



# Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>



## Monitoreo de mosca pinta (Hemiptera: Cercopidae: *Aeneolamia* sp) en cultivo de la caña de azúcar mediante sensores remotos y su posible aplicabilidad para el manejo fitosanitario

Spittlebug (Hemiptera: Cercopidae: *Aeneolamia* sp) monitoring in sugarcane cultivation using remote sensors and its possible applicability for phytosanitary management

Moisés Ulises López-Torres<sup>1</sup>, Miguel Rafael Paniagua-Cienfuegos<sup>2</sup>, Andrés Wilfredo Rivas-Flores<sup>3</sup>, Miguel Ángel Hernández-Martínez<sup>3</sup>

Correspondencia:  
[ulises.lopez@ues.edu.sv](mailto:ulises.lopez@ues.edu.sv)

Presentado: 19 de julio de 2021  
Aceptado: 10 de septiembre de 2021

1 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Tesista.

2 UNIFERSA DISAGRO, Asesor.

3 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Asesor.

### RESUMEN

Con el objetivo de contribuir a la sostenibilidad de los procesos productivos del sector azucarero se busca conocer la aplicabilidad de sensores remotos en términos fitosanitarios. La investigación se llevó a cabo en cantón La Haciendita, municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán, a 280 m s. n. m. , de abril a octubre de 2020. Se evaluó la sensibilidad de dos sensores remotos, uno satelital y otro conectado a un drone, para identificar la respuesta multiespectral del cultivo de caña de azúcar ante diferentes poblaciones de mosca pinta y su respectivo daño. Se seleccionó un lote con presencia del insecto en mención y se definieron puntos fijos de muestreo, en los cuales se contabilizó el número de ninfas y adultos durante cinco fechas con intervalos de 8 días aproximadamente. Se recibieron imágenes sin procesamiento previo generadas por el sensor Sentinel-2 (satelital) e imágenes con procesamiento previo generadas por el sensor SlantRanger© (drone). Para conocer la aplicabilidad de dichas imágenes y diagnosticar la presencia de mosca pinta, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) en los cinco momentos de muestreo para conocer la asociación entre las poblaciones del insecto con los índices de vegetación disponibles, aplicando prueba de correlación de Pearson para indagar la correlación entre ellos. Finalmente, se realizó un análisis epidemiológico para conocer el efecto de la acumulación

del daño de mosca pinta sobre la respuesta del cultivo expresada por los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para ello se utilizó la fórmula de Área Bajo la Curva de Progreso de la Enfermedad. Los índices de NDVI calculados por ambos sensores no fueron útiles para identificar la presencia de mosca pinta y sus diferentes poblaciones en un momento determinado, ya que el cultivo muestra una condición de estrés ante la alteración de diversos factores (bióticos y abióticos), entre ellos, el ataque de mosca pinta y eso limita la aseveración que dicho estrés sea causado por un factor en particular. En los cinco momentos de muestreo no se encontró asociación entre la población de mosca pinta y los índices disponibles, además los valores de correlación fueron sumamente bajos ( $r < 0.5$ ) para ser utilizados como indicadores de presencia del insecto. Sin embargo, se encontró que los índices de NDVI y STRESS utilizados, si fueron influenciados por el daño acumulado que hizo el insecto; a pesar de que las poblaciones disminuyeron, su impacto sobre el cultivo fue evidente.

**Palabras claves:** Sensores remotos, NDVI, mosca pinta, caña de azúcar, monitoreo, drone

### ABSTRACT

In order to contribute to the sustainability of the productive processes of the sugar sector, we seek to know the applicability of remote sensors in phytosanitary terms. The investigation was carried out in La Haciendita canton, Suchitoto municipality, Cuscatlán department, at 280 meters above sea level, from April to October 2020. The sensitivity of two remote sensors, one satellite and the other connected to a drone, was evaluated to identify the multispectral response of the sugarcane crop to different populations of the spittlebug and their respective damage. An allotment with the presence of the insect in question was selected and fixed sampling points were defined, in which the number of nymphs and adults were counted during five dates with intervals of approximately 8 days. Images without pre-processing generated by the Sentinel-2 sensor (satellite) and images with pre-processing generated by the Slantranger sensor (drone) were received. To know the applicability of these images to diagnose the presence of the spittlebug, a Principal Component Analysis was carried out at the five sampling moments to know the association between the insect populations and the available vegetation indices, and a Pearson's correlation to know the correlation between them. Finally, an epidemiological analysis was carried out to know the effect of the accumulation of the spittlebug damage on the response of the crop expressed by the NDVI values, for this the formula of Area Under the Disease Progress Curve was used.

The NDVI indices calculated by both sensors are not useful to identify the presence of the spittlebug and its different populations at a given time, since the crop shows an stress condition due to the alteration of several factors (biotic and abiotic), including the spittlebug attack, and that limits the assertion that such stress is caused by a particular factor. In the five sampling moments, no association was found between the spittlebug population and the available indices, in addition the correlation values were extremely low ( $r < 0.5$ ) to be used as indicators of the insect presence. However, it was found that the NDVI and STRESS indices used were influenced by the accumulated damage that the insect did; even though the populations decreased, its impact on the crop was evident.

**Keywords:** Remote sensors, NDVI, flycatcher, sugarcane, monitoring, drone.

### INTRODUCCIÓN

El cultivo de caña de azúcar es el mayor producto agrícola de la región centroamericana tanto en términos de producción como en términos de exportación (Winkler, 2018). En El Salvador, se cultivan cerca de 80,000 ha con caña de azúcar entre los 6 ingenios activos

actualmente (CONSAA, 2020). Sin embargo, este cultivo es afectado por diversos factores bióticos y abióticos a lo largo de su ciclo productivo, los cuales alteran sus procesos fisiológicos de tal forma que reducen la productividad. Uno de esos factores es el daño de mosca pinta (*Aeneolamia* sp) expresado en pérdidas productivas y económicas, que

alcanzan valores de 5.83 kg az/ton/1 adulto/tallo (CENGICAÑA, 2012) lo cual en El Salvador podría representar pérdidas económicas de USD160/ha (Fabian, H., comunicación personal, 20 de abril de 2019). Este efecto es producto de la poca asertividad sobre las alternativas y momentos de aplicaciones de productos de control, principalmente por la falta de un sistema de monitoreo en campo. En la actualidad, se cuenta con herramientas informáticas que podrían ayudar a monitorear este tipo de fenómenos desde una aplicación virtual con el uso de sensores remotos que muestren el comportamiento de las poblaciones plaga (Olvera Vargas et al., 2015). Sin embargo, en El Salvador aún no se cuenta con la experiencia en el uso y aplicación de estas herramientas por ser nuevas en el mercado.

En el presente, el control de esta plaga se lleva a cabo con los siguientes ingredientes activos: Imidacloprid, Thiamethoxam y Clotianidín, los cuales pertenecen al grupo de los neonicotinoides y que afectan el sistema nervioso central de los insectos (IRAC, 2019; BAYER, 2017). En la época lluviosa se observa la mayor presencia de mosca pinta y su consecuente impacto sobre el desarrollo del cultivo de caña de azúcar, lo cual provoca una intensificación de aplicaciones de insecticidas de forma terrestre y aérea para su control.

