



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

# **T E S I S**

**DETERMINACIÓN DE VARIABLES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DE  
MAÍZ MEDIANTE IMÁGENES OBTENIDAS DESDE UN VEHÍCULO  
AÉREO NO TRIPULADO (VANT)**

que para obtener el grado de  
**Maestro en**  
**Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta  
**Mariana de Jesús Marcial Pablo**

**Tutor: Dr. Waldo Ojeda Bustamante**

**Jiutepec, Morelos**

**2017**

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “DETERMINACIÓN DE VARIABLES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DE MAÍZ MEDIANTE IMÁGENES OBTENIDAS DESDE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (VANT)”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

**Mariana de Jesús Marcial Pablo**

---

Jiutepec, Morelos a 06 de Noviembre del 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación académica profesional.

Al Dr. Waldo Ojeda Bustamante por su buena disposición y el apoyo incondicional en la realización de este trabajo.

Al Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata. Dr. Alberto González Sánchez, Dr. Jorge Flores Velázquez, por sus valiosas aportaciones en la revisión de este trabajo.

A los académicos del IMTA por todo el tiempo dedicado y por los conocimientos transmitidos.

A quienes me han acompañado en estos últimos dos años: Anastasio, Abraham, Briana Elena, Eugenia, Juan, María Fernanda y Rocío.

A todas aquellas personas que me han acompañado desde el comienzo hasta el final de esta etapa.

## **DEDICATORIA**

### **Con cariño a:**

Mis padres: Florencio y Porfiria.

Mis sobrinos: Carlos Miguel, Ana Belén, Dulce Azucena, Dania Naomi y Catalina.

Sergio Iván, porque la vida no es block cuadriculado.

Toda mi familia por ser parte de mi inspiración para salir adelante.

Mariana

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	xi
<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO GENERAL</b> .....	2
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
3.1. Fenología del cultivo de maíz .....	3
3.1.1. Etapas fenológicas.....	4
3.1.2. Sistemas de producción.....	9
3.2. Agricultura de precisión.....	10
3.2.1. Aplicaciones de los VANTs en la agricultura.....	12
3.3. Fotogrametría y teledetección.....	15
3.3.1 Espectro electromagnético .....	17
3.4. Índices de vegetación utilizados en la agricultura .....	18
3.5. Índice de área foliar .....	21
3.6. Evapotranspiración .....	24
3.6.1. Evapotranspiración de referencia .....	26
3.6.2. Evapotranspiración del cultivo.....	28
3.7. Coeficiente de cultivo .....	30
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	34
4.1. Sitio de estudio.....	34
4.2. Materiales.....	36
4.3. Métodos .....	37
<b>5. GENERACIÓN DE LOS ORTOMOSAICOS</b> .....	38
5.1. Metodología .....	38
5.1.1. Apoyo topográfico.....	38
5.1.2. Misión de vuelo y adquisición de imágenes.....	39
5.1.3. Procesamiento de imágenes .....	40
5.1. Resultados .....	41
<b>6. DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA Y ALTURA DEL CULTIVO DE MAÍZ UTILIZANDO SENSORES REMOTOS BASADO EN UN VANT</b> .....	43

6.1. Introducción .....	43
6.2. Objetivos .....	44
6.3. Metodología .....	44
6.3.1. Estimación de la fracción de la cobertura vegetal .....	44
6.3.3. Determinación de la altura de las plantas del cultivo .....	46
6.4. Resultados y discusiones .....	49
6.4.1. Fracción de la cobertura vegetal .....	49
5.4.2. Alturas del cultivo .....	54
5.5. Conclusiones .....	56
<b>7. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL MAÍZ A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES .....</b>	<b>58</b>
7.1. Introducción .....	58
7.2. Objetivos .....	59
7.3. Metodología .....	59
7.3.1. Determinación del coeficiente de cultivo (Kc) .....	59
7.3.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) .....	60
7.3.3. Relación Kc-NDVI .....	61
7.3.4. Evapotranspiración de referencia .....	61
7.3.5. Evapotranspiración del cultivo .....	62
7.4. Resultados y discusiones .....	63
7.4.1. Coeficiente de cultivo (Kc) .....	63
7.4.2. Desarrollo del NDVI a partir de los ortomosaicos multiespectrales .....	63
7.4.3. Modelo NDVI-Kc .....	65
7.4.4. Evapotranspiración de referencia .....	66
7.4.5. Evapotranspiración de cultivo .....	67
7.5. Conclusiones .....	69
<b>8. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE MAÍZ MEDIANTE SENSORES REMOTOS .....</b>	<b>71</b>
8.1. Introducción .....	71
8.2. Objetivos .....	72
8.3. Metodología .....	72
8.3.1. Método indirecto .....	72

8.3.2. Validación .....	74
8.4. Resultados y discusiones .....	75
8.4.1. Estimación del IAF .....	75
8.4.3. Validación del IAF .....	78
8.5. Conclusiones .....	80
<b>9. DESCRIPCIÓN DE LA FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE MAÍZ A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS CON EL VANT .....</b>	<b>82</b>
9.1. Introducción .....	82
9.2. Objetivos .....	83
9.3. Metodología .....	83
9.3.1. Determinación de las etapas fenológicas .....	83
9.4. Resultados y discusiones .....	84
9.4.1. Etapas fenológicas y su relación con los GDD .....	84
9.5. Conclusiones .....	88
<b>10. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>89</b>
<b>11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Función óptima de crecimiento relativo del maíz en base a la temperatura (Coelho & Dale, 1980). .....	4
<b>Figura 2.</b> Etapas de crecimiento en sus dos categorías: vegetativo y reproductiva (Ritchie <i>et al.</i> , 1992). .....	5
<b>Figura 3.</b> Fenología del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa (Ojeda <i>et al.</i> , 2006; Sifuentes <i>et al.</i> , 2015). .....	9
<b>Figura 4.</b> Componentes que deben considerarse para el uso de VANTs en la agricultura de precisión (Gago <i>et al.</i> , 2015). .....	12
<b>Figura 5.</b> Índices de vegetación y altura de los cultivos para cada campo experimental con diferentes tratamientos de fertilizante nitrogenado (Maresma <i>et al.</i> , 2016). .....	13
<b>Figura 6.</b> Representación tridimensional de la plantación de olivos generada a partir de imágenes capturadas con, a) cámara multispectral y b) cámara visible (Torres-Sánchez <i>et al.</i> , 2015). .....	14
<b>Figura 7.</b> Coeficiente de determinación derivado de los índices de vegetación en dos de crecimiento del cultivo (Geipel <i>et al.</i> , 2014). .....	15
<b>Figura 8.</b> Firmas espectrales de algunas coberturas terrestres (Alonso, 2006). .....	17
<b>Figura 9.</b> Firmas espectrales de cultivos y suelo (Nowatzki <i>et al.</i> , 2009). .....	18
<b>Figura 10.</b> Índice de área foliar verde en las principales etapas de crecimiento del cultivo de maíz (Nguy-Robertson <i>et al.</i> , 2012). .....	22
<b>Figura 11.</b> Cobertura de dosel en relación con el índice de área foliar basada en los datos obtenidos para maíz (datos combinados de varios tratamientos y años) y soja (Hsiao <i>et al.</i> , 2009). .....	23
<b>Figura 12.</b> Relación entre el índice de área foliar y la cobertura del dosel para maíz (Nielsen <i>et al.</i> , 2012). .....	23
<b>Figura 13.</b> Evaluación de combinaciones de medidas de evaporación y transpiración (Kool <i>et al.</i> , 2014). .....	26
<b>Figura 14.</b> Evapotranspiración de dos cultivos de referencia (Wright, 1996). .....	26
<b>Figura 15.</b> Regresiones de ETo diario utilizando FAO Penman-Monteith y MA + LSE para dos estaciones (Cruz-Blanco <i>et al.</i> , 2014). .....	28
<b>Figura 16.</b> Mapas de LAI, NDVI, Kc y ETc para campos de viñedo (Vanino <i>et al.</i> , 2015). .....	29

