

TRABAJO CIENTÍFICO

Uso de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) como método de monitoreo de la sanidad forestal en plantaciones de coníferas en Patagonia Norte, Argentina

Using an Unmanned Air Vehicle (UAV) as a forest health monitoring method in coniferous plantations in Northern Patagonia, Argentina.

González Musso R. F.¹; A. L. Rabino¹ y F. Azzaro^{1,2}

Recibido en junio de 2020; aceptado en septiembre de 2020

RESUMEN

Las plantaciones forestales proveen múltiples beneficios económicos, sociales y ambientales pero su rendimiento puede verse amenazado por la aparición de plagas. Contar con métodos eficientes de monitoreo es de importancia para implementar mecanismos de control y seguimiento. En los últimos años los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) han posibilitado la adquisición de información de gran resolución espacio - temporal para el estudio de procesos ecológicos y forestales. Sus características únicas los convierten en potenciales herramientas de monitoreo sanitario en plantaciones forestales. A pesar de ello, en Argentina existen pocas experiencias documentadas sobre su aplicación en el monitoreo de plagas. En este trabajo se analizó el uso de un VANT como método de monitoreo y cuantificación del daño ocasionado por *Sirex noctilio* en forestaciones de coníferas. Particularmente se evaluó la capacidad de estimar los niveles de infestación y de generar productos cartográficos que contribuyan al análisis de la dinámica poblacional de la plaga. Las estimaciones logradas con el VANT fueron comparadas con los métodos de campo utilizados habitualmente en la región. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios: el VANT permitió identificar a escala de árbol la sintomatología y cuantificar los niveles de daño. Las estimaciones mostraron una tendencia a subestimar en forma sesgada y con valores aceptables. Asimismo, se obtuvieron productos espacialmente explícitos sobre la distribución de la plaga, permitiendo localizar pequeños focos o incluso individuos aislados sobre la superficie relevada. Los resultados de este trabajo sugieren que los VANTs pueden contribuir en generar mejores estrategias de manejo y control de plagas forestales en la región.

Palabras clave: VANT, Sanidad forestal, Plantaciones forestales, *Sirex noctilio*, Patagonia Argentina

ABSTRACT

Forest plantations provide a wide range of economic, social and environmental benefits in many parts of the world but their productivity could be affected by the presence of pests. Counting on efficient monitoring and surveying methods is important to help controlling and mitigating impacts caused by pathogens. Last years, Unmanned Air Vehicles (UAVs), commonly known as drones, have made it possible obtaining high space-time resolution information for studying ecological and forest processes. They have become potential tools for forest health studies due to their unique features. However, there is little knowledge about its performance concerning forest health monitoring in Argentina. This study analyzed the potential use of UAVs for forest health monitoring and damage estimation in coniferous plantation stands including *Sirex noctilio*. Particularly, the capacity for quantifying infestation levels and mapping distribution was tested. The UAVs estimations were compared to those obtained from traditional field survey methods used in this region. The results were satisfactory and promising. UAVs allowed to detect symptomatology at tree level and quantify infestation. Estimates showed a tendency to underestimate in a sly manner and with acceptable values, which could be statistically adjustable in the future. In addition, spatially explicit products were generated upon plague distribution which allowed for the detection of small infection spots and of isolated trees with visible symptoms. The results of this study suggest that UAVs may become key instruments for health surveying that contribute to efficient management and control of forest pests and diseases in Patagonia.

Key-words: UAV, Forest health, Forest plantations, *Sirex noctilio*, Argentine Patagonia.

1 Universidad Nacional del Comahue (UNCo). Asentamiento Universitario San Martín de los Andes (AUSMA). Pasaje de la Paz 235, San Martín de los Andes (8370), Neuquén, Argentina. E-mail: romina.gonzalez@ausma.uncoma.edu.ar.

2 Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). Centro Regional Patagonia Norte. Oficina de Protección Vegetal San Martín de los Andes. Cuesta Eduardo Arias 1149, San Martín de los Andes (8370), Neuquén, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales proveen múltiples beneficios económicos, sociales y ambientales, representando una alternativa sustentable para cubrir la demanda de madera alrededor del mundo (Yao *et al.*, 2014). Sin embargo su rendimiento puede verse amenazado por la aparición de factores bióticos, principalmente si los cultivos forestales están compuestos por una sola especie (Dash *et al.*, 2018). Es por ello que el desarrollo de métodos de detección temprana, monitoreo y cuantificación de daños resulta muy importante para contener la aparición de plagas, determinar su dinámica poblacional e implementar acciones de control (Näsi *et al.*, 2018). Generalmente, los muestreos y censos de campo sanitarios llevan mucho tiempo de realización y los costos operativos son muy altos. En consecuencia, se ha estudiado la aplicación de Sensores Remotos para la detección y cuantificación de plagas forestales como alternativa a los muestreos de campo tradicionales (Stone y Mohammed, 2017). Aun así, muchas veces la escala espacial en la que se manifiesta la sintomatología, tanto a nivel de árbol individual como a escala de rodal, hace que el uso de satélites de mediana y baja resolución espacial no resulten del todo eficaces (Dash *et al.*, 2017).

En los últimos años los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), conocidos comúnmente como drones, han brindado oportunidades únicas de obtención de datos de gran resolución espacio-temporal para el estudio de procesos ecológicos (Anderson y Gaston, 2013). El uso de esta tecnología en las ciencias forestales ha ido en notable aumento debido a su flexibilidad, bajos costos operativos, la alta resolución espacial y la capacidad de controlar la adquisición temporal de la información (Tang y Shao, 2015). Entre las aplicaciones estudiadas en distintos tipos de bosques, se puede destacar el uso de VANTs en la identificación de especies a escala de individuo (Baena *et al.*, 2017), estimación la cobertura vegetal (Wu *et al.*, 2019), caracterización de la estructura (González Musso *et al.*, 2020), realización inventarios forestales (Goodbody *et al.*, 2019), entre otras (Torresan *et al.*, 2017). En lo que respecta a la sanidad forestal, se han reportado muy buenos resultados en evaluaciones sanitarias y cuantificación de los daños generados por plagas utilizando VANTs (Dash *et al.*, 2018, Brovkina *et al.*, 2018) y el potencial de esta tecnología para generar información de alta resolución espacial y temporal, en tiempo real, para evaluar la salud de los cultivos (Sankaran *et al.*, 2019).