Ante esto, se evaluó la relación existente entre la población de mosca pinta y la respuesta del cultivo, medida en forma de estrés por medio de los índices calculados a partir de las imágenes generadas por sensores remotos (Sentinel-2 y drone). El principal objetivo es conocer la aplicabilidad de estos sensores para el monitoreo de *Aeneolamia* sp. en el cultivo de caña de azúcar, lo cual podrá tener un impacto directo en la industria azucarera a través de la toma de decisiones de control fitosanitario, la disminución del efecto sobre los recursos naturales y población colindante en las zonas

productivas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en el cantón La Haciendita, municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán, a una altura de 280 m s. n. m. con coordenadas 13°57'56.21" N y 89°10'41.31" O, y un promedio de lluvias en los últimos cuatro años de 1,773 mm/año. La propiedad cuenta con historial de presencia de mosca pinta, sin embargo, no se tienen registros de poblaciones del insecto. Se cuenta con riego por aspersión y la cosecha se realiza en el mes de diciembre. El área de estudio fue de 3.5 ha.

### Toma de imágenes con DRONE y cámara multiespectral

Se tomaron imágenes con un Drone modelo DJI Matrice 600 Pro, con cámara multiespectral y sensor SlantRanger© para tener mayor detalle de las firmas espectrales por su resolución de 5 cm x 5 cm /pixel. Estos vuelos se realizaron cada 8 días aproximadamente durante los meses de julio - septiembre de forma sincronizada con las fechas de la toma de las imágenes satelitales y los monitoreos de campo.

Con la información de la cámara multiespectral se generaron 8 mapas con su respectivo índice en cada una de las fechas de vuelo y monitoreo, los cuales muestran la condición del cultivo de diferente forma. Los índices comerciales generados fueron:

- YIELD POTENTIAL
- VEGETATION FRACTION
- STRESS
- RED NDVI: equivalente al NDVI. (NIR-RED) / NIR+RED. (Muñoz Aguayo, 2013)
- RED EDGE NDVI: ocupa los valores de los canales b6 (740 nm) y b5 (705 nm).  $RENDVI = (b6 - b5) / (b6 + b5)$  (Marini y

Santamaría, 2019)

- RED EDGE CHLOROPHYLL: ocupa los valores de los canales b7 y b5.
- RECL= (b7/b5)-1. (Marini y Santamaría, 2019)
- GREEN NDVI: este es una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo. GNDVI = (NIR-GREEN) / NIR+GREEN (Díaz, 2015)
- GREEN CHLOROPHYLL INDEX: se usa para estimar el contenido de *clorofila* de las hojas en varias especies de plantas. El contenido de *clorofila* refleja el estado fisiológico de la **vegetación**; disminuye en plantas estresadas y, por lo tanto, puede usarse como un evaluador de la vigorosidad de las plantas. GCI=(NIR/GREEN)-1 (Ramos, 2020)

Los índices YIELD POTENTIAL, VEGETATION FRACTION Y STRESS son generados por el distribuidor de las imágenes, por lo tanto no están disponibles las fórmulas.

Los vuelos se realizaron en el intervalo de 9-11 de la mañana para aprovechar la reflectancia del cultivo.

### **Muestreo de mosca pinta en campo y variables a evaluar**

Se establecieron 20 puntos fijos de monitoreo en los cuales se cuantificaron los índices poblacionales de mosca pinta (*Aeneolamia* sp), calculados por medio de la siguiente fórmula: UB/tallo= (# ninfas + #adultos) / tallos/5m. Un punto de muestreo (punto 20) recibió tratamiento químico previo al inicio de las lecturas para control del insecto en estudio, de tal forma que dicho punto se mantuvo con presencia mínima del insecto durante las evaluaciones; esto fue para conocer el comportamiento del cultivo sin la presión del insecto en mención.

En el lote de estudio se definieron seis brechas con tres puntos de muestreo en cada una y dos brechas con un punto en cada una. Cada punto consistió en 5 m en los cuales se cuantificó la población total de tallos y del insecto en fase de ninfa y adulto. Cada punto de monitoreo fue definido por dos estacas y listones en los extremos, de tal forma que el punto fuese visible.

El conteo de mosca pinta se realizó en todos los tallos y en todas sus partes, buscando incluso en medio de las hojas. Esta actividad se realizó en las horas frescas (6-8 a.m.) lo cual coincide con una menor actividad del insecto en su estadio adulto y por lo tanto mayor facilidad de conteo. Para el monitoreo de las ninfas no se retiró la bajera del cultivo, con el objetivo de no alterar el medio de vida del insecto y ejercer un efecto sobre su comportamiento normal. Fueron consideradas las ninfas ubicadas en los tallos, raíces y suelo cercano a los tallos (15 cm).

Se midió la población del cultivo; para ello se ocupó el número de tallos/punto y se extrapoló a número de tallos/pixel. En cada punto se obtuvo el número de tallos/5 m<sup>2</sup> y posteriormente se expresó en tallos/m<sup>2</sup>.

Tanto los muestreos de campo y la toma de imágenes con el dron se realizó en un máximo de 3 días de desfase de la generación de imagen satelital.

Los puntos de monitoreo de plagas georreferenciados fueron interpuestos con los mapas obtenidos del satélite y el dron para conocer los valores de NDVI, Índice Diferencial Normalizado de Agua en Agricultura (NDWI) y sus respectivos índices por metro cuadrado respectivamente; con esto se construyó la base de datos para el análisis estadístico.

### **Fase de laboratorio**

Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 proporcionadas por un proveedor privado,

las cuales estuvieron disponibles 2 veces por semana (temporalidad), con una resolución espacial de 10x10 m, resolución espectral de 665-842 nm y resolución radiométrica de 12 Bits, a las cuales se les aplicó una corrección atmosférica DOS, mediante Semiautomatic

Clasificación Plugin (SCP) (Congedo, 2021), como herramienta de procesamiento de imágenes dentro del software QGIS.

A partir de las imágenes satelitales se calculó el índice NDVI SENTINEL (llamado así de aquí en adelante), por medio de la fórmula siguiente:

### **Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) mediante el modelo:**

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{RED}) / \text{NIR}+\text{RED} \text{ (Muñoz Aguayo, 2013)}$$

La escala va de -1 a 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación.

Los vuelos de drone se realizaron durante 5 semanas, coincidiendo con los muestreos de campo de la plaga en estudio y la generación de imágenes satelitales por medio del Sentinel-2.

La unidad de área definida para calcular los valores de los diferentes índices generados con el drone fue de 1 m<sup>2</sup>, para lo cual fue necesario obtener la suma y el promedio de los cuatro píxeles (0.25m<sup>2</sup> c/u) inmediatos a los puntos de muestreo, utilizando el algoritmo de Estadística Zonal disponible en QGIS. En cuanto a las imágenes satelitales Sentinel-2, se ocupó la unidad de medida de 100 m<sup>2</sup> (un píxel), obteniendo de él su valor específico de cada punto.

### **Tabulación de datos presentes en píxeles de imágenes satelitales y drone**

Para implementar los análisis estadísticos requeridos en el estudio fue necesario ordenar

y sistematizar la información de la ubicación geográfica (shape file) y respuesta espectral evaluada en cada imagen, en cada punto de muestreo (20 puntos) en una hoja electrónica (tabla) con los puntos y su respectiva respuesta (variable dependiente) que luego fue procesada en el programa estadístico SPSS.