<b>Figura 17.</b> Evapotranspiración del cultivo estimado a partir de las variaciones de $K_c$ (Jiang <i>et al.</i> , 2014).....	30
<b>Figura 18.</b> Cambio en los valores de $K_c$ durante la temporada de crecimiento del trigo (El-Shirbeny <i>et al.</i> , 2014). .....	32
<b>Figura 19.</b> Variación estacional de los coeficientes diarios $K_{cb}$ , $K_{cb}$ actual ( $K_{cb}$ act), $K_e$ y $K_c$ actual ( $K_c$ act) para maíz, cebada y olivo (Pôças <i>et al.</i> , 2015).....	33
<b>Figura 20.</b> Localización de la zona de estudio. ....	34
<b>Figura 21.</b> Distribución de los tratamientos y de los puntos de control en la parcela. ....	35
<b>Figura 22.</b> Hexacóptero DJI A2 en vuelo sobre el campo de cultivo.....	37
<b>Figura 23.</b> Ubicación del punto base (izquierda) y marca de un punto de control en el terreno (derecha). ....	38
<b>Figura 24.</b> Misiones de vuelo programada con la cámara Multiespectral Tetracam.....	39
<b>Figura 25.</b> Misión de vuelo programada con la cámara Sony. ....	39
<b>Figura 26.</b> Espectralón empleado para la corrección radiométrica. ....	40
<b>Figura 27.</b> Ortomosaico multiespectral. ....	41
<b>Figura 28.</b> Ortomosaico visible. ....	42
<b>Figura 29.</b> Modelo digital de elevación (MDE). ....	42
<b>Figura 30.</b> Detalle de condiciones del cultivo en dos etapas contrastantes (Izquierda: etapa vegetativa, derecha: etapa reproductiva). ....	46
<b>Figura 31.</b> Flujo de trabajo para la digitalización de la cobertura del cultivo. ....	46
<b>Figura 32.</b> Diagrama de flujo del procedimiento para determinar la altura de la plantas. ....	47
<b>Figura 33.</b> Ubicación de los puntos de muestreo de las plantas. ....	48
<b>Figura 34.</b> Clasificación del ortomosaico a) ortomosaico visible, b) segmentación de la imagen, c) clasificación del cultivo d) clasificación del cultivo y suelo. ....	49
<b>Figura 35.</b> Fracción de cobertura vegetal digitalizada por tratamiento. ....	50
<b>Figura 36.</b> Clasificación de la fracción de la cobertura del cultivo a 1033 GDD usando los valores umbrales. ....	51
<b>Figura 37.</b> Diagrama de caja que muestra la precisión de los índices de vegetación.....	53
<b>Figura 38.</b> Porcentaje de cobertura del cultivo calculado con los índices de vegetación.....	53
<b>Figura 39.</b> Altura de las plantas del cultivo por tratamiento. ....	54
<b>Figura 40.</b> Perfil longitudinal y transversal de un lote de cultivo de maíz.....	55

<b>Figura 41.</b> Variabilidad temporal de las alturas del cultivo. ....	55
<b>Figura 42.</b> Validación de las alturas del cultivo .....	56
<b>Figura 43.</b> Diagrama de flujo para determinar Kc y ETc. ....	62
<b>Figura 44.</b> Coeficientes de cultivo (Kc) basado en los grados días crecimiento. ....	63
<b>Figura 45.</b> Evolución temporal del NDVI en el sitio experimental.....	64
<b>Figura 46.</b> Relación entre NDVI y Kc en el sitio experimental. ....	65
<b>Figura 47.</b> Evapotranspiración de referencia de la zona de estudio. ....	67
<b>Figura 48.</b> Evapotranspiración del cultivo (ETc) de maíz en el sitio experimental. ....	68
<b>Figura 49.</b> Mapas de Kc y ETc obtenidos del modelo NDVI-Kc. ....	69
<b>Figura 50.</b> Estimación del IAF obtenidos con el registrador de datos y sensor RFA externo del ceptómetro. ....	73
<b>Figura 51.</b> Índice de área foliar medido en el sitio experimental. ....	76
<b>Figura 52.</b> Índice de área foliar estimado con el ceptómetro en el sitio experimental. ....	76
<b>Figura 53.</b> Relación entre los índices de vegetación y el IAF. ....	78
<b>Figura 54.</b> Relación entre el IAF medido y el IAF estimado con el ceptómetro.....	79
<b>Figura 55.</b> Relación entre el IAF medido y el IAF estimado con el NDVI.....	80
<b>Figura 56.</b> Estimación de las etapas fenológicas del cultivo con los GDD.....	85
<b>Figura 57.</b> El NDVI en función de las etapas fenológicas. ....	86
<b>Figura 58.</b> Relación entre las etapas fenológicas y variables agronómicas.....	86
<b>Figura 59.</b> Identificación de las etapas fenológicas del cultivo maíz a partir de las imágenes visibles.....	87

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Etapas vegetativas y reproductivas del cultivo de maíz. ....	4
<b>Cuadro 2.</b> Índices de vegetación utilizados en la agricultura de precisión (Mulla, 2013). ...	20
<b>Cuadro 3.</b> Coordenadas de los puntos de control. ....	38
<b>Cuadro 4.</b> Errores obtenidos en el eje Z de los MDE. ....	41
<b>Cuadro 5.</b> Valores umbrales máximos y mínimos calculados con el algoritmo de Otsu. ....	50
<b>Cuadro 6.</b> Precisión media ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar (s), para cada índices en las fechas de vuelo. ....	52
<b>Cuadro 7.</b> Valores medios del NDVI por tratamiento. ....	64
<b>Cuadro 8.</b> Evapotranspiración del cultivo (ETc) de maíz por tratamiento. ....	67
<b>Cuadro 9.</b> Codificación de las etapas fenológicas del maíz (Weber & Bleiholder, 1990; Lancashire <i>et al.</i> , 1991). ....	83
<b>Cuadro 10.</b> Los GDD y DDS para las etapas fenológicas identificadas del cultivo. ....	84

## RESUMEN

La agricultura de precisión utiliza la recopilación y el procesamiento intensivo de datos e información en el tiempo y el espacio para hacer un uso más eficiente del agua y de los insumos agrícolas, lo que conduce a una mejor producción de cultivos. Este tipo de información puede obtenerse mediante sensores remotos montados en satélites o vehículos aéreos, pero presentan el inconveniente de tener alto costo y baja frecuencia temporal. Una alternativa de bajo costo se basa en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) y cámaras multispectrales, que en conjunto proporcionan información de alta resolución espacial y temporal. En esta vertiente, el objetivo principal de este trabajo fue estimar las variables agronómicas del cultivo de maíz, como la cobertura vegetal, alturas del cultivo, índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultivo (Kc) y evapotranspiración del cultivo (ETc) mediante imágenes adquiridas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

En este trabajo se monitoreo una parcela de maíz durante un ciclo agrícola. Los datos meteorológicos, agronómicos, y de riego se midieron in-situ. Para obtener las imágenes aéreas se utilizó un VANT tipo multicóptero con dos cámaras de alta resolución (visible y multispectral). Las imágenes se adquirieron a una altura promedio de 52 m con una resolución de 2.10 y 1.25 cm por pixel sobre la superficie en 11 fechas distintas distribuidas en las diferentes etapas del desarrollo fenológico del cultivo. La restitución fotogramétrica de las imágenes se realizó con el software PIX4D y se generó un ortomosaico multispectral y uno visible por cada fecha.

Las alturas del cultivo se determinaron con los modelos digitales de superficie (MDS) y el modelo digital del terreno (MDT); la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) indica que las medidas proporcionadas por los modelos digitales de elevación presentan una diferencia de aproximadamente 3.20 cm con respecto a las medidas tomadas en puntos de control en el cultivo. La cobertura vegetal del cultivo se obtuvo a partir del análisis de las imágenes utilizando el algoritmo de clasificación OBIA (Object-based image analysis) mediante el software eCognition developer 9.0; el procedimiento consistió en la segmentación de las imágenes, clasificación de las imágenes (cultivo, sombra y suelo) y estimación de la cobertura.

El índice de área foliar (IAF) se estimó utilizando dos métodos indirectos: con el ceptómetro (Accupar LP-80) y con las imágenes multispectrales a partir de los índices de vegetación, empleando el índice verde normalizado (NG), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) y el índice de vegetación triangular modificado (MTVI2); donde las ecuaciones obtenidas fueron  $IAF_{NDVI} = 7.751(NDVI) - 0.247$  y  $IAF_{MTVI2} = 4.874(MTVI2) + 0.922$ .

Los valores del coeficiente de cultivo (Kc) se determinaron a partir de datos experimentales basados en los días grado crecimiento (GDD) calculados con datos de temperatura media ambiental y temperaturas de desarrollo del cultivo. Se desarrolló un modelo de regresión lineal

simple entre los valores de  $K_c$  y NDVI. El modelo de regresión resultante fue  $K_{c\text{ NDVI}} = 1.6727 (\text{NDVI}) - 0.0479$  con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.960. Los valores de la  $E_{Tc}$  se obtuvieron mediante el modelo NDVI-  $K_c$  y la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) calculada a partir del método de la FAO Penman-Monteith.