En la Patagonia Argentina existen 109.200 hectáreas de plantaciones forestales, distribuidas en las Provincias de Río Negro, Chubut y Neuquén (CIEFAP y MAGyP, 2017). El 94 % de éstas forestaciones están compuestas por especies del género *Pinus spp.*, siendo el Pino Ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson) y el Pino Murrayana (*Pinus contorta* Douglas var. murrayana) las especies más plantadas. *Sirex noctilio* (Hymenoptera, Siricidae), conocida vulgarmente como Avispa Barrenadora de los Pinos, se ha convertido en el principal problema sanitario de las forestaciones del género *Pinus spp.* en Argentina (Gómez *et al.*, 2013). En la región Patagónica fue detectada a principios de la década del '90 (Klasmer *et al.*, 2000) y en pocos años ha logrado avanzar geográficamente provocando significativos estallidos poblacionales (Villacide & Corley, 2012). Diversos estudios han probado la eficacia de mecanismos de control con agentes biológicos, así como la aplicación de prácticas silviculturales que permiten reducir el riesgo de infección por *S. noctilio* (Corley *et al.*, 2014). Aún así, para la eficiente ejecución de un plan de manejo y control de esta plaga es necesario contar con métodos precisos de detección temprana, cuantificación y monitoreo (Villacide *et al.*, 2014). Los muestreos secuenciales y los censos de poblaciones han sido los métodos de campo más utilizados para evaluar los niveles de infestación por *S. noctilio* (Villacide *et al.*, 2004). Sin embargo, éstos suelen ser costosos desde el punto de vista logístico, los resultados pueden ser variables y en algunos casos poco precisos debido a la distribución espacial de la plaga y la extensión de superficie a relevar (Corley y Villacide, 2005). Los VANTs podrían brindar soluciones en este aspecto, teniendo en cuenta además que la sintomatología característica ocasionada por *S. noctilio* (decoloración y clorosis del follaje) sería visible con técnicas de percepción remota (Riyad *et al.*, 2008). A pesar de ello, poco se ha estudiado sobre el desempeño de métodos aéreos de evaluación sanitaria en plantaciones de coníferas afectadas por esta plaga en Argentina (Corley *et al.*, 2018) y no existen

antecedentes documentados en la región de la aplicación de VANTs como método alternativo y/o complementario a los relevamientos de campo tradicionales.

En este trabajo se puso a prueba el uso de un VANT comercial como método de monitoreo y prospección de la sanidad en plantaciones de coníferas con presencia de *S. noctilio*. Particularmente se analizó: 1) su capacidad de estimar y cuantificar los niveles de infestación en comparación con métodos tradicionales de muestreo de campo y 2) el potencial de generar información geográficamente explícita sobre el patrón de distribución de la plaga.

2. MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionaron rodales con distintos niveles de infestación por *S. noctilio* ubicados en campos forestales de la zona Andina de la Provincia de Neuquén (Figura 1). El primer sitio se ubica en el paraje conocido como Poi Pucón ($39^{\circ} 14' 52''$ S, $70^{\circ} 58' 36''$ O), cercano a la localidad de Aluminé. El segundo sitio se encuentra en el Campo Forestal Los Llanos ($36^{\circ} 53' 19''$ S, $70^{\circ} 50' 19''$ O) de la Corporación Forestal Neuquina (CORFONE), próximo a la localidad de Las Ovejas. La selección de los rodales se realizó considerando que los mismos presentaran distintas intensidades de infestación para captar mayor variabilidad de situaciones.

