



ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE INFESTACIÓN POR MUÉRDAGOS (*Psittacanthus calyculatus* Y *Phoradendron brachystachyum*) CON MÉTODOS FOTOGRÁFICOS

ESTIMATION OF THE LEVEL OF INFESTATION BY MISTLETOES (*Psittacanthus calyculatus* AND *Phoradendron brachystachyum*) WITH PHOTOGRAPHIC METHODS

Humberto Suzán-Azpiri, Aurelio Guevara-Escobar, Oscar García-González, Mónica Queijeiro-Bolaños, Mónica Cervantes-Jiménez e Israel Carrillo-Ángeles*

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales, Querétaro, Querétaro, México.

*Autor de correspondencia (israel.carrillo@uaq.mx)

RESUMEN

Los muérdagos hemiparásitos *Psittacanthus calyculatus* y *Phoradendron brachystachyum* constituyen un problema fitosanitario creciente que infecta árboles y arbustos en áreas silvestres y urbanas, por lo que se requieren de métodos rápidos y eficientes para estimar la severidad de las infecciones. En este estudio se compararon dos métodos fotográficos para estimar la infestación en huizaches (*Vachellia schaffneri*) del área privada protegida Zibatá y del Parque Nacional el Cimatario (PANEC), ambos en el estado de Querétaro, México. El primer método consistió en fotografías tomadas con una cámara GoPro Hero 3+ Black colocada en un poste de extensión a 4.5 m (método CPE), y el segundo en fotografías tomadas desde vehículos aéreos no tripulados o drones (método VANT). La delimitación manual de los polígonos de la copa y de la fracción cubierta por muérdago se realizó diferenciando la textura y color del follaje del árbol y los muérdagos. La congruencia entre las estimaciones de la infección por muérdago que se hicieron con los dos métodos fotográficos fue medida con el coeficiente de correlación de concordancia (ρ_c). La comparación de ambos métodos en Zibatá indicó estimaciones muy similares del porcentaje del área de la copa del hospedero ocupada por muérdago (CPE 38.12 %; VANT 36.56 %) con $\rho_c = 0.96$, $IC_{95\%} = 0.905-0.980$ y $C_b = 0.992$. Ambos métodos resultaron útiles para la estimación de la infección de muérdagos. El método CPE es simple y más económico, pero el método VANT permite abarcar áreas mucho mayores en un menor tiempo; sin embargo, las restricciones para el uso de los drones deben ser tomadas en cuenta.

Palabras clave: drones, infección de árboles, muérdago, VANT.

SUMMARY

Hemiparasitic mistletoes *Psittacanthus calyculatus* and *Phoradendron brachystachyum* are a growing plant health problem that infect trees and shrubs in the wild and urban areas, so quick and efficient methods to estimate the infection severity are required. In this study two photographic methods for the estimation of mistletoe infection in huizache (*Vachellia schaffneri*) of the private protected area Zibatá and the Cimatario National Park (PANEC), both in the state of Queretaro, Mexico. The first method consisted in photographs obtained by a GoPro Hero 3+ Black camera attached to a 4.5 m extension pole (PEP method), and the second in photographs from unmanned aerial vehicles or drones (PUAV method). The polygons of treetops and the mistletoe covered fraction were manually delimited by differentiating the texture and color of the tree foliage from the mistletoe. The congruence between the estimates of mistletoe infection made with the two photographic methods was measured with the concordance correlation coefficient (ρ_c). Comparison

of both methods in Zibatá indicated very similar estimates of the percentage of host crown area occupied by mistletoe (PEP 38.12 %; PUAV 36.56 %), with $\rho_c = 0.96$, $IC_{95\%} = 0.905-0.980$ and $C_b = 0.992$. Both methods were useful for the estimation of mistletoe infection. The PEP method is simple and cheaper, but the PUAV method allows to cover much larger areas in short time periods; nevertheless, restrictions for the use of drones should be considered.

Index words: Drones, mistletoe, trees infection, PUAV.

INTRODUCCIÓN

En México se encuentran diversas especies de muérdago que pertenecen a las familias Loranthaceae y Viscaceae, donde destacan los géneros *Psittacanthus* y *Phoradendron*, respectivamente, los cuáles infectan varias especies de importancia forestal (Cibrián et al., 2007; Kuijt, 2003; Varo-Rodríguez et al., 2016; Vázquez-Collazo y Geils, 2002). La infección por muérdagos en árboles y arbustos en el bosque tropical caducifolio (BTC) se distingue como un problema creciente en la región central de México (Arce-Acosta et al., 2016). En el BTC del estado de Querétaro dos especies de muérdago están extensamente distribuidas: *Psittacanthus calyculatus* (DC.) G. Don (Loranthaceae) y *Phoradendron brachystachyum* (DC.) Nutt (Viscaceae) (Arce-Acosta et al., 2016; Queijeiro-Bolaños et al., 2020). Ambas especies se encuentran parasitando principalmente árboles y arbustos de la familia Fabaceae, frecuentemente mezquites [*Neltuma laevigata* (H.&B.) Johnst.] y huizaches [*Vachellia schaffneri* (L.) Willd], que son componentes importantes de la vegetación en el centro de México (Salas-Araiza et al., 2011).