Las etapas fenológicas del cultivo se identificaron a partir de la interpretación visual de las imágenes obtenidas con la cámara visible y se verificaron con las observaciones realizadas directamente en campo. A cada etapa fenológica se le asignó una escala decimal la cual se relacionó con los días grado crecimiento acumulado (GDD) del cultivo. El modelo estimado para identificar las etapas fue  $\text{Etapa}_{\text{GDD}} = -0.00001 (\text{GDD})^2 + 0.0726(\text{GDD})$ .

Finalmente las imágenes adquiridas con las cámaras digitales desde una plataforma VANT permitieron determinar las variables agronómicas del cultivo de maíz con mayor precisión comparada con otras tecnológicas de percepción remota debido a la alta resolución espacial y temporal de los datos y a los algoritmos de clasificación de imágenes basados en objetos.

**Palabras clave:** Agricultura de precisión, imágenes multiespectrales, índices de vegetación sensores remotos.

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En México, el maíz es el cultivo agrícola más importante, desde el punto de vista alimentario, industrial, político y social. La superficie sembrada promedio anual es de 8.4 millones de hectáreas, de las cuales el 78 % es de temporal y 22 % de riego (SIAP, 2017). Sin embargo, la demanda es superior a la producción, por lo que es uno de los principales países importadores con más de 12 millones de toneladas anuales (SIAP-SAGARPA, 2016). Situación que nos lleva a mejorar la productividad del cultivo con el manejo adecuado del agua, suelo, planta y clima, para lo cual se requiere incorporar tecnologías que nos permitan obtener el monitoreo de las variables agronómicas de manera espacial y temporal para la aplicación de agua e insumos agrícolas.

Una de las características que otorgan a la teledetección un gran valor es la periodicidad y continuidad en su observación de la superficie terrestre. Estas observaciones permiten el seguimiento del desarrollo y crecimiento de la vegetación a través de la determinación de diferentes variables agronómicas, como la fracción de cobertura vegetal, el índice de área foliar, la altura de las plantas, la biomasa y el coeficiente de cultivo, y de los diferentes estados fenológicos que atraviesa (Sakamoto *et al.*, 2010). Estas variables presentan un gran interés en aplicaciones relacionadas con la climatología, hidrología, agricultura de precisión y cambio global.

Las variables agronómicas permiten describir el estado y los ritmos de cambio que presentan los cultivos (Calera *et al.*, 2004), y se encuentran estrechamente relacionadas entre sí. Esto sucede, por ejemplo, con los valores del coeficiente de cultivo que aumentan a medida que lo hace el índice de área foliar y la cobertura vegetal; donde el máximo valor del coeficiente de cultivo se alcanza con la cobertura efectiva completa (Allen *et al.*, 2006).

La obtención de variables agronómicas a partir de información proveniente de sensores remotos montados en satélites o avionetas permitirá dar seguimiento a la dinámica espacio temporal de la vegetación de manera eficiente y económica (Calera *et al.*, 2004). La información obtenida a través de sensores remotos se han logrado establecer relaciones entre los índices de vegetación y las variables agronómicas como son la producción de biomasa, el desarrollo del coeficiente de cultivo, la evapotranspiración, la fracción de cobertura, así como otras variables obtenidas a partir de reflectancia de la cubierta vegetal como son el albedo, radiación fotosintéticamente activa absorbida y la temperatura superficial, entre otros.

Las imágenes satelitales de alta resolución espacial se utilizan comúnmente para estudiar las variaciones de las condiciones de los cultivos, los bosques y el suelo. A pesar de las ventajas aparentes que ofrecen los satélites artificiales y aviones tripulados, el costo de obtener imágenes multispectrales de alta resolución para áreas relativamente pequeñas se considera un inconveniente importante (Bagheri *et al.*, 2013). En la actualidad, esto puede ser superado mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) equipados con cámaras digitales.

La adquisición de imágenes con los VANTs puede realizarse en menor tiempo y con mayor frecuencia, lo que significa costos más bajos, mayor flexibilidad en términos de altura y misión de vuelo, y mayores resoluciones espaciales (Xiang & Tian, 2011). La mayoría de las aplicaciones con VANTs han sido posibles debido a la miniaturización de cámaras multispectrales y térmicas, sin embargo, se requieren calibraciones radiométricas y geométricas para proporcionar imágenes que sean similares a las disponibles de los sensores tradicionales montados en satélite (Berni, *et al.*, 2009).

Los sensores remotos montados en VANT han abierto nuevos campos de investigación y monitoreo en el desarrollo y crecimiento tanto de la vegetación natural como cultivada con un costo relativamente pequeño. Actualmente, con las mejoras en la resolución temporal y espacial de las imágenes se pueden conocer las variables agronómicas en tiempo real. En este documento se determinaron las variables agronómicas del cultivo de maíz empleando imágenes adquiridas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

## **2. OBJETIVO GENERAL**

- Estimar y validar las variables agronómicas del cultivo de maíz: cobertura vegetal, alturas del cultivo, índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultivo (Kc) y evapotranspiración del cultivo (ETc) mediante imágenes adquiridas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1. Fenología del cultivo de maíz**

La fenología es el estudio de los eventos periódicos naturales que ocurren en el desarrollo de los cultivos (Villalpando & Ruiz, 1993), que incluye su aparición en función de factores bióticos y abióticos. Estos eventos o fenómenos biológicos están directamente relacionados con el manejo, genotipo, fotoperíodo (para las especies sensibles), estrés hídrico y condiciones ambientales que se presentan en un lugar, principalmente temperatura. En virtud que las necesidades nutricionales e hídricas de los cultivos tiene relación con su desarrollo fenológico, es de especial interés conocer la ocurrencia y duración de las diferentes etapas fenológicas de un cultivo.

El desarrollo fenológico de un cultivo se presenta a través de la aparición, transformación o desaparición rápida de los órganos vegetales conocidas como fases fenológicas. Torres Ruiz (1995) indica que existen fases fenológicas verdaderas como la emergencia, la brotación de yemas y la floración. Una etapa fenológica está delimitada por dos fases fenológicas sucesivas. Desde el punto de vista hídrico, existen etapas que son muy sensibles al estrés hídrico, por lo que es primordial en el manejo de un cultivo limitar dicho estrés para asegurar buenos rendimientos del cultivo.

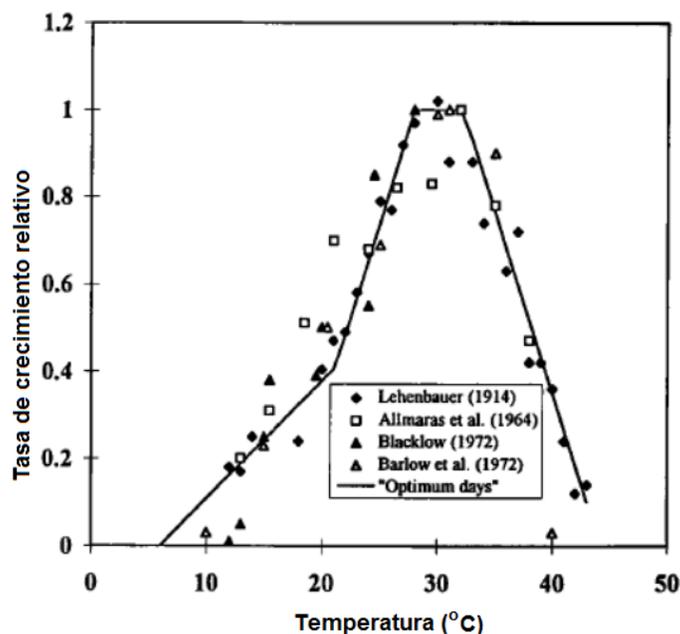
Las principales variables que controlan la fenología de un cultivo son: fecha de siembra, duración del día, temperatura, suministro de humedad, componente genético, y manejo de la planta.

Existe una necesidad por predecir el comportamiento de los cultivos sujeto a un conjunto de condiciones. Anticipar la aparición de las etapas fenológicas de un cultivo permite ajustar mejor la aplicación de fertilizantes y riego para un desarrollo óptimo.

Los propósitos de los estudios fenológicos son (Shaykewich, 1995):

- Servir como guía para desarrollar variedades para ambientes específicos
- Cultivar parcelas con diferentes fechas de maduración a intervalos recomendables para generar diferentes ventanas de comercialización
- Definir si un cultivo puede ser cultivado comercialmente en una localidad específica
- En la producción de semilla de híbridos que involucra endogamia de diferentes clasificaciones de madurez, se requiere ajustar la fechas de siembra para asegurar que el cruzamiento se realizará en el estado de desarrollo apropiado para polinización.
- Facilitar la planeación de las actividades del manejo del cultivo como la aplicación del riego, fertilización, y pesticidas que permita que tales aplicaciones se realicen a una particular etapa de desarrollo del cultivo (o insecto).