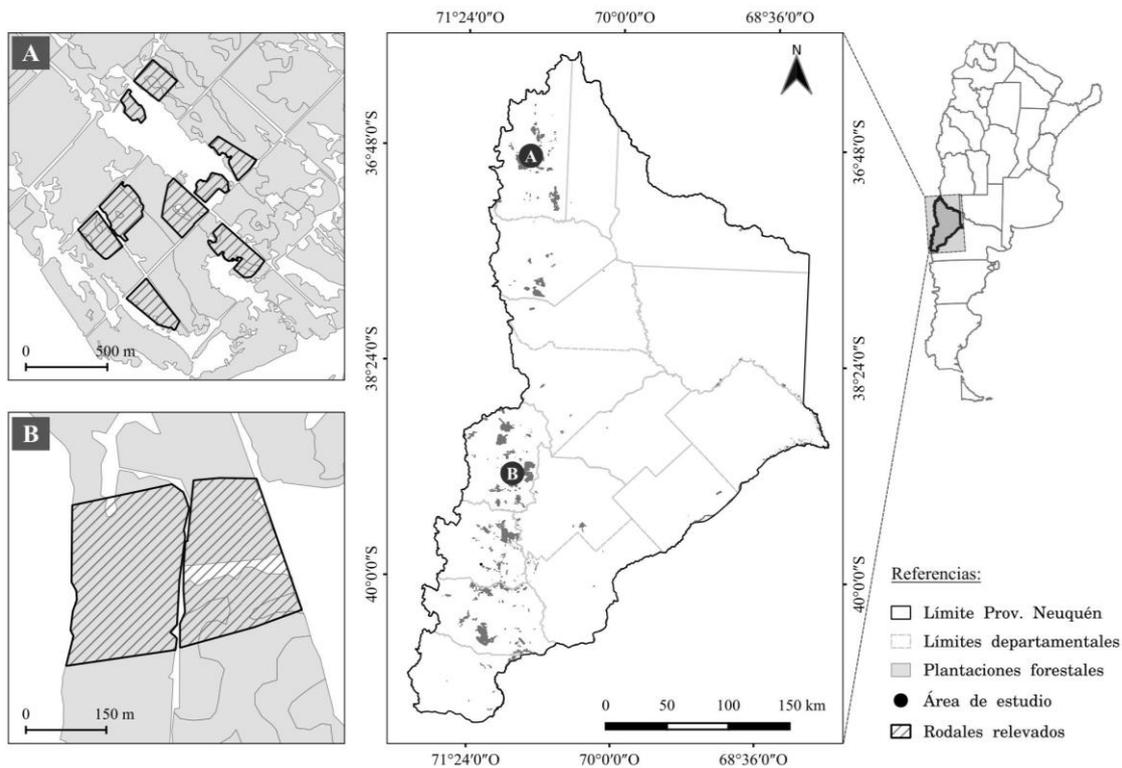


Figura 1. Ubicación general de los sitios de muestreo en la Provincia de Neuquén. Rodales relevados con el VANT en el Campo Forestal Los Llanos (A) y en el paraje Poi Pucón (B).

Adquisición de imágenes

Para la adquisición de fotografías aéreas se utilizó un VANT comercial de tipo cuadricóptero marca DJI, modelo Phantom 4 Advance (DJI, Shenzhen, China). Entre sus características técnicas

se destacan la autonomía de vuelo (≈ 30 minutos) y su cámara integrada RGB de 20 megapíxeles. La misma cuenta con diafragma mecánico (*mechanical shutter*) y un rango de apertura ajustable que resulta en una distancia focal equivalente de 24 mm. Las misiones de vuelo fueron programadas en gabinete utilizando el software Drone Deploy (<https://www.dronedeploy.com>) sobre los rodales previamente seleccionados. Se estableció un solapamiento frontal y lateral entre 70 % y 80 %, una altura de vuelo de 110 metros sobre el punto de despegue y una velocidad promedio de desplazamiento de 10 m/s. En total se relevaron 11 rodales y se obtuvieron 1105 fotografías cubriendo una superficie total de 75 hectáreas. La operación de vuelo se realizó en función a la normativa y regulación vigente en Argentina.

Muestreos y censos de campo

En cada uno de los sitios relevados con el VANT se establecieron parcelas de muestreo circulares de tamaño variable (300 m^2 ó 500 m^2) en función a la densidad del rodal. Se registró el número de árboles presentes dentro de la misma y se los clasificó en cuatro categorías: sanos, cloróticos (con decoloración típica del follaje), muertos en pie (individuos con defoliación avanzada o sin acículas) y enfermos verdes (árboles sin evidencia de síntomas en el follaje pero con presencia de orificios de emergencia o intensa resinación visible en la corteza). Los datos de las parcelas, tanto el número de árboles como la clasificación de estado sanitario, fueron registrados utilizando un dispositivo móvil y un formulario electrónico para la carga de datos. En los rodales donde se observaron bajos niveles de infestación, las parcelas fueron complementadas con censos de población completa para captar con mayor precisión la totalidad de los árboles infestados. Los censos consistieron en el barrido de todo el rodal pie a pie por parte de los operarios contabilizando y registrando todos los ejemplares con las características mencionadas en el muestreo por parcelas. Con los datos de las parcelas de muestreo se determinó la densidad del rodal (N), expresada en número de plantas por hectárea (arb. ha^{-1}). Asimismo, la clasificación de estado sanitario de los árboles tanto de las parcelas como los censos fueron utilizados para estimar el número de árboles infestados por Sirex (N-Sx). El nivel de infestación de cada rodal se calculó como una proporción entre los árboles infestados (N-Sx) por sobre la totalidad de los árboles del rodal (N) (Figura 2).

Procesamiento y análisis espacial

Las fotografías fueron procesadas mediante fotogrametría digital utilizando el software OpenDroneMap (<https://www.opendronemap.org/>). El procesamiento fotogramétrico consiste en alinear las imágenes obtenidas con el VANT para generar una reconstrucción tridimensional (3D) del terreno y los objetos a través de una serie de algoritmos conocidos como *Structure From Motion* (SfM) (Frey et al. 2018). Como resultado de este proceso se obtuvieron productos georreferenciados de alta resolución espacial: ortomosaico RGB, un Modelo Digital de Superficie (DSM) y una Nube de Puntos 3D.

Los ortomosaicos RGB fueron incorporados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para detectar la sintomatología visible ocasionada por *S. noctilio*. Se utilizó el software QGIS (QGIS Development Team 2020) para la identificación y mapeo de los árboles, el cual fue realizado en forma manual por interpretación visual. Se obtuvieron coberturas vectoriales de puntos representando los árboles infestados. Se determinó la proporción de infestación teniendo en cuenta la superficie de cada uno de los rodales, el conteo de los árboles con síntomas a partir de la digitalización vectorial y la densidad (N) calculada a partir de las parcelas de campo (Figura 2).

A partir de la cobertura de árboles con síntomas se generaron mapas de densidad, también conocidos como mapas de calor o mapas de intensidad. Entre los métodos de interpolación utilizados para la construcción de estos mapas, uno de los más utilizados para analizar patrones de puntos en contextos epidemiológicos es la Estimación de Densidad de Kernel (Gatrell et al., 1996). El mismo cuantifica el número de casos o eventos de interés por unidad de superficie a partir de definir una ventana móvil de búsqueda denominada ancho de banda o radio de búsqueda.

En este trabajo se elaboraron mapas de densidad utilizando la estimación de Densidad de Kernel con tres radios de búsqueda (10, 30 y 50 metros) para contrastar las estimaciones y explorar la mejor representación del patrón de infestación. Se utilizó el paquete Spatstat (Baddeley *et al.*, 2015), específico para el análisis de patrones de puntos, en el software R (R Core Team, 2020). Como resultado se obtuvo una representación espacial continua de los árboles infestados, mostrando los patrones de distribución de la plaga y la intensidad en la que se manifiesta en cada rodal.