La estimación del porcentaje de infestación por muérdago puede llegar a ser problemática e incorrecta (Queijeiro-Bolaños et al., 2014; Solís-Gracia y Suzán-Azpiri, 2014); por ejemplo, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010) describe un método para estimar el nivel de severidad de la infestación por muérdagos verdaderos basado en el porcentaje visual de área del dosel ocupado por el

parásito, el cual es cualitativo y altamente dependiente de la habilidad y posición del observador, ya que el muérdago se encuentra comúnmente en la parte superior del dosel.

El uso de los VANT ha sido implementado como un método para el monitoreo de la vegetación, principalmente para cuantificar su cobertura (Torres-Sánchez *et al.*, 2015), así como para obtener información sobre la fenología (Laiberte *et al.*, 2010), la distribución espacial (Anderson y Gaston, 2013) y el estado de salud de las plantas (Stone *et al.*, 2013), especialmente cuando el VANT es equipado con sensores remotos capaces de medir bandas multispectrales (Berni *et al.*, 2009); sin embargo, se requiere realizar un análisis colorimétrico donde se obtengan los valores de la banda RGB que puedan ser usados para la identificación de los muérdagos (León-Bañuelos *et al.*, 2019). Aunado a esto, el uso de VANT continúa siendo costoso e incluso algunas veces impráctico, en especial en áreas con acceso restringido a vehículos aéreos como son regiones cercanas a antenas de transmisión de microondas, aeropuertos o áreas naturales protegidas.

Un método alternativo al uso de un VANT es el de fijar una cámara portátil operada a control remoto a un poste de extensión (CPE) que tenga la suficiente altura para realizar tomas sobre la copa. Este método es más económico, pero su utilidad está limitada a la medición de características de la infestación en árboles individuales y particulares, y la practicidad de su aplicación se restringe a áreas relativamente pequeñas, lo cual representa una desventaja respecto al método VANT, que permite cubrir superficies mayores en poco tiempo, lo que resulta más adecuado para mediciones comunitarias. Ambos métodos fotográficos (VANT y CPE) hacen posible la obtención de imágenes cenitales de la parte superior de la copa de árboles (*i.e.*, el eje focal del lente de la cámara es perpendicular al plano horizontal de la copa), por lo que se espera obtener, con ambos métodos, porcentajes similares del área de la copa del hospedero que se encuentra infestada por muérdago.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) comparar dos métodos fotográficos, el primero utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y el segundo con ayuda de una cámara fotográfica portátil fija a un poste con extensión (CPE), para estimar el grado de infestación por muérdago *Psittacanthus calyculatus* parasitando a *Vachellia schaffneri* en un área privada protegida (Zibatá); 2) comparar el grado de infestación de *P. calyculatus* en *V. schaffneri* entre Zibatá y el Parque Nacional El Cimatario (PANEC); 3) comparar el grado de infestación de *P. calyculatus* con el de *Phoradendron brachystachyum* en el sitio PANEC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos sitios cercanos a la ciudad de Querétaro, México, el primero en el área de conservación privada del fraccionamiento Zibatá, y el segundo en el Parque Nacional El Cimatario (PANEC) (Figura 1). El sitio Zibatá está ubicado al noreste de la ciudad de Querétaro, donde se han mantenido parches de vegetación silvestre del tipo BTC y matorrales xerófitos de mediana altura dominados por huizache (*V. schaffneri*) y diversas especies de Fabaceae y Burseraceae (Arce-Acosta *et al.*, 2016). El muestreo se llevó a cabo en un fragmento de vegetación de aproximadamente 5 ha con coordenadas 20° 39' 40" N, 100° 21' 40" O a una altitud promedio de 1950 m s.n.m. El PANEC está ubicado en la parte sur de la ciudad de Querétaro dentro de los municipios de Querétaro, Huimilpan y Corregidora. El tipo de vegetación dentro del parque es representativa de zonas de BTC, arbustos, pastos inducidos y zonas reforestadas (García *et al.*, 2010). Los transectos llevados a cabo dentro del PANEC se encontraban dentro de las coordenadas 20° 32' 8.7" N, 100° 21' 51" W y 20° 32' 13.9" N, 100° 21' 45.9" O, a una altitud promedio de 2000 m s.n.m. En el PANEC se trabajó con transectos debido a que los individuos infestados son más abundantes a lo largo de algunas brechas.

En ambas localidades, *V. schaffneri* es el principal hospedero de *P. calyculatus*, y en PANEC también es el principal hospedero de *P. brachystachyum*, aunque ambos muérdagos infestan otras especies de la familia Fabaceae (Arce-Acosta *et al.*, 2016).

Estudio comparativo de los dos métodos fotográficos en Zibatá

En el sitio Zibatá se optó por trabajar a lo largo de un transecto debido a que los individuos infestados se encontraban dentro de una franja de vegetación remanente rodeada por un pastizal inducido. Se capturaron imágenes de 23 árboles de *V. schaffneri* localizados en un transecto de un 1 km de largo y 10 m de ancho en un parche de vegetación del BTC, a través de las metodologías CPE y VANT. Todos los árboles analizados en ese transecto estaban parasitados exclusivamente por *P. calyculatus*. A cada árbol se le midió el diámetro mayor de la copa para tener una longitud de referencia a fin de establecer la escala (*Analyze-set scale*) en las fotografías analizadas con el programa ImageJ 1.51j8.