Se asignó una nomenclatura a cada una de las imágenes agregándosele un código que permitió ordenar la secuencia temporal de las imágenes, esto facilitó el procesamiento automatizado de los datos en el software SIG y la posterior selección de los valores de los píxeles pertenecientes a cada punto de muestreo.

Un ejemplo del ordenamiento de dato se muestra en la tabla 1, que es un extracto del total de índices procesados en las diferentes fechas

La columna "ID\_PUNTO DE MUESTRO" representó a cada punto de muestreo en campo presente en cada escena de la imagen procesada, y los valores presentes en cada

**Tabla 1.**

*Ejemplo de ordenamiento de los datos extraídos de las imágenes comerciales*

ID_PUNTO DE MUESTRO	NDVI SENTINEL1	RED NDVI1	YIELD1	VEG FRACTION1	STRESS1
1	0.43	0.42	160	215	58
2	0.59	0.46	180	220	60
3	0.57	0.55	170	217	65

escena fueron representados en forma de columna como es el caso para NDVI SENTINEL, YIELD, VEG FRACTION y así sucesivamente; estas columnas representaron también cada escena capturada para cada fecha de análisis. Con la tabla completada con los valores obtenidos se procedió a realizar los análisis estadísticos mencionados en el apartado correspondiente.

### **Análisis estadístico**

El análisis estadístico constó de dos fases:

La primera consistió en un Análisis de Componentes Principales la cual pertenece a un modelo multivariante. Esta técnica permite identificar las variables que explican la mayor parte de la variabilidad total contenida en los datos, explorar las correlaciones entre variables y reducir la dimensión del análisis al combinar todas las variables en nuevos índices (variables sintéticas); cada una de estas nuevas variables constituyen una componente principal (CP). Los resultados del PCA se pueden visualizar en un gráfico denominado Biplot, el cual permite representar, en un plano óptimo para el estudio de variabilidad, las diferencias entre los sitios del lote y las variables que mejor explican las principales variaciones (Córdoba *et al.*, 2011).

Esta fase fue parte de un análisis exploratorio sobre la respuesta del cultivo a los ataques de mosca pinta por medio de los sensores e índices calculados, observando el porcentaje de variabilidad explicada por cada una de las componentes.

La segunda fase constó de la prueba de correlación de Pearson, con la cual se buscó la relación ( $r$ ) que existe entre la población del insecto en estudio y los índices calculados, de tal forma que los sensores e índices puedan servir como herramientas para la detección de poblaciones de mosca pinta por su efecto sobre la planta en forma de estrés.

Además, se construyó una comparación gráfica del comportamiento de los puntos de muestreo y la población de mosca pinta para comprender de mejor forma el efecto del segundo en los primeros.

Finalmente se realizó un análisis epidemiológico para comprender el efecto de la acumulación del daño de mosca pinta sobre los valores de NDVI y STRESS calculados por ambos sensores. Para ello se calculó el Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad, la cual también puede utilizarse en el estudio de plagas insectiles.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Asociación entre los sensores (Sentinel-2 y SlantRanger©) y mosca pinta**

Según el Análisis de Componentes Principales, la variación de los datos obtenidos en los cinco momentos de muestreo es explicada en las dos primeras componentes (Tabla 2). Además, el índice de NDVI generado a partir del sensor Sentinel-2 mostró una aparente asociación con el índice U.B/m en los cinco momentos de muestreo, ya que estuvieron relativamente cerca entre ellos en los momentos 1, 2, 4 y 5, y relativamente distantes del resto de índices (Figura 1-4). Sin embargo, la asociación entre estas variables no fue constante, lo cual sugiere que este sensor no logra representar el comportamiento del cultivo de forma acertada a lo largo del tiempo. A pesar de ello, la asociación encontrada no es correcta, porque significa que a medida se tienen valores altos de mosca pinta, también se tienen valores altos de NDVI, algo incorrecto bajo el supuesto de que una planta afectada por cualquier variable debe presentar valores bajos de NDVI como una respuesta de estrés.

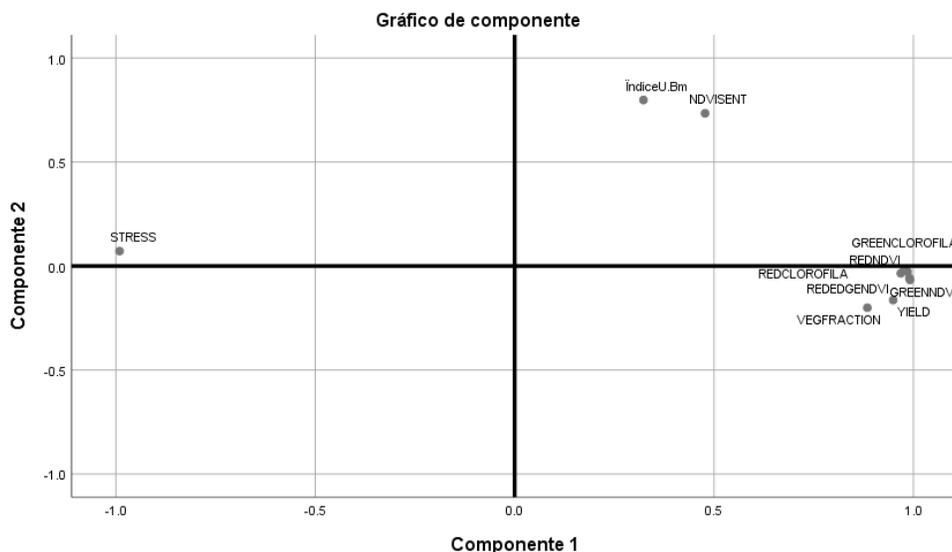
**Tabla 2.**

Variación explicada por cada componente en los cinco momentos de muestreo

% de varianza explicada por cada componente					
	Momento 1	Momento 2	Momento 3	Momento 4	Momento 5
Componente 1	78.23	77.72	78.11	75.95	78.32
Componente 2	12.57	10.77	9.1	10.8	12.11
Suma	90.8	88.49	87.21	86.75	90.43