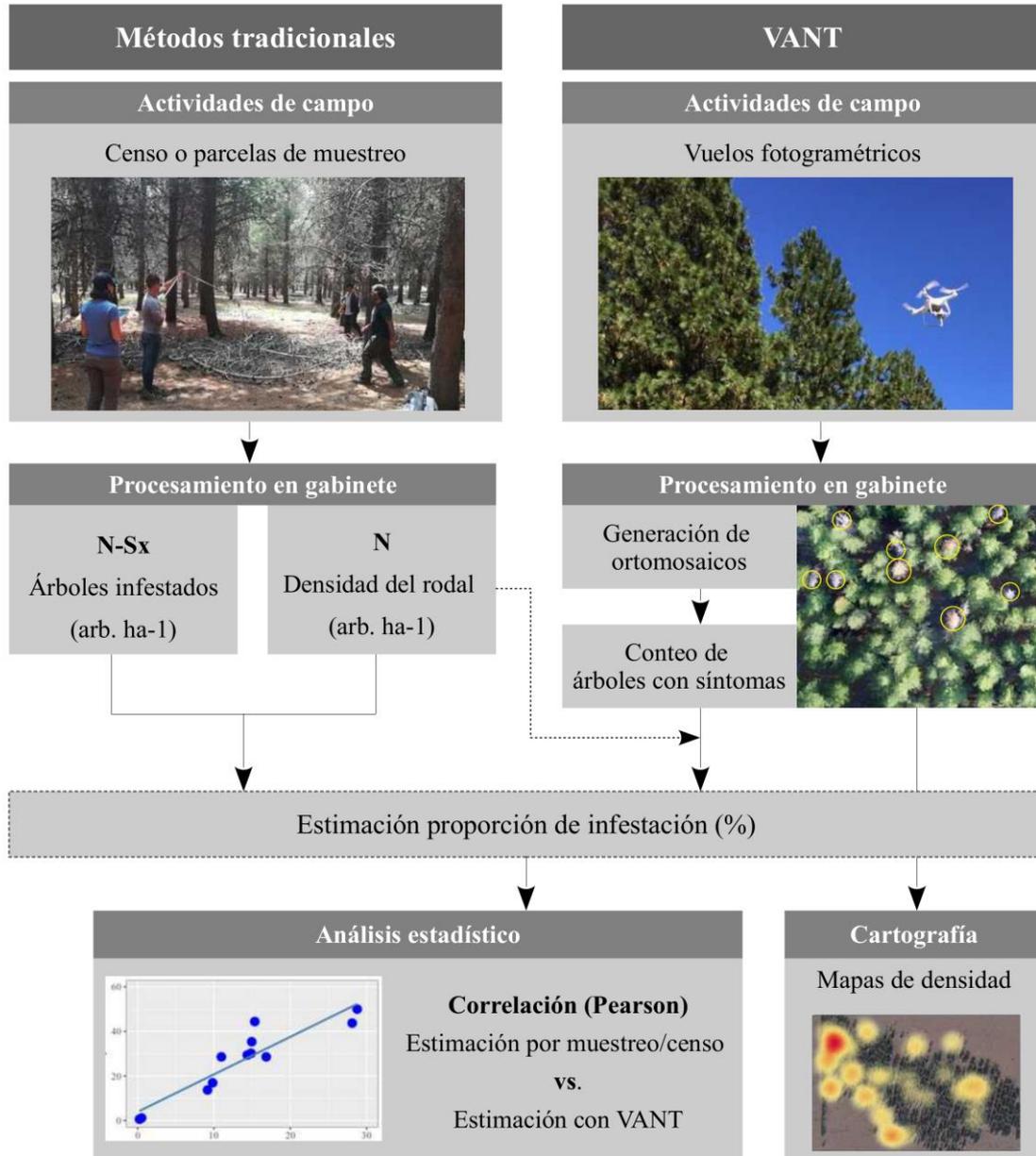


Figura 2. Resumen del flujo metodológico desarrollado, incluyendo las actividades de campo y de procesamiento en gabinete.

Análisis estadístico

Se evaluó la relación entre la proporción de infestación calculada por métodos de campo y lo detectado a partir del VANT. Se realizó un análisis de correlación para determinar el grado de asociación y el nivel de significancia entre las estimaciones logradas con ambos métodos (Figura 2). Se calculó el Coeficiente de Correlación de Pearson de acuerdo al cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las variables. El análisis estadístico fue realizado utilizando el software R.

3. RESULTADOS

Estimación de proporción de infestación

Los ortomosaicos de alta resolución espacial ($\approx 2,5$ cm/píxel) permitieron identificar los árboles con síntomas de infestación. Se pudo discriminar claramente entre árboles sanos, cloróticos y muertos en pie. Los árboles con síntomas ocasionados por la plaga fueron individualizados y asignados a la superficie del rodal para estimar la proporción de infestación (Figura 3).

