación es similar a la estandarizada por RED II, la cual está estimada en porcentajes del 5%, sin embargo, las escalas creadas usan rangos más grandes con la intención de hacer más sencillo la estimación, ya que visualmente se observa con mayor facilidad si un árbol ha perdido el 10%, 30%, 50% o más de su copa a comparación de intervalos más pequeños, causando que la medición en campo sea más difícil y menos precisa.

De acuerdo con los objetivos del proyecto, la escala modelo 2 es más útil y precisa, ya que es una herramienta práctica para evaluar la salud de los árboles en el Ajusco, considerando las características de los oyameles y pinos.

Para poder llevar un mejor control sobre la condición del bosque se recomienda:

- Evaluar en diferentes épocas del año para observar las variaciones en los diferentes periodos de tiempo.

- Complementar los inventarios con análisis de plagas y enfermedades específicas de coníferas.
- Crear más escalas visuales con imágenes tomadas en campo que ejemplifiquen las diferentes condiciones de copa (figura 26).



Figura 29. Ejemplo de copas sanas de oyamel en la cañada del queso en el parque nacional Zoquiapan.

Conclusiones

- El daño de copa evaluado por i-Tree sugiere a ozono como el causante, afecta el vigor de *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae* y en específico a *Pinus teocote*.
- El cambio en la biodiversidad reporta más especies que en años anteriores, como lo son los *Quercus rugosa*, *Q. polimorfa*, *Q. ilex*, *Quercus spp*, *Cupressus lusitánica* y *Melodinus*.
- i-Tree es una herramienta para gestionar bosques naturales y urbanos, proporciona amplios resultados sobre la condición de copa, remoción de contaminantes y servicios ecosistémicos soporte y provisión.
- IA es una excelente herramienta para integrar diferentes parámetros de evaluación de salud de bosque, permitiendo diferenciar entre zonas, climas, especies, entre otros. Si bien es necesario estandarizar las escalas, se puede asistir el monitoreo de bosques con ella.
- En las 3 escalas se concluye que el bosque está atravesando por un proceso de decadencia, causado por contaminantes y pérdida de terreno. Es urgente un plan de manejo para la protección de la zona.
- El programa de manejo y conservación del PNCA puede apoyarse de las escalas estudiadas en la investigación, y con ello se evita el sesgo de la expertis del consejo asesor de investigación del Parque nacional.
- El modelo 1 es aplicables a bosques urbanos y naturales, debido a que considerar las formas de la copa: columnar, Cónica, Ovoide, Redonda, Umbelada e Irregular.
- El modelo 2 es exprofeso para géneros de la familia pinácea (Cedro, Abies, Pino).

Referencias

1. AECID. (2023). *Estimación e interpretación de indicadores de biodiversidad forestal*. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. 10-15.
<https://intercoonecta.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/Estimaci%C3%B3n%20e%20interpretaci%C3%B3n%20de%20indicadores%20de%20biodiversidad%20forestal.pdf>
2. Alvarado-Rosales D., Saavedra-Romero L., Franco Islas Y., Villa-Castillo J. y Quiroz-Reygadas D. (2021). Condición de copa de bosques y selvas de México: Análisis 2014. *Madera y bosques*, 27(1), <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712114>
3. Alvey A. (2006). Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* 5, 195–201. 10.1016/j.ufug.2006.09.003
4. Avendaño-Leademl. (2019). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Geográfica de América Central*, 2 (65), 63-76
5. Baret, F., & Buis, S. (2008). Estimación de las características del dosel a partir de observaciones de teledetección: Revisión de métodos y problemas asociados. En S. Liang (Ed.), *Avances en la teledetección terrestre* (pp. xx-xx). Salmer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6450-0_7
6. Bauer, L. I. de, Hernández-Tejeda, T., & Skelly, J. M. (2000). Air pollution problems in the forested areas of Mexico and Central America. *Air pollution and the forests of developing and rapidly industrializing regions. Report No. 4 of the IUFRO Task*

Force on Environmental Change, **4**, 35–61.