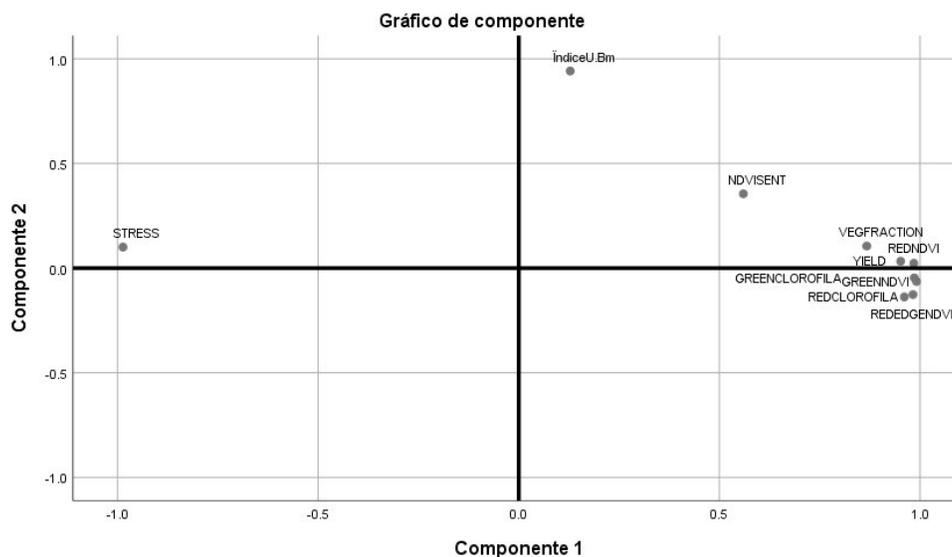
**Figura 1.**

Análisis de Componentes Principales en el momento 1



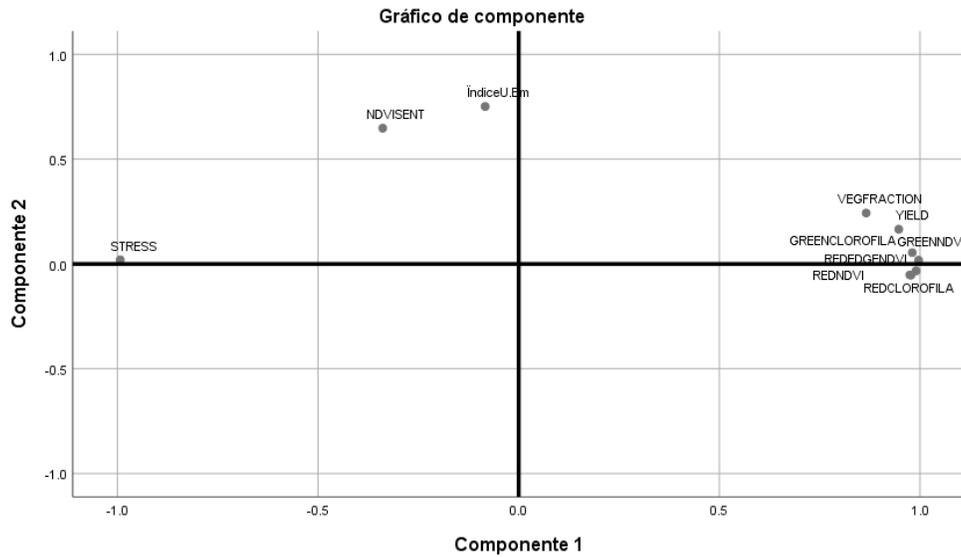
**Figura 2.**

Análisis de Componentes Principales en el momento 2



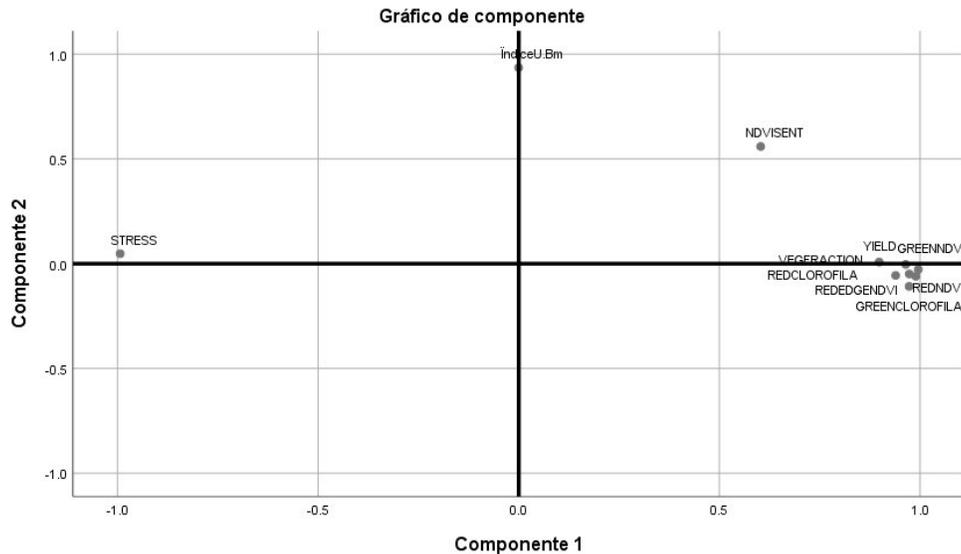
**Figura 3.**

*Análisis de Componentes Principales en el momento 4*



**Figura 4.**

*Análisis de Componentes Principales en el momento 5*



En los gráficos de PCA se observó poca asociación entre los índices NDVI calculados por los dos sensores (Sentinel-2 y SlantRanger®), los cuales deberían estar fuertemente asociados por representar el mismo estado de la planta, sin embargo, la poca asociación puede estar influenciada por la diferencia de resolución entre ellos, ya que el área de uno es de 100

m<sup>2</sup>/pixel (Sentinel-2) y el otro 0.25 m<sup>2</sup>/pixel (SlantRanger®).

Por el contrario, no existe asociación entre los índices comerciales de vegetación generados a partir del sensor SlantRanger® (drone) y los valores de población de mosca pinta, ya que dichos índices fueron representados de forma constante en una sola componente,

relativamente alejados del índice U.B/m que se encuentra representado en la segunda componente. Esto sugiere que dichos índices tampoco son capaces de diagnosticar la presencia de mosca pinta en el cultivo de caña de azúcar.

Lo anterior sugiere que a pesar de ocupar un sensor de alta resolución, no es posible detectar la respuesta de la planta ante la presencia de mosca pinta (ninfas y adultos), lo cual puede estar influenciado por la uniformidad de la coloración amarilla a causa de la movilidad de los adultos de dicho insecto o la presencia de otras variables precursoras de estrés (falta o exceso de humedad, presión de malezas, desbalance nutricional, entre otros). En contraste a esto, Lobo (1995) encontró diferencia entre las firmas espectrales de las plantas sanas y las afectadas por barrenador en caña de azúcar; las hojas dañadas tenían valores de firma espectral por encima de las hojas sanas, sin embargo, dicho trabajo estuvo favorecido por contar con mediciones in situ con un espectroradiómetro GER-1500 (300-950 nm) a una distancia de 30 cm de las hojas en estudio, muy diferente al presente trabajo en el cual los vuelos de drone se hicieron a 50 m de altura..

Los sensores ocupados no permiten detectar la presencia de mosca pinta cuando los índices están por debajo del umbral de decisión más utilizado en el rubro cañero de El Salvador (0.4-0.6 U.B/tallo), lo cual se convierte en una desventaja de la tecnología por no permitir tomar decisiones de manejo oportunas. Probablemente exista relación entre los índices cuando las poblaciones de mosca pinta sean mayores, sin embargo, eso representaría una herramienta obsoleta que daría alertas de control cuando ya se tengan pérdidas económicas considerables, como las reportadas por CENGICAÑA (2012).

