

EVALUACIÓN DE TRAMPAS PARA VIGILANCIA REMOTA DE MACHOS DE *Ceratitis capitata* Wiedemann (DIPTERA: TEPHRITIDAE) EN PICA, CHILE

EVALUATION OF TRAPS FOR REMOTE SURVEILLANCE OF *Ceratitis capitata* Wiedemann (DIPTERA: TEPHRITIDAE) MALES IN PICA, CHILE

Tomislav Curkovic^{1*}, Américo Contreras², Diego Arraztio¹, Barbara Valenzuela³ y Adiel Cayo⁴

¹ Departamento de Sanidad Vegetal, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Avda. Santa Rosa 11.315, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-3403-8800>

² Escuela de Pregrado, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Avda. Santa Rosa 11.315, Santiago, Chile

³ Neltume SpA, Eduardo Castillo Velasco 4801, Santiago, Chile

⁴ Sección Inteligencia Fitosanitaria, Servicio Agrícola y Ganadero. Paseo Bulnes 140, Santiago, Chile

* Autor por correspondencia: tcurkovi@uchile.cl

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comparar la eficacia de trampas Jackson (JT) convencionales vs. JT modificadas con una cámara fotográfica (TJCF) en la captura e identificación de machos de *Ceratitis capitata* en huertos frutales en pleno desierto de Atacama (Pica, Región de Tarapacá). Ambas trampas fueron cebadas con Trimedlure. Entre octubre y diciembre de 2018, se liberaron periódicamente machos estériles de *C. capitata*, y se contrastaron las magnitudes de capturas en ambos tipos de trampas. La capacidad de las TJCF de proporcionar imágenes a partir de las cuales reconocer los machos capturados también fue evaluada. Los resultados mostraron que las capturas no fueron estadísticamente diferentes en magnitud entre ambos tipos de trampas ($p=0,8901$). Hubo en promedio alta concordancia (94%) entre la identificación de *C. capitata* desde imágenes captadas por la TJCF y la respectiva revisión presencial de los individuos en campo. El algoritmo de conteo automático presentó un error promedio de un 14%. Al evaluar la concordancia entre la temperatura registrada por sensores dispuestos en la TJCF y las mediciones hechas en una estación agrometeorológica cercana al sitio de estudio, se observó un 94% de concordancia entre ambas mediciones. Los resultados indican que el uso de trampas modificadas para vigilancia temprana y remota de *C. capitata* es técnicamente factible, sin embargo, se debe mejorar el algoritmo de reconocimiento automático para su eventual adopción por el Ministerio de Agricultura a cargo del control oficial de *C. capitata* en Chile. Se sugiere evaluar su uso en sitios distantes de difícil acceso, puesto que permitiría generar ahorros en recursos humanos y materiales, además de proveer de antecedentes ambientales del sitio de estudio.

Palabras clave: *Ceratitis capitata*, trampas remotas, detección temprana de plagas.

ABSTRACT

The objective of this study was to compare the efficacy of conventional Jackson traps (JT) vs. modified JT with a photo camera added (TJCF) in the capture and identification of males of *Ceratitis capitata* in fruit orchards located in the Atacama Desert (Pica, Tarapacá Region). Both traps were baited with trimedlure. From October through December 2018, sterile *C. capitata* males were periodically released, and catches in the traps were compared. The capability of the TJCF to

provide images for the identification of *C. capitata* was also evaluated. The results showed that male catches were not statistically different between trap types ($p = 0.8901$). On average, there was a high concordance (94%) between the identification of *C. capitata* from the images taken by the camera and the on-site assessment. The automatic counting algorithm presented an average error of 14%. When evaluating temperature values recorded by the sensors integrated into the TJCF and those obtained from a weather station nearby, concordance was 94%. Our results suggest that the use of modified traps is technically feasible for remote surveillance of *C. capitata*, however the algorithm must be improved in order to be eventually adopted by the Chilean Department of Agriculture in charge of *C. capitata* official control. Further research is required to evaluate their use in remote and difficult to reach areas, since this would allow saving human and material resources as well as collecting environmental data of the study site.

Keyword: *Ceratitis capitata*; remote traps, early pest detection.

INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna usa las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), con sensores, dispositivos de comunicación, *big data*, internet de las cosas y otras herramientas que le otorgan nuevas oportunidades a los sistemas de producción, en particular cuando se implementa el Manejo Integrado de Plagas (Philimis et al., 2013; Miranda et al., 2019). El monitoreo y control de plagas agrícolas se hace con el desarrollo de trampas automáticas, electrónicas o inteligentes, las cuales han surgido como parte de las TIC y se definen como “trampas equipadas con sensores para la colección de datos (e imágenes) en campo, con componentes de *hardware* y *software* para su transmisión a un servidor remoto con acceso *on-line*, donde se almacena y/o procesa la información con referencias geográficas” (Jiang et al., 2008; Potamitis et al., 2017; Shaked et al., 2017), en particular, con el objetivo de disminuir costos y aumentar la precisión de datos para la eficaz y eficiente toma de decisiones en el manejo de plagas (Jiang et al., 2008). Diferentes tipos de trampas electrónicas o remotas se han utilizado en otros países para el monitoreo de varias plagas de frutales y cultivos, tales como: chinches (*Riptortus clavatus* (Thunberg), Heteroptera: Alydidae, Tabuchi et al., 2006), polillas (*Cydia pomonella* L., Lepidoptera: Tortricidae, Guarnieri et al., 2011), escarabajos (*Anthonomus grandis* Boh. (Olivier), Coleoptera: Curculionidae, Beerwinkle, 2001), y varias especies de moscas de la fruta (Diptera: Tephritidae) como *Bactrocera dorsalis* (Hendel), *B. oleae* (Rossi) y *C. capitata* (Jiang et al., 2008; Philimis et al., 2013; Deqin et al., 2016; Philimis et al. 2013), pero no conocemos de reportes científicos en esta materia en Chile. Miranda et al. (2019) demostraron que el uso de este tipo de tecnologías en Europa reduce el uso de plaguicidas (en casi un 37% comparado con un monitoreo y control convencional) con el consecuente beneficio económico y ambiental, además de disminuir los costos de mano de obra

en labores de monitoreo de moscas de la fruta. Adicionalmente, la implementación de un sistema de soporte de decisiones apoyando al monitoreo en tiempo real, aumentó la precisión del uso de agroquímicos y disminuyó el impacto de la aplicación en los enemigos naturales de la mosca del olivo (*B. oleae*).