Usando datos experimentales publicados, Coelho & Dale (1980) definieron una función FT del desarrollo del maíz en función de la temperatura como se indica en la Figura 1. Indicaron que FT=0 para temperaturas menores de 6 °C y mayores de 44 °C, con un rango óptimo de 28 a 32 °C.



**Figura 1.** Función óptima de crecimiento relativo del maíz en base a la temperatura (Coelho & Dale, 1980).

### 3.1.1. Etapas fenológicas

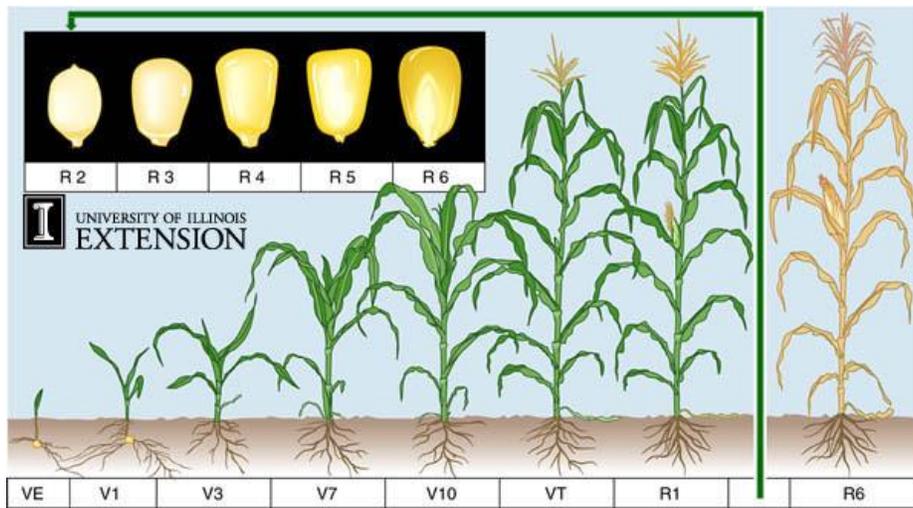
Los eventos fenológicos son importantes porque establecen las condiciones de crecimiento y desarrollo de un cultivo (Bolaños & Barreto, 1991). El maíz es una planta anual determinada, con los puntos cardinales de la germinación, la iniciación floral, la floración y la madurez fisiológica (Bolaños & Edmeades, 1993).

Las etapas de crecimiento del maíz se dividen en dos categorías: Vegetativa (V) y Reproductiva (R) y se pueden agrupar en cuatro períodos los cuales son: crecimiento de las plántulas, crecimiento vegetativo, floración y fecundación, Llenado de grano y madurez (Lafitte, 1994; Ritchie *et al.*, 1992; Fischer & Palmer, 1984). En el Cuadro 1 se mencionan las claves y etapas fenológicas para el cultivo de maíz según Ritchie *et al.* (1992). En la Figura 2 se observan las etapas fenológicas que posteriormente se describen.

**Cuadro 1.** Etapas vegetativas y reproductivas del cultivo de maíz.

VE	Germinación y emergencia	Etapas vegetativas
V1	Primera hoja	
V2	Segunda hoja	
V3	Tercera hoja	

V(n)	Enésima hoja	
VT	Floración masculina	
R1	Floración femenina	Etapas reproductivas
R2	Grano acuoso	
R3	Grano lechoso	
R4	Grano masoso	
R5	Grano dentado	
R6	Madurez fisiológica	



**Figura 2.** Etapas de crecimiento en sus dos categorías: vegetativo y reproductiva (Ritchie *et al.*, 1992).

- Germinación y emergencia (VE)

Bajo condiciones de campo adecuadas, la semilla sembrada absorbe agua y comienza a crecer. Primero, la radícula comienza a elongar a partir del grano hinchado, seguido por el coleoptilo con la plúmula encerrada (planta embrionaria), y después las 3 o 4 raíces seminales laterales. La VE ocurre finalmente a consecuencia de una elongación rápida del mesocotilo, el cual empuja el coleoptilo que está creciendo hasta la superficie del suelo. Bajo condiciones de calor y humedad, la emergencia ocurrirá a los 4 o 5 días después de la siembra, pero bajo condiciones de temperatura baja o falta de humedad, la emergencia tomará 2 semanas o más.

La profundidad del punto de crecimiento en el suelo en la etapa VE también marca la profundidad en la cual comenzarán a crecer las raíces nodales. Esta profundidad (2.5 a 3.8 cm) es relativamente constante para distintas profundidades de siembra, debido a la elongación del mesocotilo.

- Aparición de la primera hoja hasta la enésima hoja (V1...VN)

En la etapa V1 las hojas se están iniciando desde un punto de crecimiento por debajo de la superficie del suelo, ya que la elongación celular aún no ha comenzado. Los pelos radicales aparecen creciendo en la etapa V3, de las raíces nodales; todas las hojas y yemas que producirá la planta se están formando ahora. En la etapa V5 se completará la iniciación de las hojas y yemas y se iniciará la formación de una panoja masculina microscópica en el extremo del tallo; durante la iniciación de la panoja masculina, la punta del tallo (punto de crecimiento) se encuentra justo bajo la superficie del suelo, aunque la altura total sobre el nivel del suelo de la planta alcanza más o menos 20 cm.

En la etapa V6 el punto de crecimiento, y la panoja se encuentran sobre la superficie del suelo, y el tallo comienza un período de rápida elongación. En la etapa V9 la panoja masculina comienza a desarrollarse rápidamente y el tallo continúa con su elongación rápida. En la etapa V10, se acortará el período entre la aparición de nuevas hojas, extendiéndose una nueva hoja cada 2 ó 3 días. Aunque las yemas de mazorca (mazorcas potenciales) se formaron justo antes de la formación de la panoja masculina (V5), el número de óvulos (granos potenciales) en cada mazorca y el tamaño de la mazorca, se determinan en la etapa V12.

A la planta V15 le faltan aproximadamente 10-12 días (5 etapas V) para alcanzar la etapa R1 (estigmas visibles). Esta etapa es el comienzo del período más crucial del desarrollo de la planta en términos de la determinación del rendimiento de grano. El desarrollo de la yema superior desarrollada (mazorca) en V15 ha sobrepasado el de las yemas de más abajo y cada 1-2 días ocurre una nueva etapa foliar.

Hacia la etapa V17, las yemas superiores (mazorca) han crecido lo suficiente como para que su ápice sea visible, al asomarse por la parte superior de la vaina de las hojas que las rodean. La punta de la panoja masculina puede estar también visible en la etapa V17.

- Floración masculina (VT)

Esta etapa se inicia cuando se completa la última ramificación de la panoja y los estigmas no están aún expuestos. La etapa VT comienza aproximadamente 2 a 3 días antes de la emergencia de los estigmas, tiempo durante el cual la planta alcanza su máxima altura al tiempo que comienza la producción de polen. El tiempo entre VT y RI puede fluctuar considerablemente, dependiendo del híbrido y de las condiciones ambientales. Bajo condiciones de campo, la producción de polen ocurre generalmente al final de la mañana y al comienzo del atardecer.

Las 6 etapas reproductivas que aquí se describen, se refieren principalmente al desarrollo del grano y de sus partes. La mazorca superior de una planta prolífica debe usarse para juzgar una etapa, a menos que se desee, en forma específica, referirse a la mazorca superior.

- Floración femenina (R1)

R1 comienza cuando cualquier estigma esté visible, en la punta de la mazorca. La polinización ocurre cuando los granos de polen, durante su descenso, son atrapados por estos nuevos estigmas húmedos. Un grano de polen atrapado necesita más de 24 horas para crecer a través del estigma, alcanzar al óvulo para fertilizarlo y transformarlo en grano. Generalmente necesitan de 2-3 días para que todos los pelos de una mazorca queden expuestos y se polinicen. Los estigmas crecerán de 2.5 a 3.8 cm al día, y continuarán su elongación hasta ser fertilizados.

- Grano acuoso (R2 de 10-14 días después de la aparición de los estigmas).

Los granos R2 son blancos en su exterior y tienen la forma de una ampolla. El endosperma y su ahora abundante fluido interno, son de color claro y también se puede ver el pequeño embrión cuando se hace una disección cuidadosa. Aunque en esta etapa el embrión aún se desarrolla muy lentamente, ya se han formado la radícula, el coleoptilo y la primera hoja embrionaria. En R2, gran parte del grano ha crecido a partir de los materiales circundantes del elote; el elote se halla completa o casi completamente desarrollado, alcanzando su tamaño completo. Los estigmas, una vez completada su función floral, se tornan de color oscuro y comienzan a secarse.