En el método CPE se utilizó una cámara Gopro Hero 3+ Black unida de forma perpendicular a una barra móvil de metal y a un poste con extensión de 4.5 m (Figura 2A).

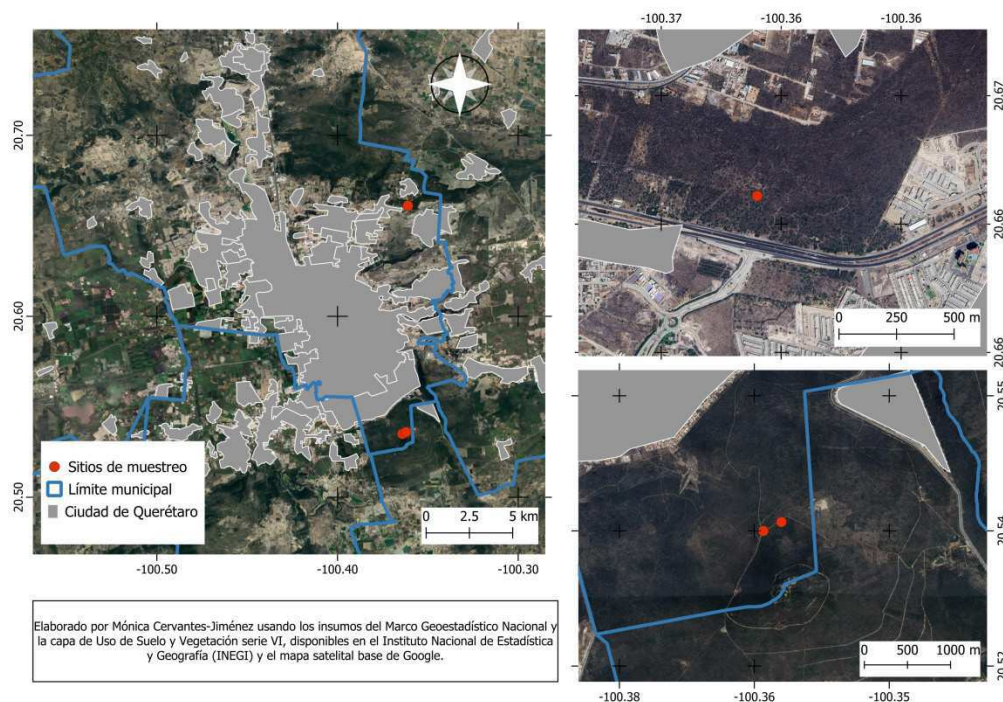


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio: área de conservación del fraccionamiento Zibatá (Sitio Zibatá: punto rojo en la parte superior del mapa a la izquierda, y en la ampliación en el mapa superior derecho) y Parque Nacional El Cimatario (Sitio PANEC: puntos rojos en la parte inferior del mapa a la izquierda, y en la ampliación en el mapa inferior derecho).

Para tomar la fotografía de la copa, el poste se posicionaba de manera paralela al eje longitudinal del fuste, y la barra móvil se recorría horizontalmente, de modo que el eje focal del lente se posicionara en forma perpendicular con el centro del plano horizontal de la copa (Figura 2A). La cámara se conectó inalámbricamente a través de Wi-Fi a una Tablet Apple mini 4, para la toma de fotografías, que fueron tomadas con la máxima resolución de la cámara (12 megapíxeles); la mayoría de las fotografías fueron tomadas a una altura de 4.5 m para que toda la copa quedara dentro del área de captura de la cámara, pero en algunos casos fue necesario elevar el poste entre 0.5 y 1 m más colocándolo sobre un soporte, para incluir la totalidad de la copa en el área de captura. Debido a que los árboles fueron variables en altura (aproximadamente entre 2 y 4 m), con base en las alturas de 10 individuos de *V. schaffneri* que fueron medidos en el PANEC para probar el método CPE previamente al estudio (intervalo: 2.41-4.03 m, $\bar{x} \pm D. E. = 3.10 \pm 5.18$ m), la distancia de la copa a la cámara fue variable. Todas las fotos fueron tomadas con la configuración predeterminada del campo de visión de la cámara (FOV ultra gran angular, resolución 12 megapíxeles).

Para el método VANT se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (VANT) DJI-Mavic Pro con cámara de 12

megapíxeles (Figura 2B). Para tomar la foto de la copa de cada árbol infestado con muérdago, el VANT se posicionó sobre el árbol a una altura de 50 m del suelo, de tal modo que el centro del campo de captura (y por lo tanto el eje focal del lente de la cámara) coincidiese aproximadamente con el centro del plano horizontal de la copa en forma perpendicular. Para posicionar el VANT con base en la imagen observada en la pantalla se ajustaba el tamaño aparente de la imagen con el acercamiento de la cámara, de modo que se asemejara al tamaño aparente de la imagen observada con el método CPE.