Las trampas electrónicas frecuentemente permiten reconocer la especie capturada a través de una imagen (Sciarretta y Calabrese, 2018). En el caso de determinaciones a través del uso de fotografías, estudios sugieren que para la obtención de una imagen reconocible, la resolución mínima debe ser de 2 megapíxeles (Tabuchi et al., 2006) y el análisis de las fotos puede ser semiautomático, por un operador que verifica y cuenta los insectos, viendo la imagen enviada remotamente, o de forma automática, en donde el reconocimiento y conteo se realiza mediante algoritmos de imágenes, basados en *machine learning* (Jiang et al. 2008; Thulasi et al., 2013; Ding y Taylor, 2016; Kalametianos et al., 2018; Miranda et al., 2019). Dequin et al. (2016) describen un algoritmo de detección y seguimiento de *B. dorsalis* en campo que mostró alta precisión en la detección de individuos y permitió conocer en tiempo real las horas de vuelo de esta especie durante el día. Además, sensores de temperatura, humedad, viento y/o lluvia pueden ser incluidos en los dispositivos que contienen las trampas electrónicas, información que también puede ser transmitida y colectada en un servidor, y puede servir al uso de modelos predictivos o sistemas de alerta de plagas, incrementando su contribución a un manejo eficiente y racional (Sciarretta y Calabrese, 2018).

La mosca del Mediterráneo (Moscamed), *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae), es una de las principales plagas de la agricultura mundial, con gran impacto económico tanto por el daño directo en la producción, como por su carácter cuarentenario, que dificulta el comercio de frutas y hortalizas frescas hacia países donde esta especie no está presente. Los costos asociados

a los daños en cultivos, control y prevención de la infestación por *C. capitata* alcanzan los miles de millones de dólares en el mundo cada año (Dyck et al., 2021). Esta mosca, tiene más de 200 especies vegetales reportadas como hospederos, incluyendo cultivos de importancia económica, como cítricos, carozos y pomáceas, entre otras (Liquido et al., 1991). Sus larvas se desarrollan al interior de los frutos, causando oxidación, maduración prematura y, finalmente, pudrición en la fruta (Shoukry y Hafez, 1979). El ciclo de *C. capitata*, en zonas con climas mediterráneos, alcanza hasta 7-8 generaciones por temporada y el período con actividad de adultos se puede prolongar por hasta 11 meses en algunas zonas, con *peaks* en otoño y vuelos sostenidos durante el periodo de primavera y verano (Escudero et al., 2008).

Chile es un país libre de *C. capitata* desde 1995, y es el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) la agencia del estado responsable de mantener esta condición con su programa Moscas de la Fruta (MF), mediante el Sistema Nacional de detección Sensible (SNDS), el cual mantiene a lo largo del país, una red con alrededor de 15.000 trampas con atrayentes específicos para detectar temprana y oportunamente su ingreso, principalmente en zonas urbanas y productivas (SAG, 2023). Para ello, el SAG y su programa MF realiza diferentes acciones, entre las principales, el desarrollo e implementación de la técnica de insectos estériles (TIE), el control y erradicación de focos con brotes de Moscamed, y el monitoreo de adultos en trampas (Dyck et al., 2021; SAG, 2023). La TIE es una herramienta de gran importancia para el control y erradicación de *C. capitata* en el mundo y también se ha desarrollado en Chile; consiste en la crianza de machos que son irradiados al estado de pupa, lo que les provoca esterilidad. Estos insectos, liberados en campo en densidades suficientes, compiten con los individuos silvestres, reduciendo y, eventualmente, erradicando las poblaciones en áreas acotadas (SAG, 2023). La TIE en Chile contribuye para que el SAG optimice el control o erradicación oportuno, analizando la introducción (brotes) y fluctuación de las poblaciones en campo (o ciudades), lo que implica utilizar importantes recursos en materiales (trampas y atrayentes), transporte para su instalación, mantención y monitoreo periódico, sumado al personal calificado que trabaja en laboratorios habilitados para ese fin, lo cual es aún más costoso en áreas de difícil acceso (Sciarretta y Calabrese, 2018). Como consecuencia del esfuerzo descrito, las exportaciones agrícolas chilenas no están sujetas a restricciones asociadas a esta especie cuarentenaria.

El programa de vigilancia de *C. capitata* en Chile, incluye el uso de trampas cebadas con paraferomonas (Trimedlure) y otros atrayentes en

los posibles puntos de ingreso de la plaga, como las zonas fronterizas (SAG, 2023). Estas trampas deben ser monitoreadas con frecuencia, para asegurar la acción inmediata en caso de ser detectada la presencia de la plaga, ya que, los retrasos aumentan las posibilidades del establecimiento de focos de esta especie invasora en el país. Entonces, el eventual uso de trampas remotas desempeñaría un importante rol, disminuyendo los tiempos de respuesta, y los costos y riesgos del monitoreo, especialmente en zonas de difícil acceso. El presente trabajo evaluó el uso de 35 dispositivos con cámara fotográfica, sensor de temperatura y capacidad de transmisión de datos, acoplados a trampas Jackson convencionales (una de las más frecuentes usadas para moscas de la fruta), para el monitoreo remoto de *C. capitata* en el Oasis de Pica, en donde el ingreso clandestino de fruta presenta un importante desafío para mantener a Chile libre de esta plaga.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidad y sitios de estudio

Este estudio fue hecho en Chile, Región de Tarapacá, comuna y localidad de Pica (-20.48901, -69.32901), un Oasis en pleno Desierto de Atacama, con afloramiento superficial de agua que permite la agricultura (Cuevas, 2011). Por su condición fronteriza con países con presencia de *C. capitata*, el MF/SNDS del SAG en Pica mantiene un programa de monitoreo permanente con trampas y un laboratorio habilitado para ello. Allí se seleccionaron 35 sitios (-20.48383 a -20.51030; -69.37320 a -69.31394), en base a su historial de alta captura de machos estériles de *C. capitata*, donde periódicamente se liberan masivamente machos para la implementación de la TIE.