- Grano lechoso (R3 18-22 días después de la aparición de los estigmas)

El grano R3 (en variedades de grano amarillo) exhibe un color amarillo en su exterior, y el líquido interno es ahora blanco lechoso, debido a la acumulación de almidón. Aunque en un comienzo se desarrolla lentamente, el embrión crece ahora más rápido y se observa fácilmente en un grano disectado. La mayor parte del grano R3 ha crecido a expensas de los materiales circundantes del alote.

- Grano masoso (R4 de 24-28 días después de estigmas expuestos)

La continua acumulación de almidón en el endosperma es ahora responsable de que el fluido lechoso esté espesado, alcanzando una consistencia pastosa. Generalmente, a estas alturas, ya se han formado 4 hojas embrionarias, y el embrión R4 ha crecido mucho en tamaño en relación a R3. Hacia la mitad de la etapa R4, el ancho lateral del embrión ocupará la mitad del ancho del grano; la reducción del fluido interno del grano y el aumento de los sólidos, producen una consistencia de masa. Justamente, antes de la etapa R5, los granos a lo largo de la mazorca comienzan a indentarse o secarse en su corona.

- Grano abollado (R5 de 35 a 45 días después de la aparición de los estigmas)

En R5, todos o casi todos los granos están dentados o en proceso de indentarse (en maíces dentados), y el alote sin granos presenta un color rojizo oscuro. Los granos se están secando ahora, desde la corona, donde se está formando una pequeña capa blanca y dura de almidón. Esta capa de almidón aparece poco después de la indentación, en forma de una línea a través

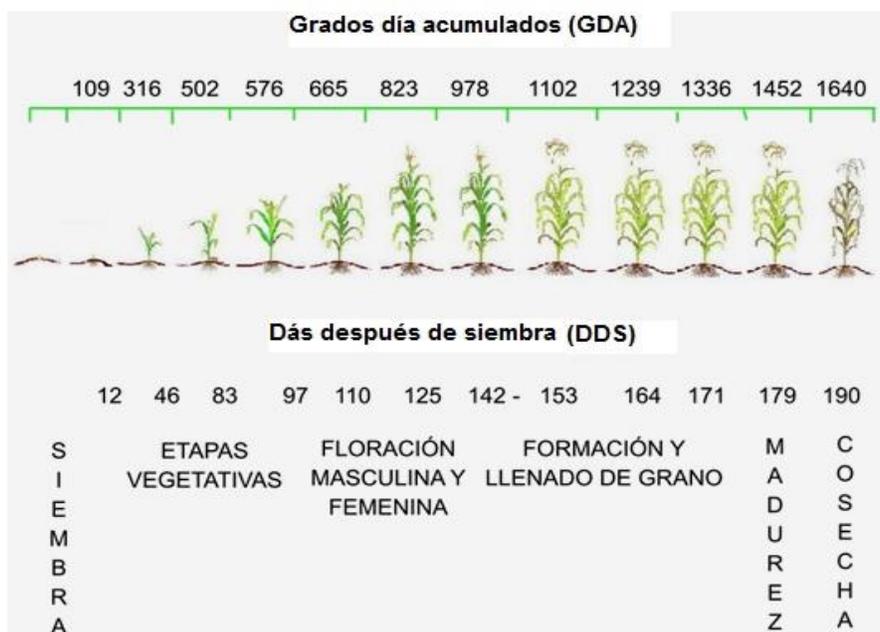
del grano, cuando se ve su cara opuesta a la del embrión. Con la madurez, tanto la capa dura de almidón como la línea del almidón, avanzarán hacia la base del grano. Debido a que el almidón acumulado es duro sobre esta línea, pero aun blando debajo de ella, al presionar el grano con la uña del dedo pulgar se puede detectar la zona de transición.

- Madurez fisiológica (R6 de 55-65 días des pues de la emergencia de los estigmas)

La etapa R6, ocurre cuando todos los granos de las mazorcas han alcanzado su máximo peso seco o máxima acumulación de peso seco. La capa dura del almidón ha avanzado ahora completamente hasta llegar al olote, y se ha formado una capa negra. Esta formación de la capa negra ocurre progresivamente, desde la punta de la mazorca hasta sus granos basales. Es también un buen indicador de máximo peso seco, y marca el final del crecimiento del grano para la estación de crecimiento.

La humedad promedio del grano en la etapa R6 es de 30-35%; sin embargo, esto puede variar considerablemente entre híbridos y condiciones ambientales. El grano no se encuentra aún listo para ser almacenado en forma segura, para lo cual se requiere de 13 a 15% de humedad (maíz desgranado). La cosecha durante o inmediatamente después de R6 puede ser desventajosa debido al costo de secado artificial, por lo que es recomendable dejar que el cultivo se seque parcialmente en el campo, siempre que las pérdidas no constituyan un problema. La velocidad del secado después de R6 dependerá del híbrido y del medio ambiente.

Los índices térmicos más usados en maíz son los grados días de crecimiento (GDD), que realiza la acumulación térmica diaria de la diferencia entre la temperatura media y una temperatura base de desarrollo (Yang *et al.*, 1995). En la Figura 3 se presentan los valores de los grados días de desarrollo o grados días acumulados en los cuales aparecen las diferentes etapas fenológicas de las principales variedades de maíz de ciclo intermedio sembradas en el norte de Sinaloa.



**Figura 3.** Fenología del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa (Ojeda *et al.*, 2006; Sifuentes *et al.*, 2015).

### 3.1.2. Sistemas de producción

En el sistema de producción del cultivo de maíz se caracteriza por utilizar tres sistemas de labranza que dependen de las condiciones del terreno, de las posibilidades de maquinaria y del productor. A continuación se describen las actividades que se realizan para cada sistema de labranza (INIFAP, 2009):

- Tradicional: Barbecho, cruza, rastreo, surcado y dos escardas.
- Mínima: Barbecho o rastreo y surcado.
- De conservación: Siembra y fertilización sin preparación del suelo, ni escardas, utilizando el equipo específico para este sistema de labranza. Existen varios tipos de labranza de conservación: labranza en camellones, en franja, de cobertera y cero o no-labranza.

Por definición la labranza tradicional o convencional es el laboreo del suelo anterior a la siembra con maquinaria (arados) que corta e invierte total o parcialmente los primeros 15 cm de suelo. El suelo se afloja, airea y mezcla, lo que facilita el ingreso de agua, la mineralización de nutrientes y la reducción de plagas animales y vegetales en superficie. Pero también se reduce rápidamente la cobertura de superficie, se aceleran los procesos de degradación de la materia orgánica y aumentan los riesgos de erosión. Generalmente, la labranza convencional implica más de una operación con corte e inversión del suelo.

En los sistemas de labranza mínima la tierra no se labra o se labra muy poco antes de la siembra; se dice que se hace una siembra directa. Una ventaja importante de la labranza mínima es que los cultivos pueden ser sembrados inmediatamente después de que el cultivo anterior haya sido cosechado y, por lo general, en el momento más cercano al óptimo de la siembra

La labranza de conservación, es un sistema de laboreo que realiza la siembra sobre una superficie del suelo cubierta con residuos del cultivo anterior, con lo cual se conserva la humedad y se reduce la pérdida de suelo causada por la lluvia y el viento en suelos agrícolas con riesgo de erosión. Con esta práctica se incrementa la capacidad productiva del suelo, se aumentan los rendimientos y se reducen los costos de producción.

### **3.2. Agricultura de precisión**

La agricultura de precisión (AP) puede definirse como "una estrategia de manejo que utiliza la tecnología de la información para traer datos de múltiples fuentes para soportar decisiones asociadas con la producción de cultivos" (National Research Council, 1997). La agricultura de precisión implica optimizar la calidad y cantidad de un producto agrícola, minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes para reducir la variabilidad de un proceso específico. La AP es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola (Zhang & Kovacs, 2012).

La AP utiliza la recopilación y el procesamiento intensivo de datos e información en el tiempo y el espacio para hacer un uso más eficiente de los insumos agrícolas, lo que conduce a una mejor producción de cultivos (Harmon *et al.*, 2005). La AP requiere de los avances tecnológicos en procesamiento informático, posicionamiento del campo, monitoreo de rendimiento, teledetección y diseño de sensores (Mulla & Schepers, 1997).

La AP implica la integración de tecnologías fundamentales como los sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores remotos (SR), modelación computarizada y procesamiento de información que deben combinarse para generar resultados en tiempo y precisión requeridos (Brisco *et al.*, 1998).