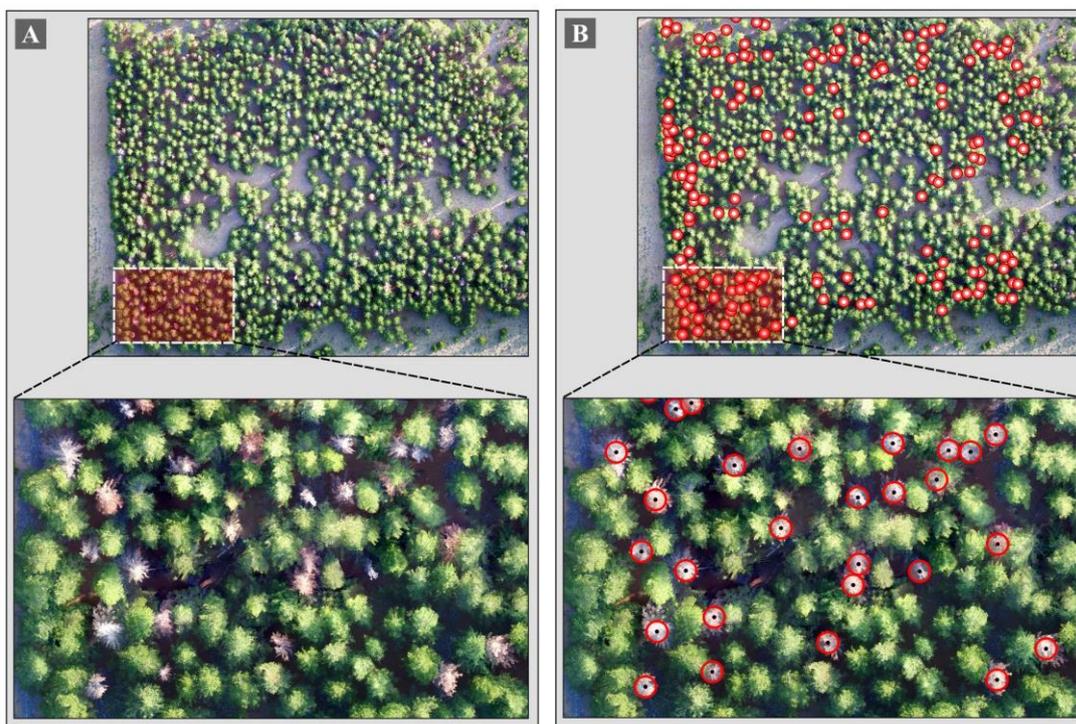


Figura 3. Ejemplo de uno de los ortomosaicos generados con el VANT. **A)** Árboles con síntomas, tanto cloróticos como muertos en pie. **B)** Cobertura vectorial (puntos) de la identificación y mapeo manual de los árboles sintomáticos.

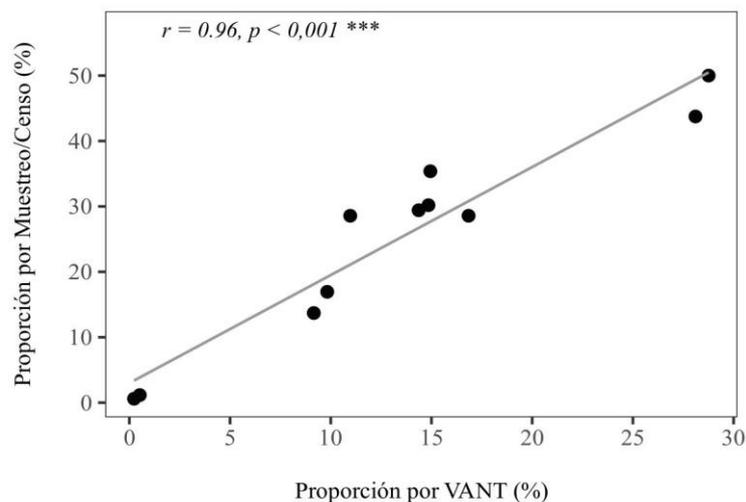
Los niveles de infestación variaron entre 0,6 % y 50 % de acuerdo a lo calculado a partir de los métodos de campo. En todos los casos las estimaciones realizadas con el VANT subestimaron y el rango fue de 0,2 % a 28,8 %. Se observa un sesgo consistente negativo (la estimación con el VANT siempre es menor) y la diferencia entre los métodos resulta precisa y aceptable (12 % en promedio) (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados comparativos de la estimación de la proporción de infestación obtenida por los métodos de relevamiento de campo tradicionales y con el VANT.

Sitio	Método	Estimación de campo			Estimación VANT		Diferencia
		N (arb. ha-1)	N-Sx (arb. ha-1)	Proporción (%)	N-Sx (arb. ha-1)	Proporción (%)	%
1	Parcelas	455	130	28,6	77	16,8	11,7 (-)
2	Parcelas	518	183	35,4	77	14,9	20,4 (-)
3	Parcelas	524	89	16,9	51	9,8	7,1 (-)
4	Parcelas	882	266	30,2	131	14,8	15,3 (-)
5	Parcelas	599	300	50,0	172	28,8	21,2 (-)
6	Parcelas	425	125	29,4	61	14,4	15,0 (-)
7	Parcelas	621	177	28,6	68	11,0	17,6 (-)
8	Parcelas	480	210	43,8	135	28,1	15,6 (-)
9	Parcelas	486	67	13,7	45	9,2	4,5 (-)
10	Censo	425	5	1,2	2	0,5	0,6 (-)
11	Censo	1194	7	0,6	3	0,2	0,4 (-)
Promedio							11,8 %

N: número total de plantas por hectárea; N-Sx: número de plantas infestadas y/o con síntomas por hectárea.

De acuerdo al análisis estadístico, existe una alta correlación lineal positiva entre la proporción de infestación estimada por los métodos tradicionales de monitoreo (muestreo y censo) y lo detectado por el VANT (Figura 4). El Coeficiente de Correlación de Pearson (r) fue de 0,96 con un alto nivel de significancia ($p < 0,001$).

**Figura 4.** Diagrama de dispersión de la correlación entre la proporción de infestación detectada con el VANT versus lo estimado mediante métodos tradicionales (censo y parcelas de muestreo).

Mapas de densidad

Se obtuvieron mapas de densidad de todos los rodales. Estos mapas permitieron visualizar las áreas con mayor presencia de árboles infestados en contraste con los de menor o nula presencia. Se pudo además estimar superficies y cuantificar espacialmente el nivel de daño. En los rodales con bajas proporciones de infestación fue posible localizar puntualmente los focos de infección e incluso árboles aislados (Figura 5).