<https://doi.org/10.1079/9780851994819.0035>

7. Bechtold, William; Tkacz, Borys; Riitters, Kurt. 2007. The historical background, framework, and the application of forest health monitoring in the United States. In: Proceedings of the international symposium on forest health monitoring; 2007 January 30-31; Seoul; Republic of Korea. Available from Korea Forest Conservation Movement (sansarang@kfc.or.kr): 19-40
8. Benavides M., H. M. (1989). *Bosque urbano: la importancia de su investigación y correcto manejo*. En A. Villa, A. Castro y C. Nieto (Eds.), *Memoria del Congreso Forestal Mexicano 1989* (Tomo II, pp. 966-992). Gobierno del Estado de México, Protectora e Industrializadora de Bosques (Protinbos) y Academia Nacional de Ciencias Forestales, A. C. Recuperado de <http://areasverdesyarboladourbano.com.mx/wp-content/publicaciones/Bosque-Urbano.pdf>
9. Benavides M., H. M. y D. Y. Fernández G. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques* 18 (2): 51-71. [Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec \(scielo.org.mx\)](https://doi.org/10.21666/mbyb-2012-0001)
10. Bourne, K. S., & Conway, T. M. (2014). The influence of land use type and municipal context on urban tree species diversity. *Urban Ecosystems*, 17(2), 329–348.

11. Bussotti, F., Potočić, N., Timmermann, V., Lehmann, M. M., & Pollastrini, M. (2024). Defoliación de copas de árboles en el monitoreo forestal: Conceptos, hallazgos y nuevas perspectivas para un abordaje fisiológico frente al cambio climático. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(2), 194-212.
<https://doi.org/10.1093/forestry/cpad066>
12. Campos Ruiz, R. T. (2004). Regeneración de *Pinus teocote* (Schiede & Deppe ex Schlechtendal & Chamiso) en el Ajusco medio, D.F. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
13. Castillo-Torres, Z. I. (1976) Algunos aspectos del impacto ambiental del Parque Nacional Cumbres del Ajusco México. [Tesis de licenciatura] Facultad de Ciencias UNAM.
14. Comisión Nacional Forestal. (2022). *Informe de resultados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2015-2020*. Gobierno de México.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/756127/Informe_Resultados_INFyS_2015-2020.pdf
15. CONABIO. 2022. *Quercus rugosa* Née [Archivo PDF]
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/31-fagac10m.pdf
16. CONAFOR. (2003). *Pinus leiophylla* Schl. & Cham [Archivo PDF].
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/967Pinus%20leiophylla.pdf>

17. Endreny, T. (2018). Strategically growing the urban forest will improve our world. *Nat Commun* **9**, 1160. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03622-0>
18. Escobedo, F. y Chacalo, A. (2008). Estimación preliminar de la descontaminación atmosférica por el arbolado urbano de la Ciudad de México. *Interciencia*, **33** (1), 29-33.
19. European Environment Agency. (2022). *Forest health*. European Forest Information System (FISE).
20. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2002). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000: Informe principal*. FAO. <https://www.fao.org/4/y2328s/y2328s00.htm#toc>
21. Gómez Ugalde, R. M. (2003). *Efectos de la contaminación atmosférica en poblaciones de pequeños roedores silvestres (Microtus mexicanus, Peromyscus melanotis y Peromyscus difficilis) en México, D. F.* (Tesis doctoral). Universitat de Barcelona.
22. Gonzáles-Medina, R. E., Mendoza-Briseño, M., & Alvarado-Rosales, D. (2010). Exposición a ozono en relación a la vitalidad en un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham). *Madera y Bosques*, **16**(4), 7–19.
23. González-Medina, R. E. (1998). *Evaluación de la salud forestal en dos áreas de regeneración natural de Pinus hartwegii* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Chapingo. Disponible en

<https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/f4c86b4d-3507-4c61-bcd5-22a33d8887f1>