Insectos estériles

En Pica se desarrolla un programa preventivo en base a la TIE con liberaciones regulares de machos estériles de *C. capitata* provistos por el Centro de Producción de Insectos Estériles del SAG, ubicado en Lluta, Región de Arica y Parinacota. Se liberan pupas de *C. capitata* esterilizadas con un equipo Irradiador Gammacell 220, cuyas fuentes son rayos gamma de Cobalto⁶⁰ y marcadas con polvos fluorescentes, pigmentos sintético no tóxicos (Rocket Red tipo A, Clymans et al., 2020). Las pupas se disponen en bolsas de papel Kraft con 1.500-6.000 individuos (moda = 3.000), cada una. La tasa de liberación en Pica es de una bolsa/por sitio/vez, las que se realizan los lunes y viernes cada semana. Los individuos estériles son reconocidos en el laboratorio siguiendo las siguientes cuatro etapas: a) examen visual en laboratorio bajo una luz ultravioleta para verificar la presencia

evidente de pigmento fluorescente, b) examen bajo lupa estereoscópica de los ejemplares que no se observaron marcados en (a), c) examen bajo microscopio epifluorescente de los ejemplares que no se observaron marcados en (b), y d) análisis de la genitalia de los ejemplares que no se observaron marcados en (c).

Trampas convencionales y modificadas

Se usaron trampas Jackson convencionales (TJ) y trampas Jackson adaptadas con cámara fotográfica (TJCF, Fig. 1), dispositivo desarrollado por la empresa nacional Neltume Spa. Ambas trampas son idénticas respecto de materiales, dimensiones, forma, superficie pegajosa, atrayente, volumen interno y aberturas externas, diferenciándose solamente en que la TJCF tiene adosada en su parte superior externa, una cámara fotográfica de 5 megapíxeles con lente en ángulo de 130°, obteniendo imágenes de resolución 2.592x1.844 píxeles. El lente de la cámara es expuesto a través de un orificio ubicado en el centro del vértice superior del techo y toma, desde arriba, una fotografía del piso de la trampa (Fig. 2). Además, contiene sensores que registran temperatura cada 15 minutos, durante todo el día. Ambos tipos de trampas (TJ y TJCF) fueron ubicadas en cada sitio, próximas (5-10 m) y equidistantes respecto de los

puntos de liberación de insectos estériles. Las TJCF son capaces de, una vez al día y usando la red celular, enviar la fotografía del piso y los registros climáticos, los que son almacenados en servidores de Neltume Spa, donde se inicia un algoritmo desarrollado por la misma empresa, que permite procesar la imagen usando una red neuronal para identificar y contar las capturas de la especie de interés, con resultados que mejoran en la medida que se toman más fotografías y se entrena la red neuronal, mediante un proceso manual de etiquetamiento de datos (Fig. 2) (Martins et al., 2019).

Al inicio de los ensayos, todas las trampas fueron cebadas con atrayente (Trimedlure) para machos de *C. capitata*, el que fue reemplazado cada 28 días, en ambos tipos de trampas en cada sitio. La revisión se hizo dos veces por semana, entre octubre y diciembre de 2018. Los pisos pegajosos de las trampas fueron reemplazados por nuevos cada fecha de revisión y llevados al laboratorio para análisis (SAG, Pica) y recuento de individuos de *C. capitata*.

Ensayos de campo y análisis de concordancia

Se evaluó el efecto de la modificación de la trampa convencional en las capturas de *C. capitata*. El montaje se hizo el 30 de octubre de 2018. En



Fig. 1. Trampa Jackson modificada con cámara fotográfica (TJCF) para *Ceratitis capitata*, sensor de temperatura, celda fotovoltaica (no se muestra en la foto) y dispositivo para envío remoto de fotografías.

Fig. 1. Modified Jackson trap with a photo camera (TJCF) for *Ceratitis capitata*, temperature sensor, photovoltaic cell (not shown in the picture) and device to send photos remotely.