Las plantas de caña de azúcar expresan estrés ante el ataque o cambios ocasionados por

factores bióticos (insectos, enfermedades, malezas) y abióticos (falta o exceso de humedad, falta o exceso de nutrientes, altas temperaturas), los cuales afectan la reflectancia de su follaje generando valores de NDVI más bajos comparados con plantas sanas, como lo observado en campo. El índice NDVI es un valor numérico que representa el vigor vegetativo de una planta, expresado en valores de cero a uno, siendo cero la representación de una planta con poco follaje verde y 1 la representación de una planta con mucho follaje verde. Con base a este índice se pueden calcular otros que muestran el estrés de una planta, como el caso del índice STRESS ocupado en este trabajo. Sin embargo, según los datos generados en este trabajo no se puede discriminar cuál es el factor que provoca el estrés en un momento determinado en el cultivo de caña de azúcar por medio del uso de estos sensores. Por lo tanto, es necesario tener precaución al momento de observar imágenes, mapas o índices basados en valores de NDVI, ya que las alertas pueden estar dadas por diferentes factores y no por la acción de uno en particular. En ese sentido, este tipo de herramientas pueden utilizarse para detectar anomalías en los cultivos y justificar visitas de campo que afirmen cual es el factor que la está provocando. Esto coincide con lo reportado por Soledad y Federico (2009), Ponvert y Lau (2013), y Zenteno *et al.* (2017) quienes mencionan que este tipo de sensores pueden ser utilizados para el monitoreo del cultivo en todo el ciclo vegetativo, observar las áreas con estrés ocasionado por deficiencias nutricionales, sequía, rendimiento de campo y/o la acción de agentes fitosanitarios (insectos, enfermedades, malezas).

Apesar de que mosca pinta es un insecto gregario, es muy móvil dentro de un campo cañero por efecto de su búsqueda de apareamiento y comida, lo cual provoca que los daños causados sobre el cultivo sean generalizados. Esto

ocasiona que el amarillamiento (comúnmente llamado “quemado”) sea en manchas grandes, disminuyendo la capacidad de diferenciar partes del área de cultivo con diferentes niveles de amarillamiento. Esto puede ser lo que provoca que una imagen satelital no sea capaz de diferenciar el estrés causado por diferentes poblaciones de mosca pinta, ya que sus píxeles son de 10x10 m y pueden contener información de plantas verdes y amarillas. Por lo contrario, las imágenes generadas por el drone tienen mayor resolución y permiten conocer de mejor forma el comportamiento del cultivo, sin embargo, estos índices no mostraron ninguna asociación con las poblaciones de mosca pinta, lo cual sugiere que los índices de NDVI de ambos sensores no son capaces de diagnosticar las poblaciones de dicho insecto, pero sí útiles para detectar áreas anómalas dentro de un lote que pudiesen ser causadas por diferentes plagas, principalmente las que dañan directa o indirectamente a las hojas de caña de azúcar (Olvera Vargas *et al.*, 2015).

### **Correlación entre la población de mosca pinta y los índices de NDVI y STRESS**

Por la poca asociación que mostraron algunos índices en el PCA se realizó una prueba de regresión lineal múltiple, con el objetivo de identificar cuáles fueron los índices que se asocian de mejor forma. Se observó que los valores más altos de correlación ( $r$ ) los presentó la relación entre mosca pinta y el NDVI calculado por el satélite en los momentos 1, 2, 4 y 5 con valores de 0.5, 0.19, 0.09 y 0.32 respectivamente (Tabla 3), significando que a medida que se tienen mayores valores de mosca pinta también incrementan los valores de NDVI como una relación proporcional, lo cual realmente debería ser una relación inversamente proporcional porque a medida que se tiene mayor presencia de mosca pinta causando daño, la planta debería responder con valores bajos de NDVI.

También, se observó que en el momento 3 se tuvo la mayor correlación entre mosca pinta y el índice de Stress ( $r=0.42$ ), lo cual es correcto porque a medida que incrementan los valores de mosca pinta incrementa el índice de estrés como respuesta al daño ocasionado en los primeros dos momentos, esto coincide con lo mencionado por Franklin *et al.* (1995) sobre el amarillamiento del follaje y disminución de reflectancia expresada por las plantas cuando son defoliadas por insectos; o la diferencia colorimétrica observada en bosques como efecto del estrés causado por plantas parásitas (León Bañuelos, 2019). Lo anterior, sugiere que estos sensores podrían utilizarse para conocer los lotes que tengan alta incidencia de mosca pinta o un alto daño acumulado de varias semanas de infestación, al igual que lo reportado por Berrio *et al.* (2015), sin embargo, esto provocará una toma de decisiones poco acertada para el manejo de dicho insecto, ya que cuando se observe el daño por medio de las imágenes ya se tendrán pérdidas económicas altas.

Al considerar los índices de NDVI calculados por ambos sensores, el índice de STRESS y las poblaciones de mosca pinta, se graficó el comportamiento de los valores promedios de todos los puntos, con el objetivo de confirmar la relación entre ellos. Con ello, se evidenció que a pesar de que las poblaciones de mosca pinta mostraron una disminución constante durante los cinco momentos, los índices de NDVI y STRESS calculados con el drone fueron casi constantes, mostrando que no son afectados por el comportamiento de las poblaciones de mosca pinta; además, se observó que el índice NDVI calculado por el satélite fue más variable, y mostró mayores valores cuando también habían mayores valores de mosca pinta (Figura 5).

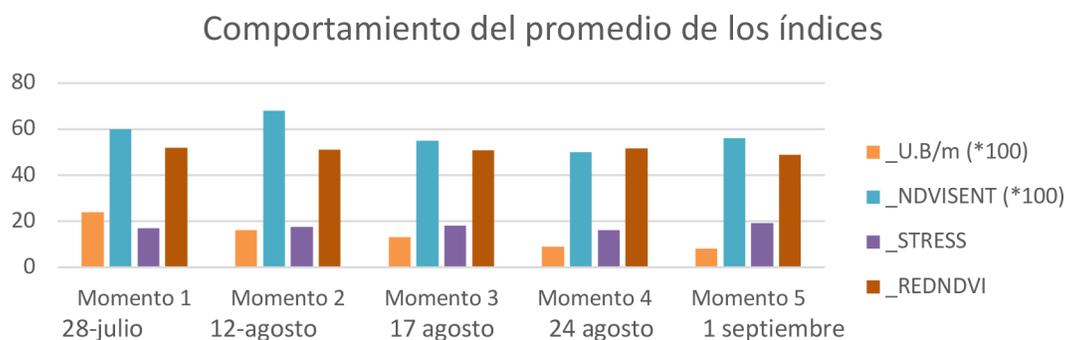
**Tabla 3.**

Cuadro resumen de la correlación entre unidades biológicas de mosca pinta y los índices de vegetación

CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE UNIDADES BIOLÓGICAS (U.B/M) Y LOS ÍNDICES		Fecha 1	Fecha 2	Fecha 3	Fecha 4	Fecha 5
VARIABLE(ÍNDICE)	NDVI SENTINEL	0.5	0.19	-0.16	0.09	0.32
	YIELD	0.25	0.15	-0.3	-0.04	0.01
	VEG FRACTION	0.24	0.2	-0.22	-0.02	0.02
	STRESS	-0.25	-0.05	0.42	0.09	0.02
	RED NDVI	0.27	0.12	-0.42	-0.1	-0.04
	RED EDGE NDVI	0.26	0.03	-0.44	-0.1	-0.03
	RED CLOROFILA	0.2	0.03	-0.41	-0.09	-0.02
	GREEN NDVI	0.26	0.08	-0.39	-0.05	-0.02
	GREEN CLOROFILA	0.27	0.1	-0.33	-0.01	-0.08