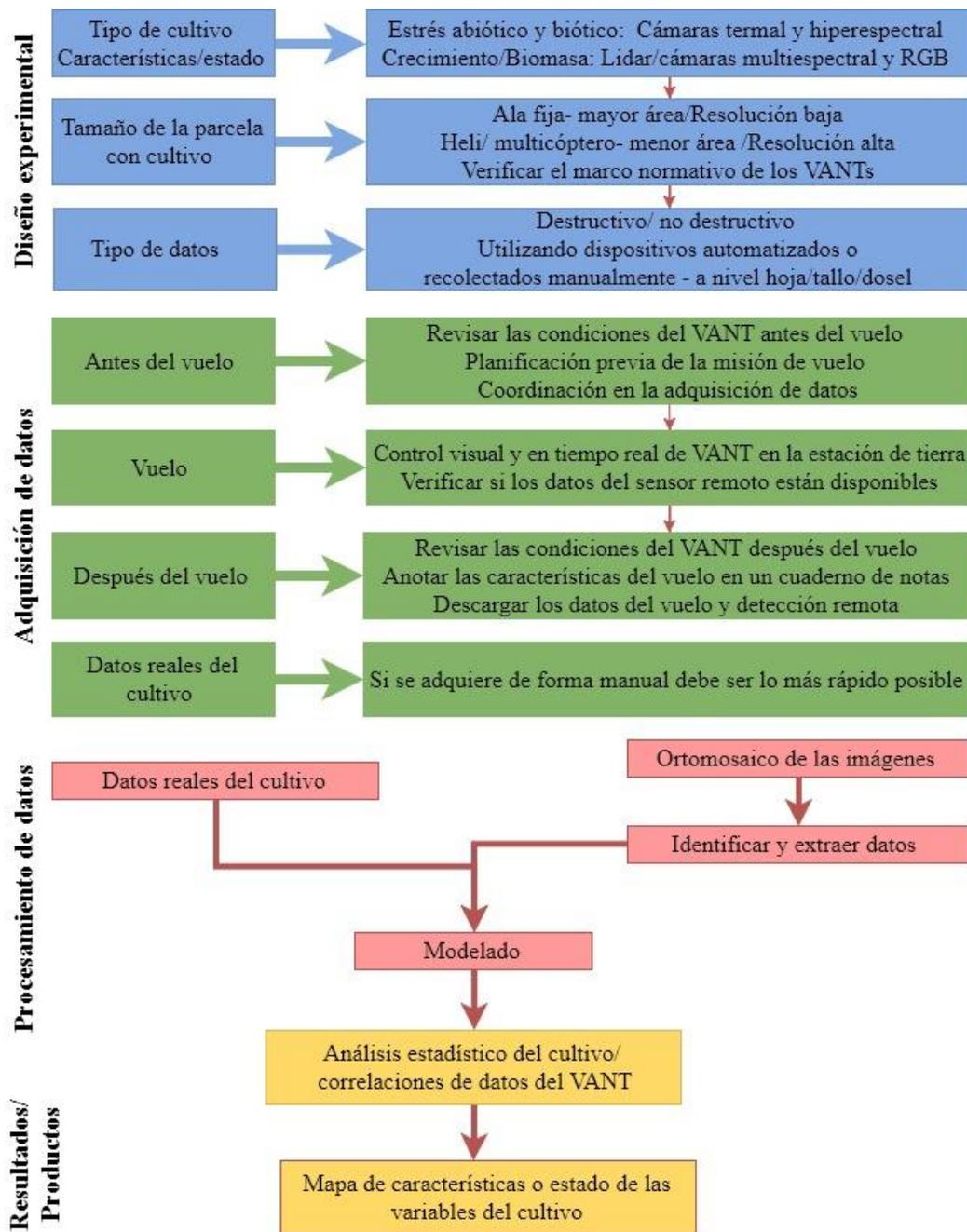
Un sistema de AP que aprovecha los avances recientes en tecnología de sensores desempeña un papel crucial hacia un sistema inteligente de producción de cultivos. Específicamente, la tecnología de SR que permite la adquisición no destructiva de información sobre la superficie de la Tierra puede facilitar la implementación de AP. La información recolectada a través de diferentes sensores y referenciados usando un GPS puede ser integrada en un SIG para crear estrategias de manejo del cultivo en campo (Liaghat & Balasundram, 2010).

Debido a los menores costos de materiales y al desarrollo de nuevos sistemas de teledetección (Ahamed *et al.*, 2012), se han podido aplicar técnicas de procesamiento digital de imágenes a la agricultura (Lorente *et al.*, 2012). Tradicionalmente las plataformas utilizadas para obtener imágenes remotas de la superficie de la Tierra eran los satélites y las aeronaves pilotadas, pero estos instrumentos frecuentemente no proporcionan resoluciones espaciales y temporales adecuadas (Nebiker *et al.*, 2008). Hoy en día, estas dificultades pueden superarse utilizando plataformas no tripuladas flexibles y de bajo costo, como los vehículos aéreos no tripulados (VANTs), denominados sistemas aéreos pilotados de forma remota (RPAS) (Colomina & Molina, 2014).

Las plataformas VANTs, junto con los sensores de imagen, alcance y posicionamiento, son capaces de recolectar imágenes multiespectrales con resolución centimétrica y ofrecen grandes posibilidades en el campo de la agricultura de precisión (Primicerio *et al.*, 2012). El desarrollo de plataformas VANTs caracterizado por su pequeño tamaño, ofrecen una nueva solución para el manejo y monitoreo de cultivos, capaz de proporcionar oportunamente imágenes de alta resolución, especialmente donde las pequeñas áreas productivas tienen que ser monitoreadas (Lelong *et al.*, 2008).

Los VANTs son una tecnología creciente que está ganando rápidamente popularidad tanto en las comunidades públicas como en las científicas. Los VANTs ofrecen una plataforma aérea personalizable desde la cual se pueden montar una variedad de sensores y capturar imágenes aéreas con resoluciones espaciales y temporales muy altas (Turner *et al.*, 2014). Los avances en la precisión, la eficiencia económica y la miniaturización de muchas tecnologías, entre ellas el GPS y los procesadores informáticos, han llevado a los sistemas de VANTs a convertirse en una plataforma innovadora de teledetección rentable (Gago *et al.*, 2015).

Los componentes que deben considerarse para el uso de los VANTs en la agricultura de precisión son el diseño experimental, la adquisición de datos, el procesamiento de datos y los productos o resultados obtenidos; como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Componentes que deben considerarse para el uso de VANTs en la agricultura de precisión (Gago *et al.*, 2015).

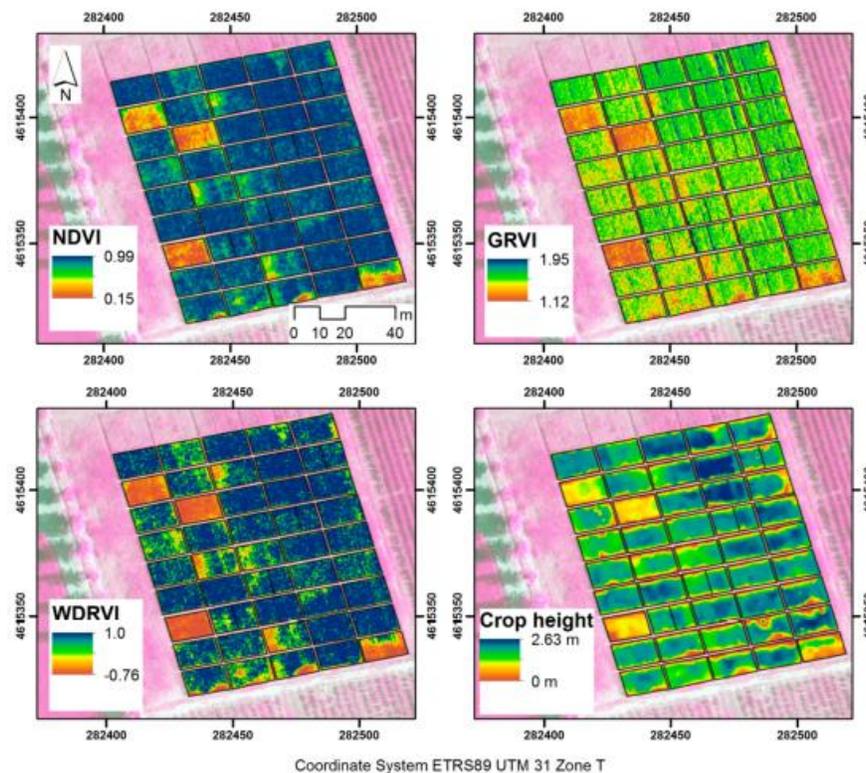
Los VANTs equipados con sensores remotos son una herramienta útil para la agricultura de precisión debido a su alto rendimiento en la adquisición de datos, con resoluciones espaciales y temporales muy altas (Primicerio *et al.*, 2012).