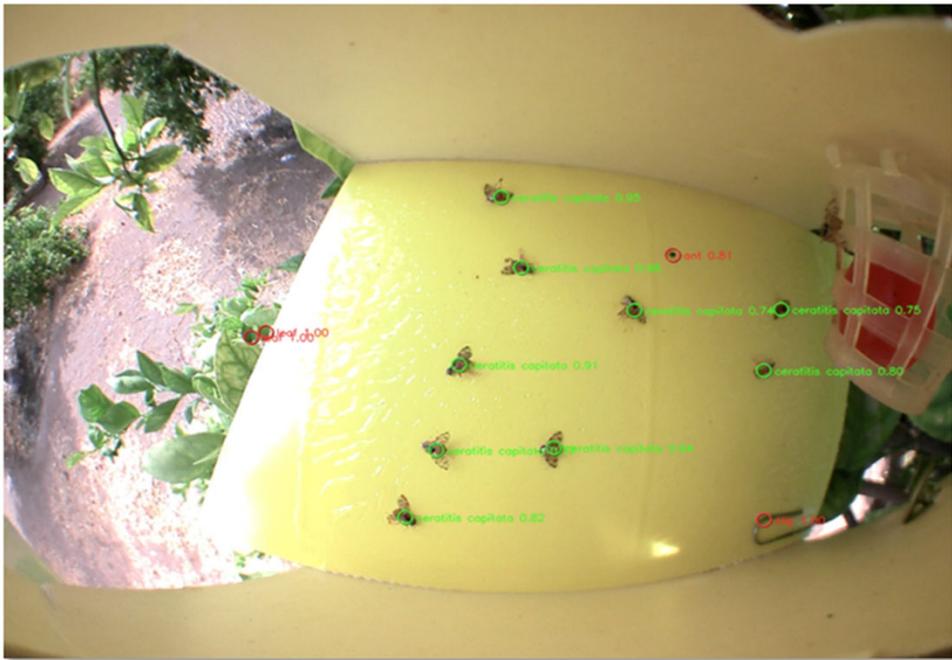


Fig. 2. Fotografía del piso de la Trampa Jackson con cámara fotográfica (TJCF), con capturas de *Ceratitis capitata* y del etiquetado de imagen.

Fig. 2. Photograph of the liner of the modified Jackson Trap with a camera (TJCF), with captures of *Ceratitis capitata* and image labeling.

cada sitio se puso una TJ (estación 1) y una TJCF (estación 2) a una distancia de aproximadamente 10 m entre ellas, en condiciones relativamente homogéneas respecto de vegetación, exposición, altura, etc. Luego de cada servicio de trapeo, en cada fecha, las trampas se rotaron, alternando su ubicación entre las dos estaciones de cada sitio, de modo de minimizar el “efecto posición” en las capturas. El ensayo se extendió por cinco semanas, haciendo 9 rotaciones entre estaciones y 10 registros. Los resultados se expresan como número de individuos acumulados de *C. capitata*/trampa, debido a que se deben comparar las observaciones de los pisos pegajosos (cantidad de individuos y posición en el piso pegajoso) con las fotografías, para que el algoritmo pueda confirmar/rechazar si el individuo corresponde a *C. capitata*. Durante el período de evaluaciones, solo una TJCF desapareció en una fecha, y fue inmediatamente reemplazada; por tanto, se dispone de 349 registros para ellas, y 350 para TJ.

Para evaluar la concordancia entre el resultado del conteo de capturas en pisos adhesivos mediante prospección visual de las muestras en campo realizadas por personal especializado del SAG y el resultado obtenido usando las TJCF, fue necesario comenzar usando algoritmos basados en análisis morfológico que son capaces de identificar distintas formas y categorizarlas por circularidad, inercia, convexidad y área total, para y luego,

entrenar una red neuronal (Xia et al., 2018), haciendo etiquetamiento de muestras mediante prospección visual de las fotografías en versión digital (Fig. 2), el cual, para este estudio, utilizó alrededor de 3.000 muestras, considerando una muestra como una foto de un individuo/día.

De acuerdo con lo anterior, se compararon los datos de capturas de machos de *C. capitata* obtenidos a la misma hora/día por las trampas TJCF y las prospecciones del SAG, de manera de determinar con precisión la ubicación de los ejemplares en el piso pegajoso. Según esto, el número de resultados temporalmente coincidentes entre la lectura SAG y la fotográfica tuvo un máximo y mínimo de observaciones coincidentes de 14 y 6 trampas por día, en las distintas fechas de revisión, contrastando 99 coincidencias y discrepancias entre ambos tipos de mediciones, resultados que fueron utilizados para el análisis de concordancia (Fig. 3).

Para validar la correcta medición de la temperatura del aire hecha a través de los sensores que contiene la TJCF, se instalaron dos equipos TJCF en la estación meteorológica del Centro Regional de Investigación La Platina, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago. Allí se tomaron los datos medidos por los tres sensores (incluido el del Centro Experimental), desde el 29 de octubre hasta el 04 de noviembre del año 2018. Los dos dispositivos TJCF con sensores, y los datos registrados por ellos fueron obtenidos

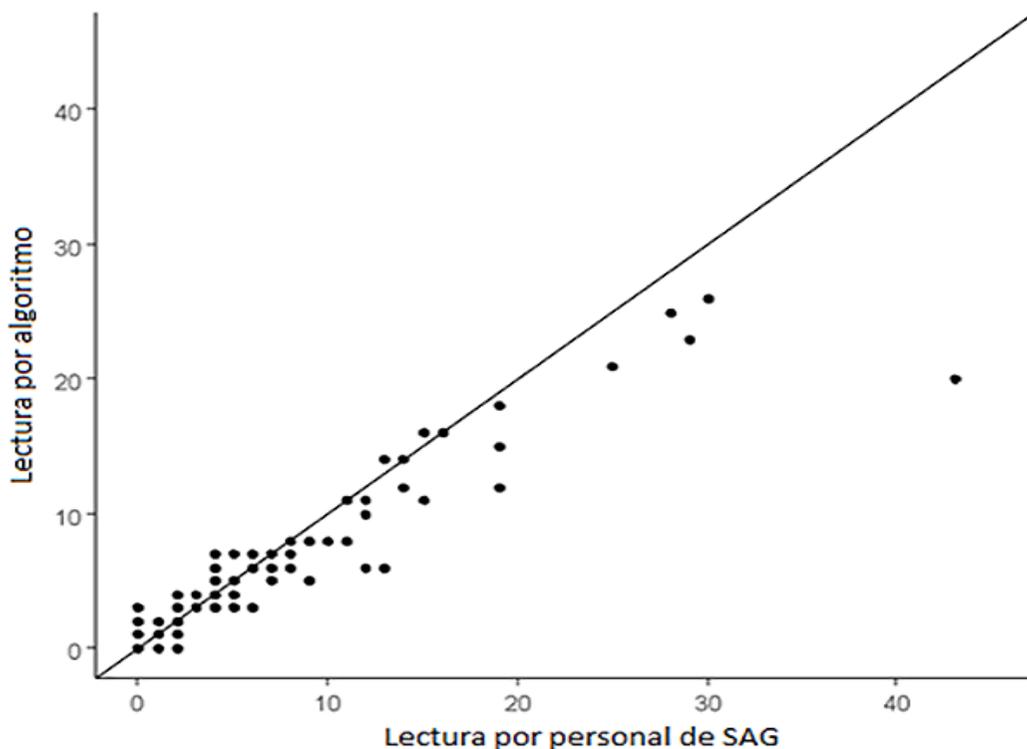


Fig. 3. Concordancia entre capturas de *Ceratitidis capitata* obtenidas en trampas remotas (TJCF) empleando el algoritmo vs. las capturas chequeadas en el laboratorio especializado de SAG-Pica.