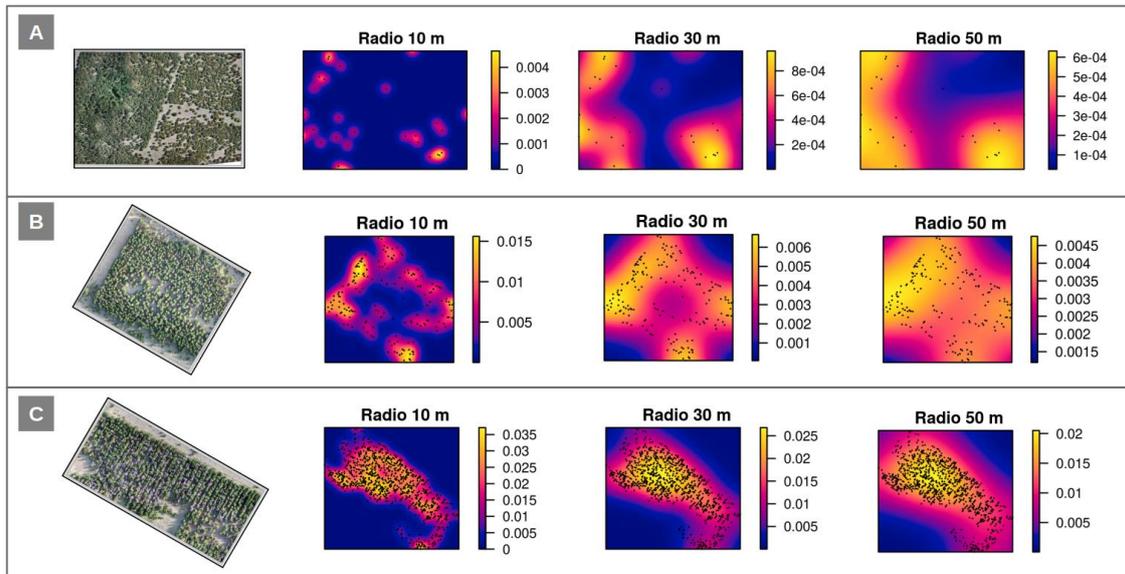


Figura 5. Ejemplos de tres rodales con distintas proporciones de infestación observadas con el VANT. **A)** Bajo nivel de infestación (0,38 %). **B)** Mediano nivel de infestación (9,8 %). **C)** Alto nivel de infestación (28,8 %). Para cada rodal se muestran los mapas de densidad generados con radios de búsqueda de kernel distintos (10, 30 y 50 metros) y los árboles identificados con el VANT (puntos negros). La leyenda expresa el número de individuos infestados por metro cuadrado.

4. DISCUSIÓN

El uso de VANT se ha convertido en una herramienta clave para el manejo forestal y su buen desempeño para la obtención de información ha sido probado en distintos tipos de bosque y en plantaciones bajo manejo silvicultural (Torresan *et al.*, 2017). En este trabajo se analizó el uso de esta tecnología como herramienta de monitoreo y detección de los síntomas ocasionados por una plaga forestal en Patagonia Argentina. Particularmente se cuantificó el nivel de ataque ocasionado por *S. noctilio* en forestaciones de coníferas del género *Pinus spp.* y se generaron mapas representando su distribución espacial.

La estimación de los niveles de infestación con el VANT resultó muy satisfactoria. Se pudieron visualizar los síntomas y daños generados por la plaga a escala de árbol individual y analizarlos a nivel del rodal. Estos resultados fueron comparados con algunos de los métodos de campo que habitualmente se utilizan en la región, como son los censos y parcelas de muestreo (Villacide, 2004). En todos los casos los niveles de infestación estimados con el VANT resultaron inferiores (Tabla 1). Las diferencias porcentuales son precisas y aceptables (~12 % en promedio). Se observa una tendencia consistente a subestimar la proporción de infectados, lo cual se corresponde con un sesgo que es posible de corregir estadísticamente a futuro. Si bien los datos presentados en este trabajo ($n = 11$) no son suficientes para elaborar un modelo de regresión que pueda ser validado, la alta correlación positiva existente entre los métodos de campo y lo detectado por el VANT ($r = 0,96$) es sin dudas alentadora. La incorporación de más datos permitiría elaborar un modelo de predicción de los niveles de infestación utilizando como variable independiente la proporción estimada con el VANT.

Además de cuantificar el daño y determinar la proporción de infestación, los productos cartográficos obtenidos por el procesamiento fotogramétrico, permitieron realizar un mapeo preciso de la distribución de los síntomas y daños. Así es entonces que el uso del VANT permite generar resultados espacialmente explícitos en forma de mapas de densidad o mapas de calor (Figura 5). Estudios similares (Näsi *et al.*, 2018, Sandino *et al.*, 2018) han destacado el potencial

de los VANTs en la generación de productos a escala de árbol individual representando en forma precisa la distribución de síntomas y daños ocasionados por plagas forestales. Asimismo, Villacide *et al.* (2014) resaltan la importancia de caracterizar espacialmente el comportamiento de *S. noctilio* para determinar en qué estadio de desarrollo se encuentra la plaga y así planificar mejores estrategias de control y manejo. Al cubrir toda la superficie de interés, el monitoreo con el VANT permite además detectar pequeños focos e incluso árboles aislados con síntomas y localizarlos en el espacio. Esto puede resultar de gran interés dado que en las fases endémicas y pre-epidémicas de desarrollo de la plaga (1 % y 5 % de infestación respectivamente), donde los patrones de distribución suelen ser agrupados, los métodos de muestreo aleatorios no suelen ser efectivos (Villacide y Corley, 2012).