**Figura 5.**

Comportamiento de los promedios de los índices



### Análisis epidemiológico entre la población de mosca pinta y los índices de NDVI y STRESS

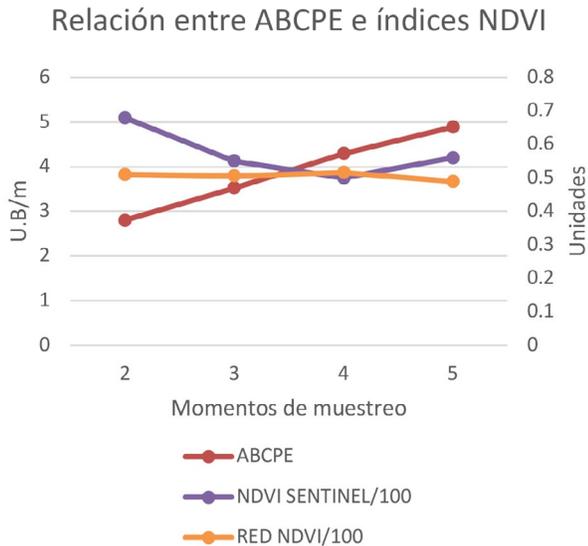
Sin embargo, se hizo el ejercicio de ocupar los valores de mosca pinta para calcular el Área Bajo la Curva de Progreso de la Enfermedad (ABCPE, aunque realmente se usa para enfermedades) para conocer si la acumulación del daño ocasionado por la presencia del insecto tuvo efecto sobre el comportamiento de los índices de NDVI y STRESS al paso del tiempo. Al evaluar dicho comportamiento con los valores promedios de los 20 puntos, se observó que el NDVI calculado con el satélite

disminuyó hasta el momento 4 (en el momento 5 subió) a medida incrementó el ABCPE, lo cual significa que toda el área sometida al estudio expresó el daño ocasionado por la acumulación del mismo. De igual forma, el NDVI calculado con el drone mostró un comportamiento levemente descendente durante los cinco momentos (Figura 6). Por el contrario, el índice STRESS mostró una tendencia ascendente a medida incrementó el ABCPE, lo cual sugiere que el cultivo expresó mayor estrés cuando el daño de la mosca se fue acumulando (Figura 7). Lo anterior, es confirmado con la relación entre el ABCPE y la frecuencia absoluta de las poblaciones de mosca pinta, las cuales son

inversamente proporcionales, mostrando que a pesar de la disminución de las poblaciones del insecto en el tiempo, la acumulación del

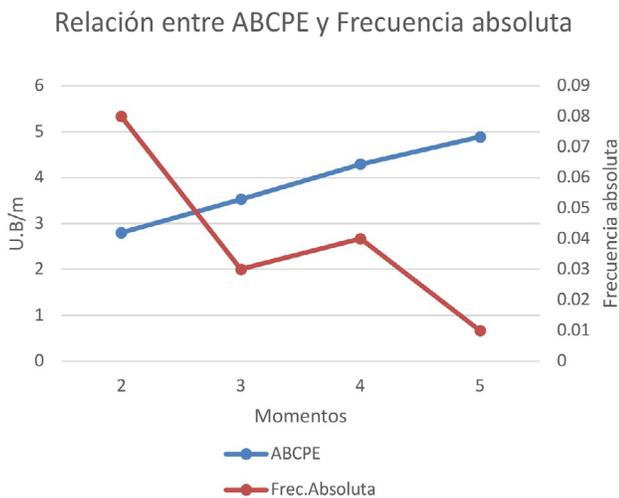
**Figura 6.**

Relación entre ABCPE e índices NDVI calculados por los dos sensores



**Figura 8.**

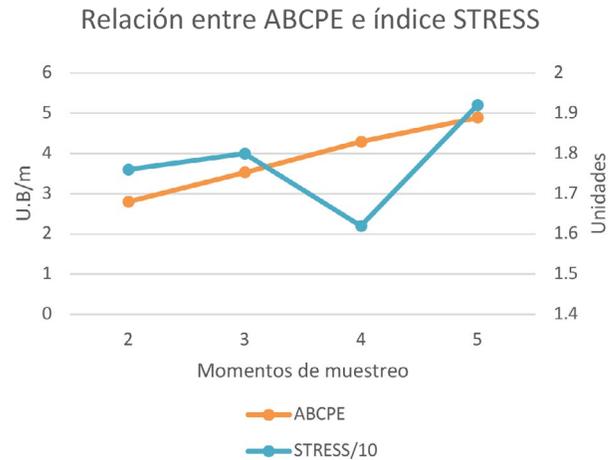
Relación entre ABCPE y la frecuencia absoluta de las poblaciones de mosca pinta



daño que este ocasiona es capaz de causar estrés en el cultivo y provocar valores bajos de NDVI (Figura 8).

**Figura 7.**

Relación entre ABCPE e índice STRESS



### Relación espacial de la población de mosca pinta y los índices NDVI y STRESS

En los mapas de distribución espacial no se encontró concordancia entre las poblaciones de mosca pinta y los índices de NDVI calculados por los dos sensores, y el de STRESS. De forma general, se observó que los puntos con mayores poblaciones de mosca pinta tuvieron los valores más altos de NDVI, excepto el punto 20 (testigo) que en la mayoría de muestreos mostró altos valores de NDVI ante la nula presencia de mosca pinta. Sin embargo, a pesar de que algunos puntos tuvieron buena relación, ninguno de los índices fue constante en los cinco momentos.

La mínima relación entre los índices y las poblaciones de mosca pinta pueden ser efecto de la poca especificidad de los valores, ya que éstos son resultado de la reflectancia de un grupo de hojas de diferentes cepas y no de hojas o cepas individuales, lo cual coincide con lo encontrado por Blanco Rodríguez *et al.* (2014) al relacionar niveles de degradación de pastos con los valores de NDVI.

Todo lo anterior, demuestra que los índices de vegetación (NDVI) no pueden diagnosticar la población de mosca pinta por medio del daño ocasionado en las plantas, lo cual se convierte en limitante para utilizar estas tecnologías para tal objetivo. En ese sentido, por el momento no se puede sustituir el monitoreo manual de campo, por lo que se deben fortalecer las capacidades de monitoreo y diagnóstico en el sector azucarero, así como incrementar su importancia ante los tomadores de decisiones para invertir más en dichas labores.

AUVSI (2013) menciona que entre las aplicaciones más generalizadas de los drones en la agricultura se encuentran: manejo eficiente del agua, tratamientos localizados de herbicidas, uso óptimo de fertilizantes, detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos, supervisión de áreas fumigadas, entre otros. Sin embargo, a pesar de lo anterior y de la actual oferta de servicios de monitoreo de cultivos mediante imágenes satelitales o imágenes generadas por drones, se sugiere utilizar esta tecnología para monitorear anomalías en el cultivo pero sin afirmar que sean por efecto de plagas.

A pesar de la poca relación encontrada entre las variables, el uso de imágenes multiespectrales generadas por satélites o drones seguirá tomando importancia en el manejo agronómico de los cultivos, entre ellos, caña de azúcar, ya que son herramientas que permiten acelerar la toma de decisiones ante una condición adversa de campo, así como se ha implementado en los segmentos de densidad del cultivo, vigor vegetal, nivel de madurez y aprovechamiento de los fertilizantes aplicados (Kharuf Gutiérrez, 2018); por lo tanto, será necesario seguir investigando sobre esta tecnología para encontrar la mejor forma de incluirla en los procesos agrícolas de los ingenios azucareros y/o productores.