Fig. 3. Concordance between captures of *Ceratitidis capitata* obtained from remote traps (TJCF) using the algorithm vs. those determined in the specialized laboratory of SAG-Pica.

desde la plataforma web neltu.me en donde se registran cada 15 min bajo la hora oficial de Chile. Los datos de la estación meteorológica, del Centro Regional de Investigación La Platina (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile), fueron obtenidos desde la plataforma web agromet.inia.cl, en donde se registran cada 1 hora bajo el formato UTC -4. Para llevar a cabo la comparación de los datos, se seleccionaron los registros cada una hora por partes de los tres sensores en el mismo momento, contrastando un total de 864 datos.

Diseño experimental y análisis de resultados

Con el fin de contrastar las medias del número de individuos acumulados en las cinco semanas de registro de capturas en campo, en cada tipo de trampas (TJ vs. TJCF), se usó un diseño en bloques completos al azar. Una vez obtenidos los datos, se ajustó un Modelo Lineal Generalizado Mixto, usando una distribución binomial negativa y función de enlace log, donde se consideró en la parte fija del modelo el tipo de trampa y en la parte aleatoria el bloque, esto último dada la falta de independencia que se genera en las mediciones de dos trampas en un mismo bloque. Para evaluar

el efecto de las trampas se realizó el test de Wald con un nivel de significancia de un 5%. Los datos fueron analizados con el Software R, versión 4.1.3 (R Core Team, 2022). Las medias se calcularon a través de la inversa de la función de enlace y los errores estándares a través del método Delta (Agresti, 2013). Con el objetivo de ver el grado de concordancia de los conteos realizadas a través de la lectura de las trampas (TJ vs. TJCF), junto con las mediciones de temperatura que entregan las trampas TJCF versus las entregadas por la estación meteorológica del Centro Regional de Investigación La Platina, se aplicó el test del coeficiente de correlación de concordancia (CCC). Un resultado de $CCC = 1$ indica que cada par de datos se ajusta perfectamente, mientras que 0 indica que no hay acuerdo y $CCC = -1$ indica que cada par de datos alcanza un perfecto acuerdo de manera inversa. El CCC corresponde a una combinación de ajuste entre qué tan próximos están los datos a la línea de perfecta concordancia (ajuste de los datos), que corresponde simbólicamente a χ , y de la estrechez de los datos sobre su eje, simbólicamente a ρ (coeficiente de correlación de Pearson) (Lin et al., 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contraste de capturas entre trampas

Se obtuvo un total de 10.993 capturas de machos de *C. capitata*, de los cuales 5.631 fueron capturados en las trampas Jackson convencionales (TJ) y 5.362 en las TJ con cámaras fotográficas (TJCF). No se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p\text{-value}=0,8901$, $df=1$) entre las medias acumuladas (captura/trampa) para TJCF y TJ, siendo éstas $69,9 \pm 13,9$ y $70,8 \pm 14,1$, respectivamente. Todos los individuos capturados eran estériles según se verificó en el Laboratorio del SAG en Pica. Ello demuestra que la incorporación de la cámara y equipamiento acompañante en la trampa TJCF, no afecta las capturas de machos estériles de *C. capitata* respecto de las trampas convencionales (TJ), similar a los resultados obtenidos para *C. pomonella* por Guarnieri et al. (2011) y con moscas de la fruta (Tephritidae) por Shaked et al. (2017). Por tanto, las TJCF desarrolladas en el presente estudio se consideran equivalentes a las TJ desde el punto de vista de su eficacia para el monitoreo de *C. capitata*.

Respecto de la rotación de trampas entre las estaciones 1 y 2 en cada sitio; la posición "1" (es decir aquella en que se instalaron las trampas TJ el día del montaje del ensayo) tuvo capturas significativamente mayores ($9,29 \pm 1,135$) que la posición "2" ($6,82 \pm 0,839$) ($p = 0,0006672$, $df=1$), lo que confirma la conveniencia de haber alternado la ubicación de las trampas en cada fecha de revisión, para minimizar el sesgo por posición. De acuerdo a esto, se han descrito factores abióticos y bióticos que influyen en la distribución de las poblaciones de *Ceratitis* spp entre localidades o regiones, como la cobertura vegetal, presencia de refugios, velocidad del viento y otras variables reportadas por Navarro-Llopis et al. (2014), Weldon et al. (2018) y Mama Sambo et al. (2019). También se han reportado preferencias para la ubicación del *lek*, que consiste en una agrupación de machos que emiten la feromona sexual de la especie, el cual es visitado por hembras sólo para copular; Yuval et al. (1998) hicieron estudios identificando algunos factores que definen estas conductas, los que podrían haber afectado la presencia de individuos entre estaciones en nuestro estudio, a pesar del intento de colocar las trampas en condiciones similares en cada sitio. Estos factores podrían ser: (a) el viento ya que los machos prefieren hacer el *lek* en zonas donde el viento favorezca la dispersión de la feromona sexual, es decir, se sitúan viento arriba respecto a las plantas (Arita y Kaneshiro, 1988); (b) la luminosidad, los machos buscan zonas del árbol (preferentemente hojas grandes (Kaspi y Yuval, 1999) parcialmente iluminadas, siguiendo el movimiento del sol durante el día (Arita y Kaneshiro, 1989); (c) zonas con mayor presencia