Las fotografías de los mismos árboles tomadas con ambos métodos fueron analizadas en el programa Image J 1.5lj8, con el que se obtuvo para cada hospedero el área total de copa y el área de la copa cubierta por muérdago (Figura 3). En cada método se capturó una foto por cada árbol y éstas no fueron ortorectificadas. La delimitación de los polígonos de la copa y de la fracción de la copa cubierta por muérdago se hizo manualmente en ImageJ 1.5lj8 con base en la diferencia aparente en la textura y coloración del follaje del árbol y de los muérdagos (Figura 3). Los datos se presentan en el Cuadro 1. Se usaron las siguientes condiciones para establecer la escala en las fotografías (*Analyze-set scale*): 1) distancia en píxeles: valor dado por la longitud de la línea que representa el diámetro de



Figura 2. Dispositivos utilizados para la toma de fotografías para estimar el área de infección en la copa de *Vachellia schaffneri* por el muérdago *Psittacanthus calyculatus*: A) cámara fotográfica fijada a un poste con extensión (método PEC), B) fotografía aérea usando un vehículo aéreo no tripulado (método VANT).

la copa usado como referencia en cada árbol, 2) distancia conocida: valor dado por la longitud (en m) del diámetro usado como referencia, 3) relación de aspecto de píxeles: 1.0, 4) Unidad de longitud: m, con Global desactivado debido a que la escala se estableció en cada fotografía de manera individual.

La concordancia entre los estimados de porcentaje de área de copas infectada con muérdago con ambos métodos fue obtenida con el coeficiente de correlación de concordancia (ρ_c) descrito por Lin (1989), el cual es calculado como:

$$\rho_c = 2\sigma_{12} / [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\mu_1 - \mu_2)^2] = \rho C_b$$

Donde: μ es el promedio de la población, σ^2 es su varianza, σ_{ij} es la covarianza entre las dos poblaciones, ρ es el

coeficiente de la correlación de Pearson que se obtiene de medir la desviación de las observaciones de la mejor línea de ajuste (precisión), y C_b mide la desviación de la mejor línea de ajuste respecto a la línea de 45° de concordancia (exactitud) que es calculada como:

$$C_b = [(v + 1/v + u^2)/2]^{-1}$$

$$v = \sigma_1 / \sigma_2; u = (\mu_1 - \mu_2) / (\sigma_1 \sigma_2)^{1/2}$$

Donde: v es la escala de cambio y u es el cambio de ubicación relativo a la escala. El coeficiente ρ_c tiene un valor de 1 si hay una perfecta correlación positiva y -1 para una perfecta correlación negativa. Un valor de 0 corresponde a la completa falta de correlación. Por otro lado, C_b toma valor de 1 si la mejor línea de ajuste no se desvía de la línea de 45° de concordancia (Lin, 1989). El modelo de la mejor

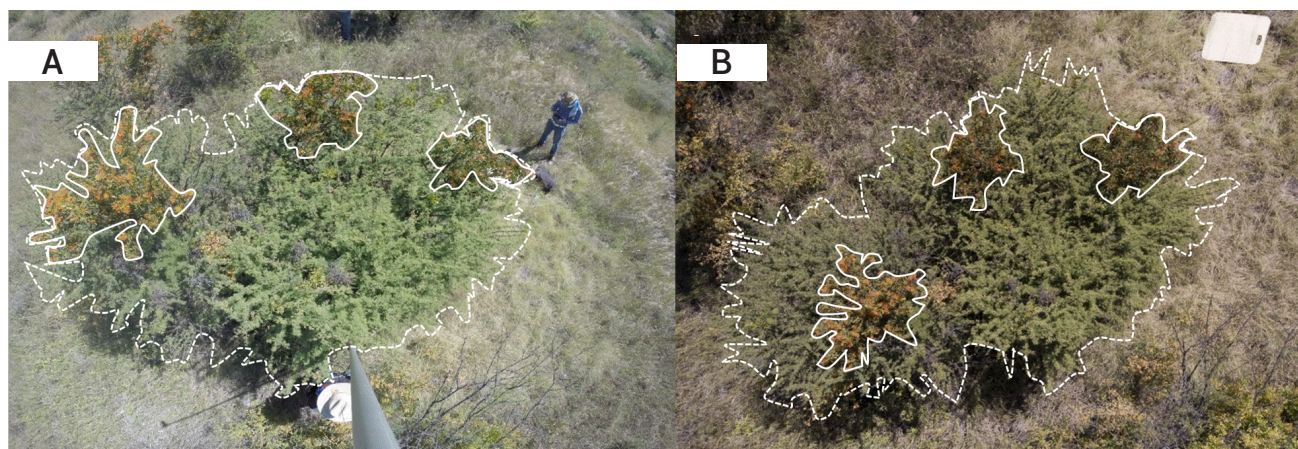


Figura 3. Comparación de imágenes tomadas con: A) cámara fotográfica fijada a un poste con extensión (método PEC) y B) fotografía aérea con el uso de un vehículo aéreo no tripulado (método VANT). Las imágenes corresponden al mismo individuo de *Vachellia schaffneri* y los nódulos del muérdago *Psittacanthus calyculatus* creciendo en la copa. El contorno con la línea blanca punteada indica el perímetro de la copa del árbol, y la línea blanca continua delimita el perímetro de los diversos nódulos de muérdago que fueron utilizados para calcular la proporción del área infectada en la copa.