### 3.2.1. Aplicaciones de los VANTs en la agricultura

Existen numerosos trabajos sobre las aplicaciones de los VANTs en la AP, los más importantes son: monitoreo del desarrollo de los cultivos (Berni *et al.*, 2009; Lelong *et al.*,

2008), detección de malas hierbas (Peña *et al.*, 2014; Peña *et al.*, 2013), determinación de variables y parámetros agronómicos (Hoalman *et al.*, 2016; Bendig *et al.*, 2014; Bendig *et al.*, 2013), estrés hídrico (Gago *et al.*, 2015; Zarco-Tejada *et al.*, 2012), predicción del rendimiento de los cultivos (Geipel *et al.*, 2014) y aplicación de nitrógeno (Maresma *et al.*, 2016). Algunos de estos trabajos se describen a continuación.

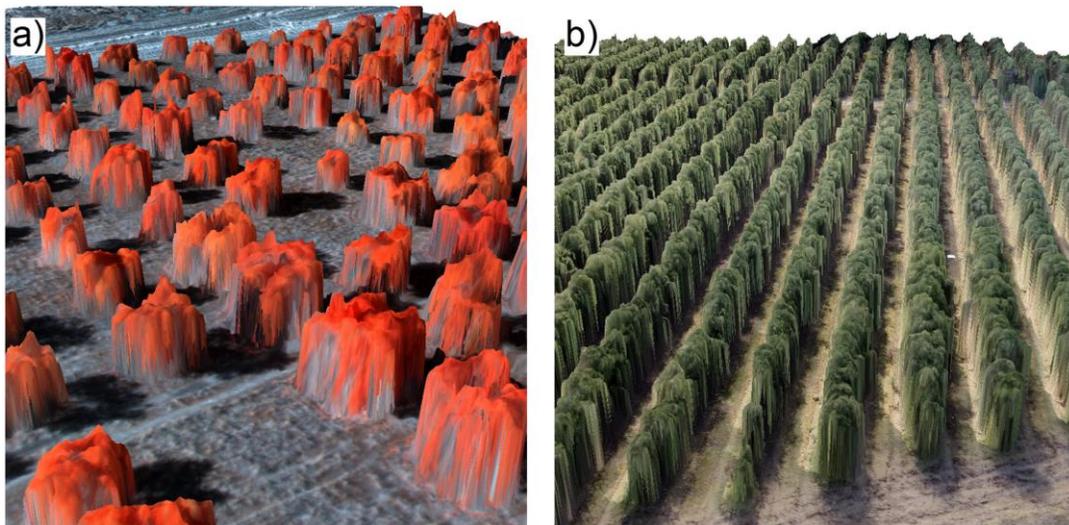
Considerando las crecientes aplicaciones de los VANTs y la importancia de la aplicación de fertilizantes en la producción de maíz, Maresma *et al.* (2016) analizaron la utilidad potencial de diferentes índices de vegetación multispectrales en relación con la altura de los cultivos para predecir el rendimiento del grano y apoyar las decisiones sobre la necesidad de aplicar fertilizante nitrogenado justo antes de la floración del maíz. Para la investigación se consideraron tres índices, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación verde (GRVI) y el índice de vegetación de rango dinámico amplio (WDRVI) (Figura 5). El índice espectral que mejor explicó el rendimiento del grano para los tratamientos con nitrógeno fue el WDRVI, obteniendo una mejora en el rendimiento después de una tercera aplicación de nitrógeno alrededor de la etapa de floración.



**Figura 5.** Índices de vegetación y altura de los cultivos para cada campo experimental con diferentes tratamientos de fertilizante nitrogenado (Maresma *et al.*, 2016).

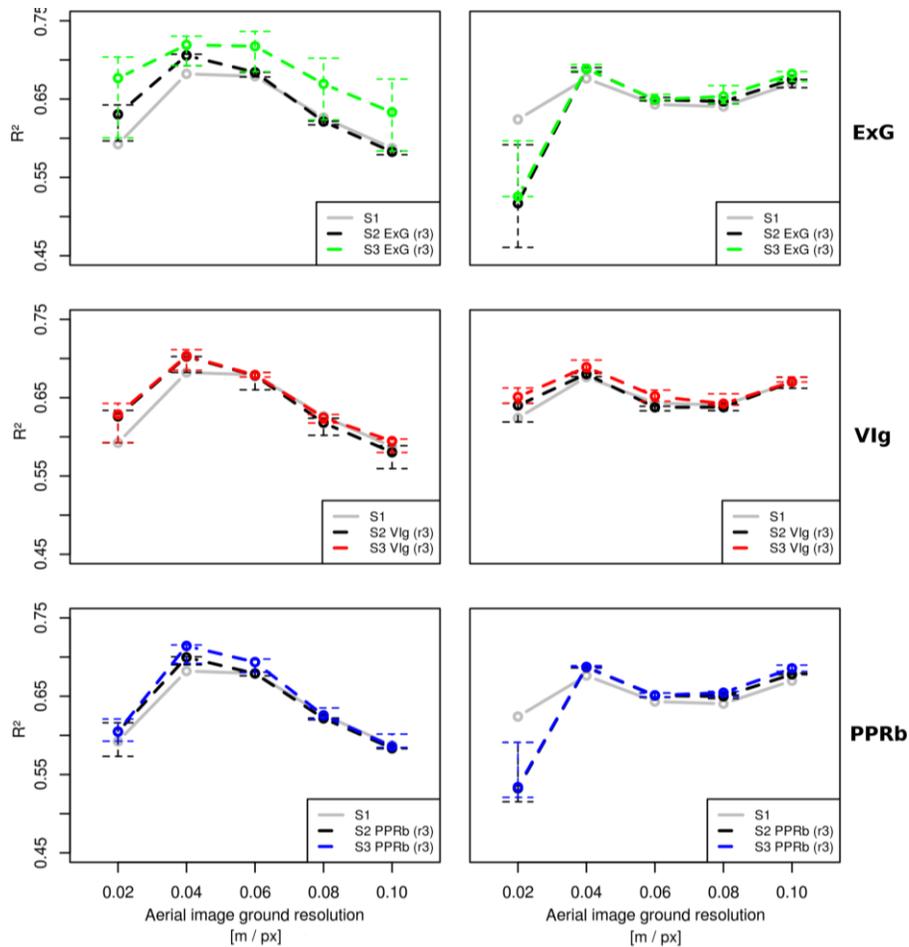
Torres-Sánchez *et al.*, (2015) presentaron un procedimiento para monitorear plantaciones agrícolas de manera tridimensional mediante las imágenes adquiridas con la tecnología VANT

y algoritmos de clasificación basado en objetos. Las pruebas y mediciones se realizaron en plantaciones de olivo donde se evaluaron las resoluciones espectrales y espaciales con dos altitudes de vuelo (50 y 100 m.) y dos sensores, una cámara visible y una cámara multispectral de seis bandas (Figura 6). En esta investigación se demostró la capacidad que tiene la tecnología VANT para producir de manera eficiente datos geométricos tridimensionales de cientos de árboles agrícolas a nivel de campo, que en combinación con el algoritmo de análisis de imágenes basado en objetos, permite calcular el área del dosel, la altura y el volumen de la copa de los árboles de manera oportuna y precisa, lo que ofrece una alternativa muy valiosa al trabajo de campo duro e ineficiente.



**Figura 6.** Representación tridimensional de la plantación de olivos generada a partir de imágenes capturadas con, a) cámara multispectral y b) cámara visible (Torres-Sánchez *et al.*, 2015).

En un estudio realizado por Geipel *et al.* (2014) se utilizaron imágenes RGB adquiridas desde una plataforma VANT para estimar el rendimiento del maíz a partir de la relación entre la altura de los cultivos, índices de vegetación y modelos digitales de elevación de los cultivos. Los tres índices de vegetación analizados fueron el índice exceso de verde (ExG), índice de vegetación verde (VIg) y relación de pigmento de plantas (PPRb); los datos se obtuvieron en tres etapas de crecimiento del cultivo para tres situaciones: para la altura media no clasificada, la altura media clasificada del cultivo y la combinación de las alturas medias clasificadas con la cobertura del cultivo (Figura 7). Se obtuvieron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de hasta 0.74; concluyendo que la combinación de la resolución espacial y espectral basados en imágenes aéreas y modelos de superficie del cultivo, resulta ser un método adecuado para la predicción del rendimiento del maíz durante las etapas intermedias de crecimiento.



**Figura 7.** Coeficiente de determinación derivado de los índices de vegetación en dos de crecimiento del cultivo (Geipel *et al.*, 2014).

### 3.3. Fotogrametría y teledetección

La ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) define la fotogrametría como el arte, ciencia y tecnología cuyo fin es el de obtener información cuantitativa fiable relativa a objetos físicos y su entorno, mediante procesos de registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas. Esta definición es amplia, abarcando técnicas modernas y eliminando casi las diferencias existentes entre la fotogrametría y la teledetección.