de fruta y hojas sanas (sin daño) (Kaspi y Yuval, 1999); (d) zonas con mayor presencia previa de machos (Shelly, 2000). Entonces, es probable que diferencias intra-prediales respecto de estos u otros factores, expliquen las diferencias observadas entre sitios en nuestro estudio, pero esos aspectos no fueron medidos. Baker et al. (1986) señalan que la dispersión de *C. capitata* ocurre desde el sitio de liberación hacia un punto cardinal particular y se correlaciona con la dirección del viento. Todo ello es importante de estudiar para la definición de variables que permitan establecer trampas en condiciones más homogéneas, o eventualmente las condiciones más favorables para maximizar las capturas, de modo de orientar respecto de donde ubicarlas en campo. Por otra parte, *C. capitata* vuela generalmente menos de 300 m, por tanto, la distancia estimada entre el punto de liberación en el presente estudio y las trampas (10 m) no representa un impedimento para que los machos lleguen a ellas. Finalmente, se ha informado que solo hasta un 15% de insectos estériles liberados, son recuperados en las trampas, la mayoría de ellos a distancias de hasta 25 m, 90% de estos dentro de un plazo de 5 días desde la liberación en campo (Paranhos et al., 2010; Navarro-Lopis et al., 2014), todo ello coincidente con lo realizado y observado en nuestro estudio.

Concordancia entre registros visuales (SAG) y remotos (TJCF)

El análisis de la concordancia arrojó un CCC = 0,94, $\chi = 0,96$ y $\rho = 0,94$, respectivamente. Ello se traduce en una alta correlación directa y significativa entre ambos tipos de mediciones (SAG vs. TJCF o remota) (Fig. 3). La figura muestra una concordancia muy equilibrada entre 0 a 10 capturas, rango en el que está la mayoría de los valores de capturas obtenidos en el estudio. Sobre ese rango hay un cierto sesgo a mayores registros visuales (SAG) de capturas; de hecho, en nuestro estudio, en un caso *outliner* (>40 capturas) el registro visual casi duplica al registro remoto.

El cálculo del porcentaje de error de conteo por parte del algoritmo fue de un 25% con el primer análisis, el cual consistió en el uso de bloques o descriptores morfológicos; luego cambiamos a un algoritmo de redes neuronales el cual si se entrena mejorando el error del conteo automático que se redujo a un 14%, para el total de imágenes utilizadas. En un segundo paso, se calculó el error según el rango de capturas por piso, con el algoritmo ya entrenado, lo que arrojó que los pisos con capturas en 1 y 4 moscas tuviesen un error de 17%, entre 5 y 10 capturas, un error del 12% y, pisos con capturas superiores a 10, tuvieron un error del 20%. Esto indica que el sistema tiene alta eficiencia con capturas menores a 10 individuos/

día (Tabla 1). Existen reportes de niveles de concordancia similares a los obtenidos en este estudio (94%), en un rango desde 92 a 99% (Ding y Taylor, 2016; Dequin et al., 2016; Kalamatianos et al., 2018; Miranda et al., 2019), por lo tanto, los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, aunque también ello abre posibilidades de que, mejoras en el algoritmo de reconocimiento, podrían aumentar la eficacia del método lo cual es fundamental por ejemplo con programas de control oficial donde se requiere de manera

oportuna una alta eficiencia en la determinación y/o reconocimiento de la plaga con un error cercano a cero. Por otra parte, Shaked et al. (2017) reportaron que las imágenes obtenidas de trampas remotas permitieron a especialistas (entomólogos) reconocer 88% de las moscas de la fruta capturadas en ellas. En los análisis de concordancia de los datos de temperatura entregados por los dos dispositivos TJFC y la estación meteorológica ubicada en el Centro de Investigación La Platina (Fig. 4), los niveles de concordancia, para ambos

Tabla 1. Error de conteo automático para el algoritmo con método de bloques y para la red neuronal según número de capturas de *C. capitata* en trampas modificadas (TJCF), expresado en porcentaje.

Table 1. Automatic counting error for the algorithm with the block method and for the neural network, according to the number of captures of *C. capitata* in modified traps (TJCF), expressed as a percentage.

Rango de capturas	Error con método bloque	Error con red neuronal
0-4	2,24	0,17
5-10	0,21	0,12
> 10	0,09	0,2
General	0,27	0,14