## **Importancia económica del uso de la tecnología para el manejo de mosca pinta en caña de azúcar**

Al no encontrarse asociación entre variables en cada momento de muestreo, el uso de esta tecnología no se justifica económicamente para tomar decisiones de control de mosca pinta de forma correctiva, sin embargo, se podría justificar si se utiliza como una herramienta de monitoreo general durante todo el ciclo del cultivo, para detectar anomalías provocadas por la variación de cualquier factor biótico o abiótico, así como para identificar los lotes que probablemente tuvieron daño de mosca pinta en un año en particular y programar con base en ello la aplicación de insecticidas en los años futuros. Cabe mencionar que el interés de usar estas tecnologías para monitorear mosca pinta, es por la problemática de no tener suficiente personal que realice dicha actividad en campo en un período corto (época lluviosa).

Estas herramientas podrían ser útiles para conocer los lotes más infestados en un ciclo de cultivo por medio de la acumulación de daño, y que eso serviría como base para la toma de decisiones de los ciclos futuros en cuanto a la implementación de programas de manejo integrado de la plaga desde el inicio del ciclo vegetativo. Esto tendría un impacto positivo sobre la economía de los productores porque se reducirían las pérdidas económicas de los ciclos futuros por medio del manejo de la plaga; además, de brindar información que permita tomar decisiones de control, realizando solamente las aplicaciones de insecticidas que sean justificadas por medio de los muestreos digitales o manuales.

Para ello, es necesario estar consciente que en el año uno no se tendrá éxito en la detección de la aparición de la plaga, pero servirá para hacer mapas de manejo del siguiente año. Esta actividad (obtención y análisis de imágenes)

deberá ser acompañada de la visita técnica de campo a los lugares que representen alertas.

Esta actividad contribuirá a disminuir el impacto de la poca mano de obra disponible para el monitoreo de mosca pinta en caña de azúcar, ya que esto genera que los responsables del manejo de las fincas realicen aplicaciones de insecticidas de forma preventiva o programada, pero sin la base numérica que registre la presencia y/o daño de este insecto. Ante esto, la utilización de estas herramientas permitirá realizar una mejor selección de los lotes que deberán ser aplicados con insecticidas en los próximos años (si las condiciones climáticas son similares) y así, disminuir la cantidad de aplicaciones que tradicionalmente se realizan. Lo anterior, muestra que el uso de este tipo de tecnologías (Teledetección, Fotogrametría, Sistemas de Información Geoespacial) es parte de la optimización de los recursos dentro de un plan de agricultura sostenible (Lárraga Altamirano, *et al.*, 2019), lo cual debe ser implementado por el sector cañero del país para mejorar la sostenibilidad de sus procesos agrícolas en términos sociales, ambientales y económicos.

## CONCLUSIONES

La relación encontrada entre mosca pinta y los índices comerciales generados a partir del sensor SlantRanger© (drone) y Sentinel-2 (satelital) es baja, de tal forma que ninguno de ellos mostró una relación suficientemente alta para servir como predictor del comportamiento del cultivo ante el ataque de mosca pinta en un momento determinado, sin embargo, los índices NDVI SENTINEL, RED NDVI y STRESS podrían servir para conocer el daño acumulado del insecto en mención y ser ocupado para su respectivo manejo en los ciclos siguientes

La precisión de los sensores remotos para la detección de mosca pinta en momentos

específicos es muy baja, siendo incapaces de identificar que dicho insecto sea el causante de amarillamiento (estrés) en caña de azúcar. Sin embargo, los índices de NDVI y STRESS pueden ser utilizados para identificar lotes que han sufrido el ataque de mosca pinta de forma acumulada.

Los productos comerciales evaluados no son sensibles para la detección de mosca pinta pero sirven para observar anomalías en campo. Por lo tanto, podrían utilizarse como herramientas de monitoreo del cultivo y generar alertas de las zonas anormales que requieran visitas de campo.

A pesar de no ser herramientas que permiten tomar decisiones de manejo inmediatas, podrían ser alternativas de monitoreo y diagnóstico que, aparte de monitorear la condición general del cultivo, permitan diagnosticar áreas que requieran ser tratadas en las siguientes temporadas.

Las nuevas tecnologías sobre teledetección tienen limitantes, entre ellas, la incapacidad de identificar la presencia temprana de plagas y enfermedades en un cultivo por medio de su respuesta expresada en índices de NDVI y sus derivados. Por lo tanto, aún no se puede sustituir el monitoreo manual para la toma de decisiones de control fitosanitario del cultivo.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de El Salvador, por fortalecer las capacidades técnicas, analíticas y de gestión a través de las clases y procesos brindados.

A los Ingenieros asesores Miguel Paniagua, Andrés Rivas, Miguel Hernández y Abel Argueta por el acompañamiento durante el proceso de investigación

A Ingenio El Ángel, por la oportunidad laboral durante la cual se desarrolló este trabajo de investigación, sirviendo de base técnica y

metodológica para lograr el resultado esperado.

A los Ingenieros Víctor López y Henry Fabián de Ingenio El Ángel, por haber brindado el apoyo y espacio necesario para desarrollar el estudio de la maestría y el proceso de tesis respectivo.

A representantes de las compañías AGROINSIDER, DISAGRO Y DIAGRI, por haber puesto a disposición algunas de sus herramientas, las cuales fueron necesarias para la realización de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

AUVSI (2013). Citado por Acosta Henríquez, GF y Mendoza Torres, CM. (2017). Aplicación de los drones en la agricultura. El Salvador. Anuario de investigación 2017/ vol. 6/ ISSN 2227-4235. Universidad Católica de El Salvador. P. 351-365.

BAYER. 2017. Seguridad de los insecticidas neonicotinoides para las abejas. (En línea). S.I. BeeInformed No.3. 16 p. Consultado el 30 de septiembre de 2021. Disponible en [https://www.cropscience.bayer.com/sites/cropscience/files/inline-files/BEEINFORMed\\_3\\_Bee\\_Safety\\_of\\_Neonicotinoids\\_\\_Spanish-j4qsl75i\\_0.pdf](https://www.cropscience.bayer.com/sites/cropscience/files/inline-files/BEEINFORMed_3_Bee_Safety_of_Neonicotinoids__Spanish-j4qsl75i_0.pdf)

Berrío, VA; Mosquera, J; Alzate, DF. 2015. Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. (En línea). Colombia. Universidad de Pamplona. 14 p. Consultado el 22 de enero de 2020. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/319853440\\_USO\\_DE\\_DRONES\\_PARA\\_EL\\_ANALISIS\\_DE\\_IMAGENES\\_MULTIESPECTRALES\\_EN\\_AGRICULTURA\\_DE\\_PRECISION](https://www.researchgate.net/publication/319853440_USO_DE_DRONES_PARA_EL_ANALISIS_DE_IMAGENES_MULTIESPECTRALES_EN_AGRICULTURA_DE_PRECISION)

CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la caña de azúcar). 2012. El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. (En línea). Guatemala. 512 p. Consultado el 11 de febrero de 2020. Disponible

en [https://www.google.com/search?sxsrf=ACYBGNQfkpuCbov6g08rF\\_-fpJqxEdlnaQ%3A1575305280710&ei=QEDIXcT-9KqGd5wKavI8Q&q=perdidas+economicas+en+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar+por+plagas+CENGICA%C3%91A+pdf&oq=perdidas+economicas+en+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar+por+plagas+CENGICA%C3%91A+pdf&gs\\_l=psy-ab.3...26050.27686..27961...0.2..0.138.1217.1j9.....0....1.gws-wiz.....0i71j35i304i-39j33i10.1Ige5dxhjik&ved=0ahUKEw-jEna29tZfmAhWhzIkKHRreAwIQ4dUD-CAo&uact=5](https://www.google.com/search?sxsrf=ACYBGNQfkpuCbov6g08rF_-fpJqxEdlnaQ%3A1575305280710&ei=QEDIXcT-9KqGd5wKavI8Q&q=perdidas+economicas+en+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar+por+plagas+CENGICA%C3%91A+pdf&oq=perdidas+economicas+en+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar+por+plagas+CENGICA%C3%91A+pdf&gs_l=psy-ab.3...26050.27686..27961...0.2..0.138.1217.1j9.....0....1.gws-wiz.....0i71j35i304i-39j33i10.1Ige5dxhjik&ved=0ahUKEw-jEna29tZfmAhWhzIkKHRreAwIQ4dUD-CAo&uact=5)

Congedo, L. 2021. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. Journal of Open Source Software, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.

CONSAA (Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera). 2020. Información CONSAA: toneladas por manzana zafra 19/20. El Salvador. Sistema informático Ingenio El Ángel.

Córdoba, M; Balzarini, M; Bruno, C; Costa, JL. 2011. Análisis de componentes principales con datos georeferenciados: Una aplicación en agricultura de precisión. Argentina. Rev. FCA UNCUYO. 44(1). P. 27-39.

Díaz García Cervigón, JJ. 2015. Estudios de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión. Madrid. ESP. Tesis. M.Sc. Universidad Complutense de Madrid.

Franklin *et al.*, (1995). Citado por Álvarez Taboada MF; Lorenzo Cimadevila, H; Rodríguez Pérez, JR; Picos Martín, J y Valero Gutiérrez del Olmo, E. 2005. Detección de áreas forestales afectadas por el ataque de insectos empleando teledetección

- y sistemas de información geográfica. Aplicación a las masas de Eucalipto afectadas por *Gonipterus Scutellactus* en Galicia. España. 7 p.
- IRAC (Comité de Acción contra la Resistencia a Insecticidas). 2019. Clasificación del modo de acción de insecticidas y acaricidas. (En línea). España. 28 p. Consultado el 26 de noviembre de 2019. Disponible en [https://www.google.com/search?sxsrf=ACYBGNR-jFuzljhzN2EPQA2za79USYeFewg%3A1574800961944&ei=QY7dXeyGOYvl-5gKe95qQBw&q=irac+espa%C3%B1a&oeq=IRAC+esgs\\_l=psy-ab.3.0.0j0i203j0j0i203i2j0i22i30i2j0i22i10i30j0i22i30j0i22i10i30.221840.223838..225751...0.2..0.168.936.0j7.....0.....1.gws-wiz.....0i71j35i39j0i67j0i131j0i20i263j0i10j0i10i203.rCmXfN-VdJJ4](https://www.google.com/search?sxsrf=ACYBGNR-jFuzljhzN2EPQA2za79USYeFewg%3A1574800961944&ei=QY7dXeyGOYvl-5gKe95qQBw&q=irac+espa%C3%B1a&oeq=IRAC+esgs_l=psy-ab.3.0.0j0i203j0j0i203i2j0i22i30i2j0i22i10i30j0i22i30j0i22i10i30.221840.223838..225751...0.2..0.168.936.0j7.....0.....1.gws-wiz.....0i71j35i39j0i67j0i131j0i20i263j0i10j0i10i203.rCmXfN-VdJJ4)
- Kharuf Gutierrez, S. 2018. Análisis de imágenes multiespectrales de sembrados de caña de azúcar adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. (En línea). Cuba. Tesis. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. 112 p. Consultado el 16 de julio de 2021. Disponible en <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/10757/Samy%20Kharuf%20Gutierrez..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lárraga Altamirano, HR; Piedad Rubio, AM; Hernández López, DR y Guerrero Durán, EH. 2019. Modelo de clasificación espacial de textura aplicada a unidades de vegetación. (En línea). México. 11 p. Consultado el 19 de julio de 2021. Disponible en <https://www.eumed.net/rev/tectzapic/2019/02/unidades-vegetacion.pdf>
- León Bañuelos, LA. 2019. Análisis de la distribución espacial de *Arceuthobium globosum* implementando teledetección en el área de protección de flora y fauna nevado de Toluca. México. Tesis. Universidad Autónoma del estado de México. 172 p.
- Lobo, 1995. Citado por Olvera Vargas, LA; Galindo Mendoza, MG; Aguirre Gómez, R; Aguilar Rivera, N; Yañez Espinoza, E. S.f. Propuesta para el monitoreo del barrenador de la caña de azúcar *Diatraea saccharalis* a través de espectroradiometría de campo. México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 6 p.
- Marini, F. y Santamaría, M. 2019. Evaluación de índices verdes convencional e índices del "borde rojo" en la discriminación de cultivos a nivel regional. (En línea). Argentina. ISSN. 0718-7130. 15 p. Consultado el 13 de octubre de 2021. Disponible en <http://revistanadir.yolasite.com/resources/Articulo%20Marini%20y%20Santamaria.pdf>
- Muñoz Aguayo, P. 2013. Apuntes de teledetección: índices de vegetación. (En línea). Chile. 15 p. Consultado el 26 de abril de 2020. Disponible en <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20C%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Olvera Vargas, LA; Galindo Mendoza, MG; Aguirre Gómez, R; Aguilar Rivera, N; Yañez Espinoza, E. 2015. Propuesta para el monitoreo del barrenador de la caña de azúcar *Diatraea saccharalis* a través de espectroradiometría de campo. México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 6 p.
- Ponvert Delisles, D; Lau Quan, A. 2013. Uso de las imágenes de satélite y los SIG en el campo de la Ingeniería Agrícola. La Habana. Cu. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol 22. No. 4. 7 p.
- Ramos, D.A. 2020. Los 6 índices de vegetación

para completar el NDVI. (En línea). España. Consultado el 13 de octubre de 2021. Disponible en [https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/#GCI\\_Indice\\_de\\_Clorofila\\_Verde](https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/#GCI_Indice_de_Clorofila_Verde)

Soledad, M; Federico, K. 2009. La tecnología espacial en el campo: Aplicaciones de imágenes satelitales en agricultura de precisión. Argentina. V congreso Argentino de tecnología espacial. 7 p.

Winkler, K. 2018. Agrotóxicos en el cultivo de la caña de azúcar y sus impactos en la salud humana. Causas y orígenes de la Nefropatía Mesoamericana en Guatemala. Guatemala. 57 p.

Zenteno Cruz, GA; Palacios Vélez, E; Tijerina Chávez, L; Flores Magdaleno, H. 2017. Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 8. No. 7. P 1575-1586.