Cuadro 1. Porcentajes de área infestada por dos especies de muérdago (*Phoradendron brachystachyum* y *Psittacanthus calyculatus*) producto de la relación con el área de la copa del hospedero (*Vachellia schaffneri*) y de área infestada determinada por métodos fotointerpretativos.

Sitio	Método	Especie	Área hospedero (m ²)	Área muérdago (m ²)	% Área infestada	No. Muérdagos
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	2.66	0.14	5.3	3
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	19.72	1.13	5.7	5
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	20.93	1.55	7.4	6
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	15.69	1.49	9.5	3
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	9.8	1.2	12.3	8
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	8.72	2.09	24	2
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	12.27	3.85	31.3	9
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	13.04	4.67	35.8	6
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	12.82	4.67	36.4	13
PANEC	CPE	<i>P. brachystachyum</i>	18.66	8.76	46.9	12
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	6.75	0.44	6.5	2
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	13.06	3.1	23.7	2
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	15.46	3.72	24	9
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	28.51	7.33	25.7	4
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	11.43	3.75	32.8	7
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	24.58	8.48	34.5	3
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	28.69	9.93	34.6	2
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	23.02	8.26	35.9	3
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	15.79	6.53	41.3	1
PANEC	CPE	<i>P. calyculatus</i>	21.65	11.25	52	3
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	70.1	2.64	3.77	5
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	83.91	5.31	6.32	3
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	6.14	0.95	15.41	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	4.46	0.75	16.7	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	15.55	2.64	17.01	2
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	11.78	2.28	19.35	2
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	2.76	0.57	20.57	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	73.25	15.18	20.73	6
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	4.62	1.05	22.82	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	6.23	1.8	28.89	2
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	13.93	4.66	33.45	2
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	4.23	1.49	35.33	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	2.98	1.27	42.53	1

Cuadro 1. Continuación.

Sitio	Método	Especie	Área hospedero (m²)	Área muérdago (m²)	% Área infestada	No. Muérdagos
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	62.11	27.56	44.37	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	6.01	2.99	49.8	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	4.64	2.34	50.4	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	5.19	2.88	55.52	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	8.82	4.95	56.08	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	5.25	3.09	58.83	3
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	5.61	3.34	59.55	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	3.63	2.2	60.52	2
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	7.1	5.7	80.37	1
Zibatá	CPE	<i>P. calyculatus</i>	10.02	8.07	80.55	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	60.704	3.52	5.8	5
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	79.452	6.947	8.74	3
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	7.051	1.16	16.45	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	6.873	1.153	16.78	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	3.143	0.586	18.64	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	16.649	3.23	19.4	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	3.207	0.662	20.64	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	14.212	2.96	20.83	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	77.412	17.476	22.58	6
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	5.705	1.713	30.03	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	4.459	1.389	31.15	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	79.129	26.526	33.52	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	2.24	0.8563	38.23	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	5.084	1.975	38.85	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	10.684	4.217	39.47	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	1.782	0.836	46.91	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	9.8	5.2	53.06	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	6.422	3.6722	57.18	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	4.783	2.81	58.75	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	11.793	7.049	59.77	2
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	5.032	3.074	61.09	1
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	4.637	2.899	62.52	3
Zibatá	VANT	<i>P. calyculatus</i>	9.541	7.693	80.63	1

línea de ajuste está dado por $Y = vX + u$ (en este estudio X representa a la variable VANT y Y a CPE). Los análisis fueron llevados a cabo con el paquete epiR (Stevenson et al., 2018) en R 3.5.1.

Estudio comparativo de los niveles de infestación entre el PANEC y Zibatá

En el PANEC se obtuvieron fotografías de 10 árboles parasitados en cada uno de dos transectos de 1 km. El primero de los transectos en áreas infestadas primordialmente por *P. calyculatus* y el segundo en áreas infestadas por *P. brachystachyum*. Las fotografías obtenidas con el método CPE fueron similares a las obtenidas en Zibatá, pero los intentos de obtener fotografías con un VANT resultaron en fracaso, pues dos instrumentos (un Phantom 4 con cámara de 12.4 megapíxeles 1080p y un MUVIX-drone) resultaron dañados debido a la interferencia causada por las antenas de telecomunicación instaladas en el sitio.

Para comparar los niveles de infestación entre el PANEC y Zibatá se consideraron únicamente los individuos parasitados por *P. calyculatus* fotografiados con el método CPE. El modelo estadístico utilizado fue de un análisis de covarianza (ANCOVA) del área infestada en cada individuo (en m²) y el área total de la copa (en m²) como covariable.

En el PANEC se compararon los niveles de infestación (% del área de la copa cubierta por el parásito) entre árboles parasitados con *P. calyculatus* y árboles parasitados por *P. brachystachyum* por medio de un ANCOVA, usando el área total de la copa (en m²) como covariable. Los ANCOVAs se realizaron en una rutina del paquete estadístico PAST (Hammer et al., 2021). Las especies de muérdago fueron diferenciadas mediante claves de identificación taxonómica (Kuijt, 2003; 2009). En la zona no se encontraron árboles de *V. schaffneri* infestados por ambas especies de muérdago.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación de métodos fotográficos en Zibatá

El índice de concordancia ρ_c fue alto entre las mediciones de copa infectadas con muérdago con VANT y CPE ($\rho_c = 0.957$, $IC_{95\%} = 0.905-0.980$, $C_b = 0.992$; Figura 4). El modelo con la mejor línea de ajuste fue $VANT = 0.909 \times CPE - 0.079$.