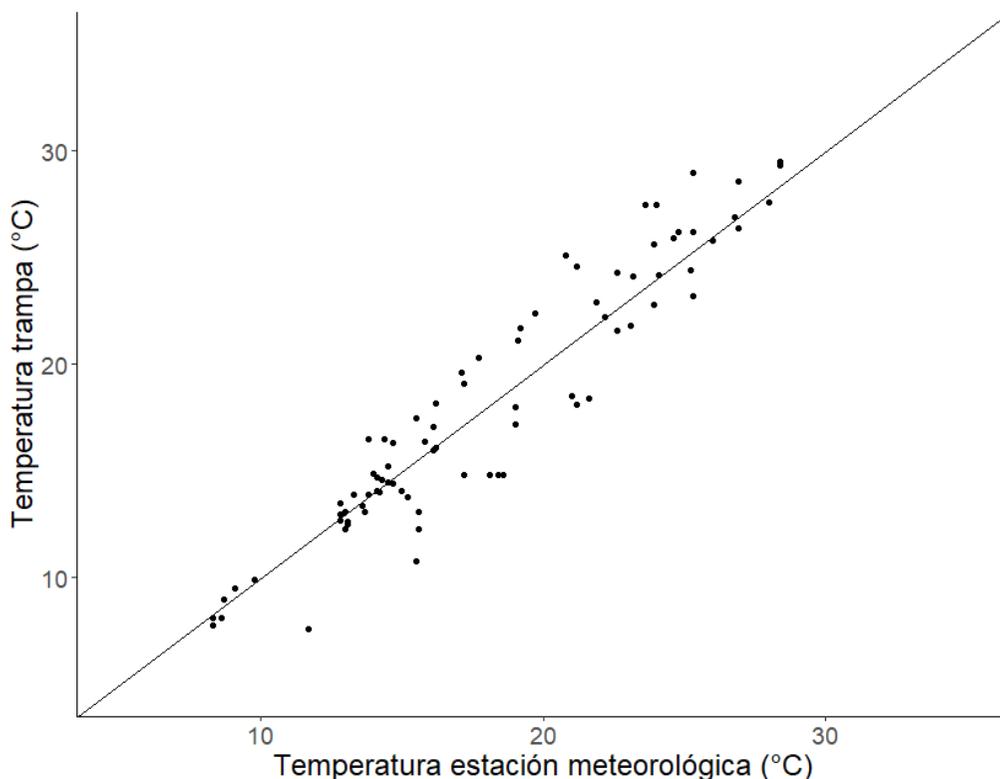


Fig. 4. Concordancia entre las temperaturas evaluadas en trampas remotas (TJCF) y las temperaturas evaluadas en la Estación Meteorológica “La Platina”.

Fig. 4. Concordance between temperatures from remote traps (TJCF) and “La Platina” Weather Station.

dispositivos fueron: CCC = 0,94; $\chi = 0,99$; $\rho = 0,95$, lo que nos entrega valores muy congruentes entre estos artefactos. Sin duda, por lo señalado, este sistema de monitoreo también es una herramienta con un alto potencial de uso en Programas de Control Oficial con alta sensibilidad de trapeo, como es el caso del Programa Moscas de la Fruta (MF) del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG – Chile). Para estos casos, se sugiere una modalidad mixta semiautomatizada con inspectores que estén verificando de manera remota el correcto funcionamiento de la totalidad de trampas instaladas y con la capacidad de verificar en terreno la aparición de individuos sospechosos capturados en imágenes; esto mientras se realizan mejoras al algoritmo de servicio de reconocimiento automático el cual debería llegar a un error de determinación cercano a cero tal como lo logra en la actualidad el SAG a través de sus inspecciones visuales en terreno.

CONCLUSIONES

Las trampas modificadas (TJCF) proporcionaron magnitudes de capturas de machos de *C. capitata* estadísticamente sin diferencias a las trampas Jackson convencionales.

Existe un 94% de concordancia entre la evaluación visual y la remota con TJCF. También se encontró un 94% de concordancia entre las mediciones de la temperatura entre una trampa TJCF y la estación meteorológica La Platina.

Los contrastes de capturas utilizando redes neuronales mostraron un error inferior al 17 %, con capturas ≤ 10 individuos/trampa.

Los resultados sugieren que es técnicamente factible el uso de estas trampas modificadas para vigilancia remota (y oportuna) de *C. capitata*, especialmente con capturas bajas (< 10 individuos/día), con los consecuentes ahorros en recursos humanos y materiales, además de proveer de antecedentes ambientales del sitio de estudio, pero ello requiere reducir los errores a valores tendientes a cero, especialmente para su eventual adopción en el programa de control oficial de *C. capitata* en Chile.

LITERATURA CITADA

- Agresti, A. 2013. Categorical Data Analysis. 744 p. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Arita, L. H., and K. Y. Kaneshiro. 1988. Body size and differential mating success between males of two populations of the Mediterranean fruit fly. Hawaii. Pacific Science 42: 3-4.
- Arita, L. H., and K. Y. Kaneshiro. 1989. Sexual selection and lek behavior in the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). Hawaii. Pacific Science 43:2.
- Baker, P. S., A. S. T. Chan and M. A. Jimeno Zavala. 1986. Dispersal and orientation of sterile *Ceratitis capitata* and *Anastrepha ludens* (Tephritidae) in Chiapas, Mexico. Journal of Applied Ecology 23:27-38.
- Beerwinkle, K.R. 2001. An automatic capture-detection, time-logging instrumentation system for boll weevil pheromone traps. Appl. Eng. Agric. 17:893-898.
- Clymans, R., V. Van Kerckvoorde, T. Beliën, D. Bylemans and P. De Clercq. 2020. Marking *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) with Fluorescent Dusts. Insects 2020(11): 152.
- Conde-Blanco, E. A., M. G. Loza-Murguía, L. B. Asturizaga-Aruquipa, D. Ugarte-Anaya y R. Jiménez-Espinoza. 2018. Modelo de fluctuación poblacional de moscas de la fruta *Ceratitis capitata* (Wiedemann 1824) y *Anastrepha* spp (Diptera: Tephritidae) en dos rutas en el municipio de Caranavi, Bolivia. Journal of the Selva Andina Research Society 9(1): 3-24.
- Cuevas A. 2011. Diagnóstico de la demanda de agua e identificación de conflictos socio-ambientales, para la propuesta de criterios de gestión sustentable de los recursos hídricos de la comuna de Pica. Tesis Mg. Universidad de Chile. 203 p. [<http://biblioteca.cehum.org/handle/123456789/768>]
- Deqin, X., Y. Qiumei, F. Junqian, D. Xiaohui, F. Jianzhao, Y. Yaowen, and L. Yongyue. 2016. A multi-target trapping and tracking algorithm for *Bactrocera dorsalis* based on cost models. Comput. Electron. Agr. 123:224–231.
- Ding, W., and G. Taylor. 2016. Automatic moth detection from trap images for pest management. Comput. Electron. Agric. 123:17–28.
- Dyck, V. A., J. Hendrichs, and A. S. Robinson. 2021. Sterile insect technique: principles and practice in area-wide integrated pest management. Taylor and Francis, pp 1–1216.
- Escudero-Colomar, L. A., M. Vilajeliu, and L. Batllori. 2008. Seasonality in the *C. capitata* occurrence of the Mediterranean fruit fly [*Ceratitis capitata* (Wied.)] in the north-east of Spain. Journal of Applied Entomology 132(9-10): 714-721.
- Guarnieri, A., S. Maini, G. Molari, and V. Rondelli. 2011. Automatic trap for moth detection in integrated pest management. Bull. Insectol. 64:247–251.