24. Greene, C. S., Robinson, P. J., & Millward, A. A. (2018). Dosel de ventaja: ¿Quién se beneficia más de los árboles de la ciudad?. *Revista de gestión ambiental*, 208, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.015>
25. Greenpeace México. (2016). *El Gran Bosque de Agua*. Greenpeace México. camafu.org.mx
26. Grêt-Regamey, A., Celio, E., M. Klein, T. y Wissen, U. (2013). Understanding ecosystem services trade-offs with interactive procedural modeling for sustainable urban planning. 109(1). 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.011>
27. Groombridge B, Jenkins MD (2002) World atlas of biodiversity: earth's living resources in the 21st Century. University of California Press, Berkeley
28. Hernández, T.T, y L. I. Bauer. 1984. Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. moctezumae* var. *Lindleyi* en el Ajusco, D.F., *Agrociencia* 66: 71-82.
29. Innes, J. L. (1990). *The role of quality assurance in the assessment of forest condition in Europe*. En *Proceedings of the 3rd Quality Assurance Workshop* (pp. 99-112). Burlington, Ontario.

30. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2024, 11 de noviembre). *Inteligencia Artificial ante los desafíos en el manejo de los bosques*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/inteligencia-artificial-ante-los-desafios-en-el-manejo-de-los-bosques>
31. Jáuregui-Ostos, E. y Heres-Pulido, M. E. (2008). El clima/bioclima de un parque periurbano de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, 67, 102-112
32. Jiménez Escudero V. (2010). Diagnóstico ambiental del Parque Nacional Cumbres del Ajusco, en la delegación Tlalpan, Distrito Federal. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://research-ebSCO-com.pbidi.unam.mx:2443/linkprocessor/plink?id=7eb59a88-9907-3b0b-b7a6-0c218577c00f>
33. Johnston, M. (2010). Trees in towns II and the contribution of arboriculture. *Journal of Urban Forestry*, 33 (1), 27-41.
34. Krupa, S. V. (1999). *Polución, población y plantas*. Colegio de Postgraduados.
35. Landsberg, J. J., & Gower, S. T. (1997). *Physiological ecology of forest production: Principles, processes and models*. Academic Press.
36. Pecheron, N. (2010). *Problemas agrarios del Ajusco (1-)*. Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos. <https://doi.org/10.4000/books.cemca.3605>

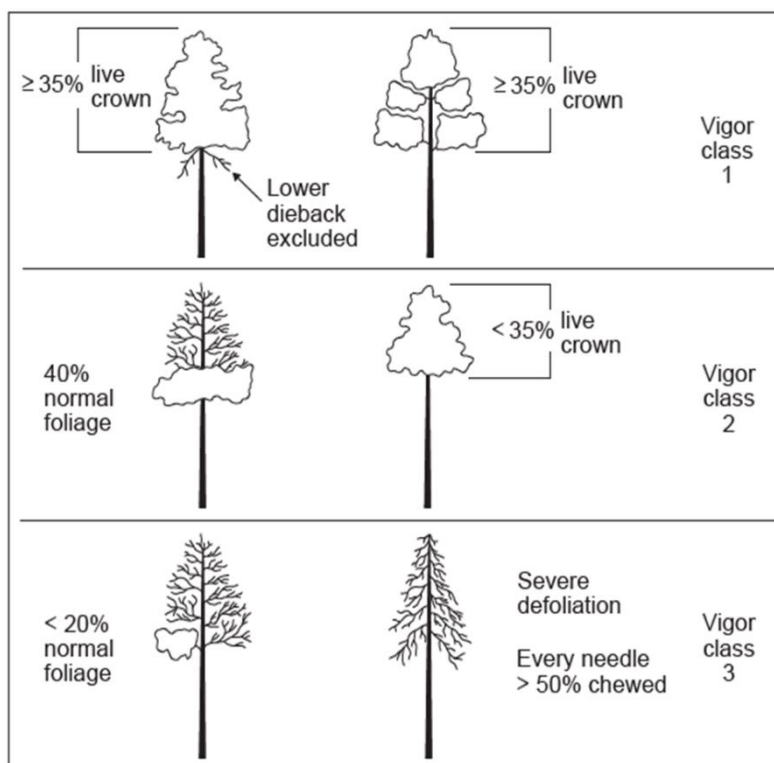
37. Pérez Suares M. (2000). Patrón de retención de copa como un reflejo del vigor del bosque de Oyamel (*Abies religiosa*) en relación con la contaminación atmosférica, en los Parques Nacionales Izta-Popo y El Chico. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
38. Programa Cooperativo Internacional (IPC) de Evaluación y Vigilancia de los Efectos de la Contaminación del Aire en los Bosques. (2006). *Métodos y criterios para el muestreo, evaluación, monitoreo y análisis armonizados de los efectos de la contaminación del aire en los bosques. Parte II: Evaluación visual del estado de la corona.* Bosques del PCI.
https://www.icpforests.org/pdf/manual/2000/Chapt2_compl06.pdf
39. Randolph, K. C., & Thompson, M. T. (2010). Descriptive statistics of tree crown condition in the United States Interior West (Gen. Tech. Rep. SRS-127). Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station.
40. Randolph, K. C., & Thompson, M. T. (2010). Descriptive statistics of tree crown condition in the United States Interior West (Gen. Tech. Rep. SRS-127). Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station.
Recuperado de https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr_srs127.pdf
41. Riitters, K., & Tkacz, B. (2004). The U.S. forest health monitoring program. En B. Wiersma (Ed.), *Environmental Monitoring* (pp. 669– 683). Boca Raton, FL: CRC Press.