Con respecto a las ventajas operativas, varios estudios han destacado los beneficios en términos de costos, flexibilidad de uso y logística en la obtención de datos de campo con VANTs (Banu *et al.*, 2016). En este trabajo, los tiempos de adquisición de datos con el VANT han resultado significativamente menores comparado con métodos tradicionales de muestreo o censos para una misma superficie. La rapidez con la que se puede llegar a los resultados, desde la etapa de vuelos de campo hasta el procesamiento en gabinete, brinda oportunidad valiosa de generar información actualizada y prácticamente en tiempo real del estado sanitario de los bosques.

Desde el punto de vista metodológico se han detectado algunos aspectos a considerar en futuras evaluaciones. En primer lugar, existen dos situaciones que no pueden ser detectadas en el análisis espacial de los ortomosaicos: 1) los individuos oprimidos que suelen encontrarse bajo el dosel forestal, 2) los árboles infestados pero que aún no presentan síntomas visibles en el follaje. Ambos casos sí son contabilizados en los censos y muestreos de campo, lo cual explica por qué los niveles de infestación obtenidos con el VANT mostraron una clara tendencia a subestimar. Esto, sin embargo, podría ser corregido con la incorporación de más datos que permitan ajustar y modelar estadísticamente el sesgo. Otro aspecto de mejora en la metodología es la posibilidad de aplicar técnicas de detección automática de ápices, segmentación y clasificación de copas para el conteo de árboles infestados, cuyo desempeño ha resultado satisfactorio (Nevalainen *et al.*, 2017). Teniendo en cuenta que los síntomas ocasionados por *S. noctilio* son muy evidentes en el análisis de los ortomosaicos, la aplicación de estas técnicas podrían agilizar la obtención de los resultados, haciendo la metodología aún más eficiente sobre todo si se analizan grandes superficies. Asimismo, distintas experiencias sugieren que relevamientos de mayores extensiones deberían ser realizados con VANTs de tipo ala fija, dado que los multicópteros poseen limitaciones técnicas de autonomía y alcance, afectando a la superficie relevada por misión de vuelo (Boon *et al.*, 2017).

Si bien en este trabajo no se ha puesto a prueba un enfoque metodológico innovador, los resultados representan un punto de partida alentador y útil para avanzar en el desarrollo de protocolos de monitoreo sanitario en forestaciones de *Pinus spp.* afectadas con *S. noctilio* en la región Patagónica y a nivel país. A pesar de que existen algunos aspectos de mejora, este estudio muestra los VANTs aplicados al monitoreo de la sanidad forestal pueden contribuir en la obtención de resultados de alta calidad y precisión a bajos costos operativos.

5. CONCLUSIONES

Este estudio demostró el potencial que tiene el uso de VANTs como un método de evaluación de la sanidad forestal de plantaciones en Patagonia Argentina. El flujo metodológico resultó eficiente y permitió generar información actualizada y en tiempo real de los rodales relevados. Los productos obtenidos a través del procesamiento fotogramétrico permitieron analizar a escala de árbol individual la sintomatología ocasionada por la plaga y cuantificar así los niveles de daño e infestación del rodal. Si bien estos resultados mostraron una clara tendencia a subestimar de modo sesgado y consistente con respecto a la cuantificación obtenida con los métodos tradicionales ensayados, existe una alta correlación entre ambos. Esto sugiere que el sesgo puede ser corregido

con la incorporación de más datos y la elaboración de un modelo de ajuste estadístico que pueda ser validado y replicable. Adicionalmente, el VANT permitió generar productos espacialmente explícitos sobre la distribución de la plaga, posibilitando la localización de pequeños focos o incluso individuos aislados sobre la superficie total relevada. Estos resultados demuestran que los VANTs aplicados al monitoreo sanitario pueden convertirse en herramientas clave de diagnóstico que contribuyan a un eficiente manejo y control de *S. noctilio* en plantaciones forestales de la región y el país.

AGRADECIMIENTOS

A los propietarios de los campos forestales que nos permitieron el ingreso a sus plantaciones. Al Téc. Ftal. Ezequiel Oliva (CORFONE S.A.), Ing. Agr. Héctor Medina (SENASA) e Ing. Agr. Juan Golé (SENASA) por su valiosa colaboración en las tareas de campo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, K. y K. J. Gaston. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 11(3): 138-146. Disponible en: <https://doi.org/10.1890/120150>.
- Baddeley, A.; E. Rubak; R. Turner. 2015. Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R. Chapman and Hall/CRC Press, London. <http://www.crcpress.com/Spatial-Point-Patterns-Methodology-and-Applications-with-R/Baddeley-Rubak-Turner/9781482210200/>.
- Baena S.; J. Moat; O. Whaley; D.S. Boyd. 2017. Identifying species from the air: UAVs and the very high resolution challenge for plant conservation. *Plos One* 12(11). Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188714>.
- Banu T. P.; G. F. Borlea; C. Banu. 2016. The use of Drones in forestry. *Journal of environmental science and engineering*. 5: 557-562. Disponible en: <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007>.
- Boon M.; A. Drijfhout; S. Tesfamichael. 2017. Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: a case study. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W6. 47-54. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>.
- Brovkina O.; E. Cienciala; P. Surový; J. Přemysl. 2018. Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands. *Geo-spatial Information Science* 21(1): 12-20. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1416994>.
- CIEFAP, MAGyP. 2017. Inventario Nacional de Plantaciones Forestales. Inventario de Plantaciones Forestales en Secano. Región Patagonia. Consultado 28 Mar 2020. Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/censos_inventario_archivos/inventario//000000_Inventario%20Patagonia%20Andina%20Secano.pdf.
- Corley J. C. y J. Villacide. 2005. *Sirex noctilio (Hymenoptera: Siricidae) en Argentina: biología y estrategias de control*. Grupo de Ecología de Poblaciones de Insectos. INTA. [en línea] [Fecha de consulta: 2 de abril 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/gepinsectos/divulgacion/articulos-divulgacion>.
- Corley J. C.; J. M. Villacide; A. M. Liebhold. 2014. Can entomophagous nematodes slow the spread of invasive pest populations? The case study of *Beddingia siricidicola* released for the management of *Sirex noctilio*. *J Pest Sci* 87: 551-557. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0613-3>.
- Dash J. P.; G. D. Pearse; M. S. Watt. 2018. UAV Multispectral Imagery Can Complement Satellite Data for Monitoring Forest Health. *Remote Sensing*, 10: 1216. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs10081216>.