Se obtuvieron resultados similares con los métodos VANT y CPE en los valores de los porcentajes de áreas de copa infectadas por *P. calyculatus* (media y desviación estándar VANT: 35.511, 19.222; CPE 38.489, 21.484); sin embargo, hay ventajas y desventajas en el uso de estos métodos que necesitan ser consideradas. El método CPE resultó efectivo para estimar el nivel de infestación en árboles de tamaño medio (3 a 10 m), además de ser

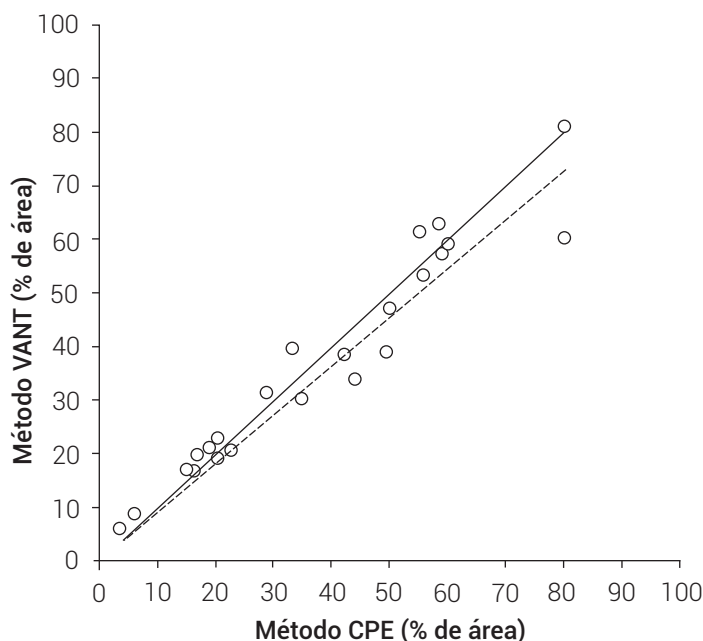


Figura 4. Concordancia entre los porcentajes estimados del área de la copa de los hospederos (*Vachellia schaffneri*) ocupada por muérdago (*Psittacanthus calyculatus*) con el método CPE y el método VANT. La línea continua representa la concordancia perfecta (confiabilidad) entre ambos métodos (línea de 45°) y la línea punteada la mejor línea de ajuste (precisión).

relativamente barato; sin embargo, el manejo de postes de más de 10 m de largo en campo puede ser difícil, lo que restringe el método a vegetación con árboles de mediana y baja altura.

El método VANT resultó más efectivo para abarcar un área de muestreo mayor en una sola fotografía, además de permitir el análisis del grado de infección en zonas de difícil acceso. En comparación con CPE, el método VANT se puede usar fácilmente en cualquier tipo de vegetación. Algunas desventajas del método VANT son el alto costo del equipo y las restricciones de vuelo en algunas zonas como el PANEC; por ejemplo, las reformas de 2017 a la ley civil de aviación de México agregan regulaciones para el uso de VANT, tales como el vuelo a distancias mayores de 9 km de aeropuertos y la prohibición de uso en lugares con más de 12 personas reunidas (SCT, 2019). Por otro lado, factores como la presencia de vientos fuertes y nubosidad, y las características del equipo mismo, como la duración de la batería y la interferencia causada por antenas de telecomunicación, representan restricciones adicionales al uso de esta tecnología (León-Bañuelos *et al.*, 2023).

Comparación de los niveles de infestación en el PANEC y Zibatá

No se encontraron diferencias significativas entre sitios al comparar el área infestada en las copas individuales de *V. schaffneri* por el muérdago *P. calyculatus* en el área protegida de Zibatá y el PANEC de acuerdo con el ANCOVA, con una P ($F = 1.035$, $1/30$ g.l., $n_{\text{PANEC}} = 10$, $n_{\text{Zibatá}} = 23$) = 0.132, indicando que los niveles de infestación son similares en la región y que el ajuste a la covariable indica que en ambos sitios el comportamiento de las áreas totales y afectadas es similar (Cuadro 2); esto puede explicarse por los mecanismos de dispersión del muérdago, a mayor área de cobertura de una especie hospedera habrá mayor incidencia y severidad de muérdago (Arce-Acosta *et al.*, 2016), siendo éste un patrón característico de toda la región.

Cuadro 2. Comparación de las áreas infestadas en las copas de *V. schaffneri* por el muérdago *P. calyculatus* desglosadas por sitio de estudio, tomando como covariable el área total de la copa individual. La prueba de F es de similitud de pendientes.

Sitio	Media	Media ajustada	Pendientes	F de pendientes	P
PANEC	6.2790	6.2081	0.39006	1.726	0.1992
Zibatá	4.5091	4.5399	0.13551		

Cuadro 3. Comparación de las áreas infestadas en las copas de *V. schaffneri* por los muérdagos *P. calyculatus* y *P. brachystachyum* tomando como covariable el área total de la copa individual. La prueba de F es de similitud de pendientes.