42. Saavedra Díaz, Z. M., y Perevochtchikova, M. (2017). Evaluación ambiental integrada de áreas inscritas en el programa federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio: Ajusco, México. *Investigaciones Geográficas*, (93), 1-15. <https://doi.org/10.14350/rig.5643>
43. Saavedra-Romero L., Alvarado-Rosales D., Hernández-de la Rosa P., Martínez-Trinidad T., Mora-Aguilera G. y Villa-Castillo J. (2016). Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Madera y Bosques*. 22(2). 15-27 <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2221321>
44. Sánchez, A. (2023, abril 25). *El bosque de agua: Las amenazas en el centro de México*. Gatopardo. <https://www.gatopardo.com/articulos/el-bosque-de-agua-las-amenazas-en-el-centro-de-mexico>
45. Schomaker, M. E., Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A., Latelle, D. J., Burkman, W. G., & Cox, S. M. (2007). Crown condition classification: a guide to data collection and analysis (Gen, Tech. Rep. SRS-102). Ashville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. Recuperado de <https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/27730>
46. Schteingart, M. (1987). Expansión urbana, conflictos sociales y deterioro ambiental en la ciudad de México: El caso del Ajusco. *El Colegio de México*, 2(3), 449-477. <https://www.jstor.org/stable/40310378>

47. Schteingart, M. (1987). *Expansión urbana, conflictos sociales y deterioro ambiental en la ciudad de México: El caso del Ajusco*. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 2(3), 449-477.
48. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. (2007). *Forest resources of the United States, 2007*. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/17334>
49. Us Forest Service International Program. (2019). Adaptación del Programa I-Tree Eco A México. [Microsoft Word - iTree ECO Mex handout Davey.docx \(jalisco.gob.mx\)](#)
50. Vargas-Márquez, F. (1997). Parques nacionales de México y reservas equivalentes: pasado, presente y futuro. México. Instituto Nacional de Ecología.
51. Woodall C., Amacher M., Bechtold W., Coulston J., Jovan S., Perry C., Randolph K., Schulz B., Smith G., Tkacz B. y Will-Wolf S. (2010). Status and future of the forest health indicators program of the USA. *Environ Monit Assess.* 117. 419–436. 10.1007/s10661-010-1644-8.
52. Wyman, R. (1991). *Global climate change and life in earth*. New York: Chapman and Hall. <https://doi.org/10.1177/027046769301300177>