- Dash J. P.; M. S. Watt; G. D. Pearse; M. J. Heaphy; H. S. Dungey. 2017. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 131: 1-14 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>.
- Frey J.; K. Kovach; S. Stemmler; B. Koch. 2018. UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. *Remote Sensing*. 10(6): 912. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs10060912>.
- Gatrell, A. C.; T. C. Bailey; P. J. Diggle, B. S. Rowlingson. 1996. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. *Transactions of the Institute of British Geographers*. 21(1): 256-274.
- Gómez C.; N. C. Vallejos; L. La Manna. 2013. Distribución y caracterización del daño ocasionado por *Pissodes castaneus* en plantaciones de *Pinus spp.* de la región Andino Patagónica Argentina. *Bosque* 34(3): 343-351. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000300010>.
- Gonzalez Musso R. F.; F. J. Oddi; M. G. Goldenberg; L. A. Garibaldi. 2020. Applying Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to map shrubland structural attributes in northern Patagonia, Argentina. *Canadian Journal of Forest Research* 50(7): 615-623 Disponible en: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0440>.
- Goodbody T. R. H.; N. C. Coops; J. C. White. 2019. Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Curr Forestry Rep* 5: 55-75. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>.
- Klasmer P.; E. N. Botto; J. C. Corley; J. M. Villacide; V. Fernández Arhex. 2000. Avances en el control biológico de *Sirex noctilio* en la región patagónica de la Argentina. *Serie técnica IPEF*, 13(33): 21-30. [Fecha de consulta: 2 Abr 2020]. Disponible en: <https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr33/cap02.pdf>.
- Näsi R.; E. Honkavaara; M. Blomqvist; L. Paivi; T. Hakala; N. Viljanen; K. Tuula; M. Holopainen. 2018. Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry & Urban Greening* 30: 72-82. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.010>.
- Nevalainen O.; E. Honkavaara; S. Tuominen; N. Viljanen; T. Hakala; X. Yu; J. Hyypä; H. Saari; I. Pölonen; N. N. Imai; A. M. G. Tommaselli. 2017. Individual Tree Detection and Classification with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging. *Remote Sens*. 9(3): 185. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs9030185>.
- QGIS Development Team. 2020. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>.
- Riyad I.; M. Onisimo; A. Fethi. 2008. Discriminating *Sirex noctilio* attack in pine forest plantations in South Africa using high spectral resolution data. In Kalácska M., Sánchez Azofeifa G.A., editors. *Hyperspectral remote sensing of tropical and sub-tropical hyperspectral remote sensing of tropical and sub-tropical forests*, p 161-174. Boca Raton CRC Press.
- Sandino J.; G. Pegg; F. Gonzalez; G. Smith. 2018. Aerial Mapping of Forests Affected by Pathogens Using UAVs, Hyperspectral Sensors, and Artificial Intelligence. *Sensors* 18(4): 944. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s18040944>.
- Sankaran S.; L. R. Khot; R. Ehsani. 2019. Applies remote sensing systems in phytopathology. In Furtado E. L.; S. Florentino Pascholati, W. Cintra de Jesus Junior, W. Bucker Moraes, editors. *Precision phytopathology: Frontiers of Science*, pp. 25-45. Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais (FEPAF), Brazil.
- Stone C.; C. Mohammed. 2017. Application of Remote Sensing Technologies for Assessing Planted Forests Damaged by Insect Pests and Fungal Pathogens: a Review. *Curr Forestry Rep* 3: 75-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0056-1>.
- Tang L.; G. Shao. 2015. Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*. 26: 791-797. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>.

- Torresan C.; A. Berton; F. Carotenuto; S. Filippo Di Gennaro; B. Gioli; A. Matese; F. Miglietta; C. Vagnoli; A. Zaldei; L. Wallace. 2017. Forestry applications of UAVs in Europe: a review, *International Journal of Remote Sensing* 38:8-10, 2427-2447. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>.
- Villacide J. M.; M. Masciocchi; J. C. Corley. 2014. Avispas exóticas en la Patagonia: la importancia de la ecología de invasiones en el manejo de plagas. *Ecología austral*, 24(2): 154-161. Disponible en: http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/30.
- Villacide J. M.; J. C. Corley. 2012. Ecology of the woodwasp *Sirex noctilio*: Tackling the challenge of successful pest management. *International Journal of Pest Management* 58(3): 249-256. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/09670874.2012.701022>.
- Villacide J. M.; V. Fernández-Arhex; P. Klasmer; J. C. Corley. 2004. Estrategias de manejo de la plaga *Sirex noctilio*: definiendo escalas y acciones. *SAGPyA Forestal* 30: 13-18. [Fecha de consulta: 2 Abr 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/gepinsectos/divulgacion/articulos-divulgacion>.
- Wu X.; X. Shen; L. Cao; G. Wang; F. Cao. 2019. Assessment of Individual Tree Detection and Canopy Cover Estimation using Unmanned Aerial Vehicle based Light Detection and Ranging (UAV-LiDAR) Data in Planted Forests. *Remote Sens.* 11(8): 908. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs11080908>.
- Yao R.; R. Scarpa; J. Turner; T. Barnard; J. Rose; J. Palma; D. Harrison. 2014. Valuing biodiversity enhancement in New Zealand's planted forests: Socioeconomic and spatial determinants of willingness-to-pay. *Ecological Economics* 98: 90-101. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.12.009>.