Especie	Media	Media ajustada	Pendientes	F de pendientes	P
<i>P. calyculatus</i>	6.279	5.4457	0.3901	1.996	0.1615
<i>P. brachystachyum</i>	2.955	3.7883	0.1529		

Por otro lado, en el PANEC dos especies de muérdago, *P. calyculatus* y *P. brachystachyum* se encuentran presentes infestando fundamentalmente individuos de *V. schaffneri*. Al analizar las diferencias en las áreas infestadas en la copa de los árboles no se encontraron diferencias significativas con el ANCOVA: P ($F = 2.142$, $1/17$ g.l., $n_{\text{Pcalyculatus}} = 10$, $n_{\text{Pbrachystachyum}} = 10$) = 0.165 (Cuadro 3). Cabe mencionar que en el área de estudio no se encontraron árboles infestados por ambos muérdagos. *P. calyculatus* es una especie ampliamente distribuida en el país y se ha reportado en hospederos diversos, ya sean de vegetación nativa o de área productivas (Arce-Acosta *et al.* 2016; Díaz *et al.*, 2016), mientras que *P. brachystachyum* se encuentra comúnmente asociado a leguminosas en BTC, matorrales xerófitos y vegetación secundaria (Kuijt, 2003; Rzedowski y Rzedowski, 2005); sin embargo, se reporta que, a pesar de su alta incidencia, no afectan significativamente las tasas fotosintéticas de los hospederos (Queijeiro-Bolaños *et al.*, 2020).

En el caso de *P. calyculatus*, el área de copa infectada y el número de muérdagos en la copa no mostraron correlación (PANEC: $P = 0.74$, Zibatá con CPE: $P = 0.09$ y Zibatá con VANT: $P = 0.14$), pero sí en el caso de *P. brachystachyum* ($r = 0.69$, $P = 0.02$), sugiriendo que la congruencia de los patrones mostrados por la estimación de la infestación mediante conteo de muérdagos y mediante la medición del área de copa infectada es dependiente de la manera en que las especies de muérdago crecen y colonizan la copa de sus hospederos.

A pesar de que la infección por muérdago se percibe como un problema creciente (Arce-Acosta *et al.*, 2016), hasta el momento no existen estimados de cambios temporales o espaciales en la intensidad de la infestación, por lo que se sugiere hacer estudios de monitoreo continuo utilizando métodos cuantitativos prácticos. Al respecto, es importante considerar que, a diferencia de los enfoques cualitativos empleados hace algunos años

(e.g., CONAFOR, 2010), los métodos actuales se basan en técnicas cuantitativas más avanzadas; sin embargo, dichas técnicas con frecuencia son poco accesibles para la generalidad de usuarios, debido entre otras cosas al costo del equipo y a la dificultad para manejar métodos sofisticados de análisis de imágenes. En este sentido, los métodos aquí presentados ofrecen opciones cuantitativas prácticas para monitorear los niveles de infestación por muérdagos y sus cambios en el hospedero a lo largo del tiempo, los cuales pueden ser aplicados por el usuario común, a la vez que pueden ser perfectibles con habilidad técnica adicional en aspectos como automatización del método de segmentación (diferenciación del muérdago y el follaje del hospedero), de tal modo que se pueda economizar el tiempo de análisis de imágenes y reducir la subjetividad asociada con la segmentación manual, que puede ser particularmente alta cuando el contraste entre el follaje del muérdago y el del hospedero no es claro para la delimitación manual de los polígonos.