- Jiang, J.A., C.L. Tseng, F.M. Lu, E.C. Yang, Z.S. Wu, C.P. Chen, H. Lin, K.C. Lin, and C.S. Liao. 2008. A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: a case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Comput. Electron. Agr.* 63:243–259.
- Kalamatianos, R., I. Karydis, D. Doukakis, and M. Avlonitis. 2018. DIRT: The dacus image recognition toolkit. *J. Imaging.* 4 (129). doi:10.3390/jimaging4110129
- Kaspi, R., and B. Yuval. 1999. Lek site selection by male Mediterranean fruit flies. *Journal of Insect Behavior* 12(2): 267–276.
- Lin, L., A. Hedayat and W. Wu. 2012. *Statistical Tools for Measuring Agreement*. 174 p. 1st ed. Springer New York, USA.
- Liquido, N. J., R. T. Cunningham, and L. A. Shinoda. 1991. Host plants of the Mediterranean fruit fly, Diptera: Tephritidae, an annotated world review. *Miscellaneous Publications of the Entomological Society of America*, Number 77. 52 pp.
- Mama Sambo, S., D.R. Togbé, A.A.C. Sinzogan, A. Adomou, H. Aim, E. Bokonon-Ganta, and M. Frida Karlsson. 2019. Habitat factors associated with *Fopius caudatus* parasitism and population level of its host, *Ceratitis cosyra*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 1–13, DOI: 10.1111/eea.12858
- Martins, V. A., L.C. Freitas, M.S. de Aguiar, L.B. de Brisolará and P.R. Ferreira. 2019, November. Deep Learning applied to the Identification of Fruit Fly in Intelligent Traps. In 2019 IX Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC) (pp. 1-8). IEEE. [10.1109/SBESC49506.2019.9046088]
- Miranda, M. Á., C. Barceló, F. Valdés, J. F. Feliu, D. Nestel, N. Papadopoulos, and B. Alorda. 2019. Developing and Implementation of Decision Support System (DSS) for the Control of Olive Fruit Fly, *Bactrocera Oleae*, in Mediterranean Olive Orchards. *Agronomy* 9(10): 620.
- Navarro-Llopis, V., S. Vacas, M. Zarzo, and J. Primo. 2014. Dispersal ability of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae): edge effect in area-wide treatments. *J. Appl. Entomol.* 138(6):403–408. <https://doi.org/10.1111/jen.12029>
- Paranhos, B.J., N.T. Papadopoulos, D. McInnis, C. Gava, F.S.C. Lopes, R. Morelli, and A. Malavasi. 2010. Field dispersal and survival of sterile medfly males aromatically treated with ginger root oil. *Environmental Entomology* 39: 570– 575.
- Philimis, P., E. Psimolophitis, S. Hadjiyiannis, A. Giusti, J.A. Perello, P. Serrat, and P.A. Avila. 2013. A centralized remote data collection system using automated traps for managing and controlling the population of the Mediterranean (*Ceratitis capitata*) and olive (*Dacus oleae*) fruit flies. *Proc. SPIE* 8795: First Int. Conf. Remote Sens. Geoinform. Environ. (RSCy2013):87950X 103.
- Potamitis, I., P. Eliopoulos, and I. Rigakis. 2017. Automated remote insect surveillance at a global scale and the internet of things. *Robotics* 6:19. <https://doi.org/10.3390/robotics6030019>
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- SAG, 2023. Mosca de la fruta. <https://www.sag.cl/ambitos-de-accion/mosca-de-la-fruta>.
- Sciarretta, A., and P. Calabrese. 2018. Development of automated devices for the monitoring of insect pests. *Curr. Agric. Res.* 2019(7): 19–25.
- Shaked, B., A. Amore, C. Iannou, F. Valdés, B. Alorda, S. Papanastasiou, et al. 2017. Electronic traps for detection and population monitoring of adult fruit flies (Diptera: Tephritidae). *J. Appl. Entomol.* 142:43-51.
- Shelly, T. E. 2000. Male signalling and lek attractiveness in the Mediterranean fruit fly. *Animal Behaviour* 60(2): 245-251.
- Shoukry, A., and M. Hafez. 1979. Studies on the biology of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 26: 33-39.
- Tabuchi, K., S. Moriya, N. Mizutani, and K. Ito. 2006. Recording the occurrence of the bean bug *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Heteroptera: Alydidae) using an automatic counting trap. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 50: 123–129.
- Thulasi Priya, C., K. Praveen, and A. Srividya. 2013. Monitoring of pest insect traps using image sensors & Dspic. *Int. J. Eng. Trends Tech.* 4:4088-4093.
- Weldon, C.W., C. Nyamukondiwa, M. Karsten, S.L. Chown, and J.S. Terblanche. 2018. Geographic variation and plasticity in climate stress resistance among southern African populations of *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae). *Sci. Rep.* 8: 1–13.
- Xia, D., P. Chen, B. Wang, J. Zhang, and C. Xie. 2018. Insect detection and classification based on an improved convolutional neural network. *Sensors* 18(12): 4169.
- Yuval, B., R. Kaspi, S. Shloush, and M. S. Warburg. 1998. Nutritional reserves regulate male participation in Mediterranean fruit fly leks. *Ecological Entomol.* 23: 211-215.