Anexos

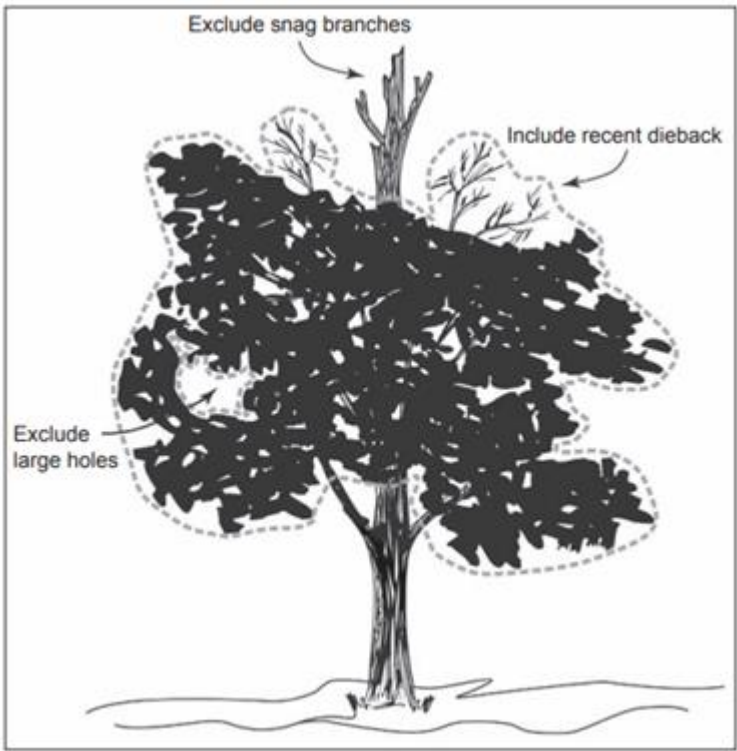
Anexo 1. Escala de medición para clase vigor propuesta por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Schomaker et al., 2007).



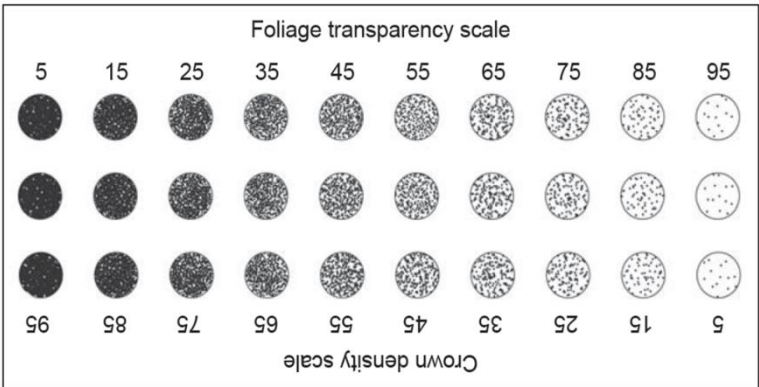
Anexo 2. De acuerdo con el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Schomaker et al., 2007), las escalas en la parte posterior de la tarjeta de transparencia de densidad se pueden usar para determinar la relación de copa viva y para ajustar las clasificaciones.

		Density of tree present										Scale to estimate live crown ratio
		5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	
Percent of tree missing	10	5	15	25	35	45	50	60	70	80	90	
	20	5	15	20	30	40	45	55	60	70	80	
	30	5	15	20	25	35	40	50	55	60	70	
	40	5	10	15	25	30	35	40	45	55	60	
	50	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
	60	5	10	10	15	20	25	30	30	35	40	
	70	5	5	10	15	15	20	20	25	30	30	
	80	5	5	5	10	10	15	15	15	20	20	
	90	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	
	99											

Anexo 3. Ejemplo de visualización de muerte regresiva, de acuerdo al Servicio Forestal de los Estados Unidos (Schomaker et al., 2007).



Anexo 4. Tarjeta de medición de transparencia propuesta por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Schomaker et al., 2007).



Anexo 5. Forma de tomar la medida de diámetro de corona (Schomaker et al., 2007).