CONCLUSIÓN

Se describen dos métodos fotográficos para calcular el porcentaje de área de copa infectada por dos especies de muérdago (*Psittacanthus calyculatus* y *Phoradendron brachystachyum*) en árboles de *Vachellia schaffneri*. Los métodos presentaron resultados similares en la estimación del grado de infección, por lo que el uso de VANT o CPE debe ser determinado por las ventajas y desventajas que presenta cada método y el tipo de ecosistema en que se aplique. Al comparar los niveles de infestación de *P. calyculatus* en las dos áreas no se encontraron diferencias significativas y tampoco diferencias en las proporciones de áreas infestadas en copas individuales por ambas especies de muérdagos.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto fue financiado por fondos FOFI de la Universidad Autónoma de Querétaro. Se agradece a Alberto Salazar-Barrios quien colaboró parcialmente como becario CONACYT.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson K. and K. J. Gaston (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11:138-146, <https://doi.org/10.1890/120150>
- Arce-Acosta I., H. Suzán-Azpíri and O. García-Rubio (2016) Biotic factors associated with the spatial distribution of the mistletoe *Psittacanthus calyculatus* in a tropical deciduous forest of central Mexico. *Botanical Sciences* 94:89-96, <https://doi.org/10.17129/botsci.263>
- Berni J. A. J., P. J. Zarco-Tejada, L. Suárez and E. Fereres (2009) Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47:722-738, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>
- Cibrián T. D., D. Alvarado R. y S. E. García D. (2007) Enfermedades Forestales en México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 587 p.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2010) Manual de Sanidad Forestal. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 75 p.
- Díaz I. S., C. Lara, M. C. Arizmendi, L. E. Eguarte and J. F. Ornelas (2016) Reproductive ecology and isolation of *Psittacanthus calyculatus* and *P. auriculatus* mistletoes (Loranthaceae). *PeerJ* 4:e2491, <https://doi.org/10.7717/peerj.2491>
- García G. P. L., P. Fontana, A. Equihua M., J. Sánchez E., J. Valdez C. y Z. Cano S. (2010) Diversidad y fenología de los ortópteros del Parque Nacional El Cimatario, Querétaro. *Southwestern Entomologist* 35:317-329, <https://doi.org/10.3958/059.035.0311>
- Hammer Ø., D. A. T. Harper and P. D. Ryan (2001) Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4:1-9.
- Kuijt J. (2003) Monograph of *Phoradendron* (Viscaceae). Vol. 66 of Systematic Botany Monographs. American Society of Plant Taxonomists. Laramie, Wyoming, USA. 643 p, <https://doi.org/10.2307/25011253>
- Kuijt J. (2009) Monograph of *Psittacanthus* (Loranthaceae). Vol. 86 of Systematic Botany Monographs. American Society of Plant Taxonomists. Laramie, Wyoming, USA. 361 p.
- Laiberte A. S., J. E. Herrick, A. Rango and C. Winters (2010) Acquisition, orthorectification, and object-based classification of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for rangeland monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76:661-672, <https://doi.org/10.14358/PERS.76.6.661>
- León-Bañuelos L. A., A. R. Endara-Agramont, W. Gómez-Demetrio, C.G. Martínez-García and E. G. Nava-Bernal (2019) Identification of *Arceuthobium globosum* using unmanned aerial vehicles images in a high mountain forest of central Mexico. *Journal of Forestry Research* 31:1759-1771, <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00954-5>
- León-Bañuelos L.A., A. R. Endara-Agramont, E. G. Nava-Bernal and W. Gómez-Demetrio (2023) Use of unmanned aerial vehicles for the diagnosis of parasitic plant infestation at the crown level in *Pinus hartwegii*. *iForest Biogeosciences and Forestry* 16:282-289, <https://doi.org/10.3832/ifor4002-016>
- Lin L. I. K. (1989) A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics* 45:255-268, <https://doi.org/10.2307/2532051>
- Queijeiro-Bolaños M., Z. Cano-Santana y G. García-Guzmán (2014) Incidence, severity and aggregation patterns of two sympatric dwarf mistletoe species (*Arceuthobium* spp.) in Central Mexico. *European Journal of Forest Research* 133:297-306, <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0762-6>
- Queijeiro-Bolaños M. E., G. X. Malda-Barrera, I. G. Carrillo-Angeles and H. Suzán-Azpíri (2020) Contrasting gas exchange effects on the interactions of two mistletoe species and their host *Acacia schaffneri*. *Journal of Arid Environments* 173:104041, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104041>
- Rzedowski G. C. y J. Rzedowski (2005) Flora Fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología A. C., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México. 975 p.
- Salas-Araiza M. D., R. W. Jones and R. Ramírez-Malagón (2011) Herbivores of *Psittacanthus calyculatus* Don. (Loranthaceae) in Mexico: a parasitic plant of mesquite. *Southwestern Entomologist* 36:107-110, <https://doi.org/10.3958/059.036.0111>
- Solís-Gracia V. y H. Suzán-Azpíri (2014) Análisis de la distribución espacial del muérdago (*Phoradendron californicum*) en el sur del Desierto Sonorense. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 59:11-29.
- Stevenson M., T. Nunes, C. H. J. Marshall, J. Sanchez, R. Thornton, J. Reiczig, ... and A. Rabiee (2018) epiR: Tools for the Analysis of Epidemiological Data. R package version 0.9-97. The University of Melbourne. Melbourne, Australia. <https://rdrr.io/cran/epiR/> (January 2024).
- Stone C., A. Carnegie, G. Melville, D. Smith and M. Nagel (2013) Aerial mapping canopy damage by the aphid *Essigella californica* in a *Pinus radiata* plantation in southern New South Wales: what

- are the challenges? *Australian Forestry* 76:101-109, <https://doi.org/10.1080/00049158.2013.799055>
- SCT, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2019) NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. Diario Oficial de la Federación, Edición 14 de noviembre de 2017. Ciudad de México, México.
- Torres-Sánchez J., F. López-Granados, N. Serrano, O. Arquero and J. M. Peña (2015) High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. *PLoS ONE* 10:e0130479, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>
- Varo-Rodríguez R., V. Ávila-Akerberg y J. Gheno-Heredia (2016) Caracterización de infestación por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* subsp. *grandicaule*) en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cara sur del Pico de Orizaba. *Teoría y Praxis* 19:11-31, <https://doi.org/10.22403/UQROOMX/TYP19/01>
- Vázquez-Collazo I. and B. W. Geils (2002) *Psittacanthus* in Mexico. In: Mistletoes of North American Conifers. B. W. Geils, J. Cibrian-Tovar and B. Moody (coords.). Gen. Tech. RMRS-GTR-98. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Ogden, Utah, USA. pp:9-17.