Según la ISPRS (International Society of Photogrammetry and Remote Sensing) la fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas del objeto fotografiado (Newby, 2012). En la adquisición de datos fotogramétricos la información recibida remotamente puede agruparse en cuatro categorías:

- Información geométrica implica la posición espacial y la forma de los objetos. Es la fuente de información más importante en fotogrametría.
- Información física se refiere a las propiedades de la radiación electromagnética, por ejemplo, la energía radiante, la longitud de onda y la polarización.
- Información semántica está relacionado con el significado de una imagen; normalmente se obtiene interpretando los datos registrados.
- Información temporal se refiere al cambio de un objeto en el tiempo, usualmente se obtiene comparando varias imágenes que fueron registradas en diferentes momentos.

Las principales ventajas de la fotogramétrica sobre otros sistemas de captura información son: el registro de la información es instantáneo por tanto existe la posibilidad de trabajar con objetos en movimiento, el proceso de captura de la información y el postproceso no perturba el objeto de estudio, se utilizan materiales relativamente baratos y de fácil manipulación, etc. Una de sus principales desventajas es que se auxilian de mediciones realizadas en campo para poder referenciar los productos obtenidos.

La teledetección es la práctica de derivar información acerca de la superficie de la tierra y agua con imágenes adquiridas desde una perspectiva superior, utilizando radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético reflejadas o emitidas desde la superficie de la tierra (Campbell & Wynne, 2011). De la misma forma la ISPRS une el concepto de fotogrametría y teledetección en una sola definición, y la define como el arte, ciencia y tecnología para obtener información fiable acerca de la Tierra y su medio ambiente, o de otros objetos físicos, a partir de imágenes procedentes de sensores y mediante procesos de grabación, medición, análisis y representación.

La teledetección ha sido utilizada como herramienta valiosa y determinante a la hora de evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales; Las aplicaciones de la teledetección son posibles gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres que tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado por su estado al momento de la adquisición de la imagen (Pérez & Muñoz, 2006). Las imágenes de detección remota pueden usarse para identificar deficiencias de nutrientes, enfermedades, exceso o deficiencia de agua, infestaciones de malezas, daño de insectos, daño de granizo, daño por viento, daño por herbicida y poblaciones de plantas.

La principal diferencia entre fotogrametría y teledetección se encuentra en la aplicación; mientras que los fotogrametristas producen mapas y posiciones tridimensionales precisas de puntos, los especialistas en teledetección analizan e interpretan imágenes para obtener información acerca de áreas de suelo y agua.

### 3.3.1 Espectro electromagnético

El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. El espectro de un objeto es la distribución característica de la radiación electromagnética de ese objeto. Las longitudes de onda utilizadas en la mayoría de las aplicaciones agrícolas cubren sólo una pequeña región del espectro electromagnético. La región visible del espectro electromagnético es de aproximadamente de 400 a 700 nm. Tanto la región visible como la infrarroja se utilizan en la teledetección agrícola.

Cuando la energía electromagnética del sol golpea las plantas, pueden suceder tres cosas que la energía sea reflejada, absorbida o transmitida esto dependiendo de la longitud de onda y de las características de las plantas. Una planta parece verde porque la clorofila en las hojas absorbe gran parte de la energía en las longitudes de onda visibles y el color verde se refleja. La luz solar que no se refleja o absorbe se transmite a través de las hojas al suelo.

La curva que relaciona la intensidad de radiación de la energía reflejada y/o emitida por una determinada superficie u objeto en las diferentes longitudes de onda del espectro se denomina firma espectral. La firma espectral define un patrón de respuesta de una superficie terrestre, por lo que existen diferencias muy marcadas entre una superficie de suelo, agua o vegetación, como se indican en la Figura 8. Cada cultivo presenta una firma espectral definida, por lo que su contraste permite una diferenciación entre cultivos y entre fases fenológicas (Figura 9).

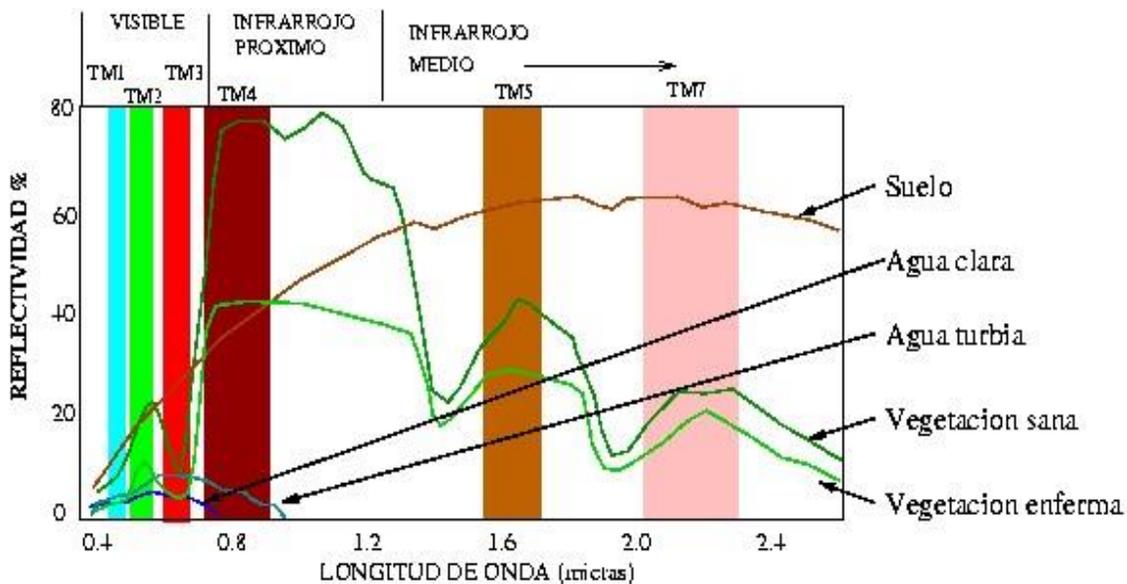


Figura 8. Firmas espectrales de algunas coberturas terrestres (Alonso, 2006).

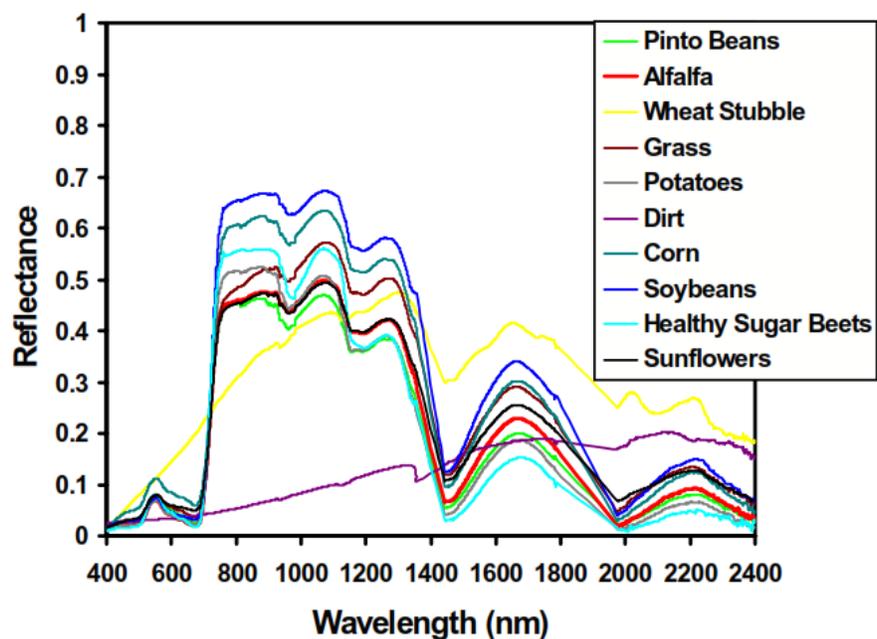


Figura 9. Firmas espectrales de cultivos y suelo (Nowatzki *et al.*, 2009).

### 3.4. Índices de vegetación utilizados en la agricultura

Los índices de vegetación pueden ser definidos como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda con el fin de obtener información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo y la irradiación solar (Gilabert *et al.*, 1997). Los índices de vegetación (IV) han tenido gran éxito en la evaluación de la condición de vegetación, follaje, cubierta, fenología y procesos relacionados con la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por un dosel (Huete *et al.*, 2010; Glenn *et al.*, 2008).

Los IV calculados a partir de imágenes multiespectrales permiten la estimación de la evapotranspiración del cultivo en cada uno de los píxeles, donde cada píxel representa un sistema único de suelo-vegetación (Chen *et al.*, 2005).

Los IV son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, utilizados para medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel (Campbell & Wynne, 2011); permitiendo estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. Los IV están condicionados por los cambios en el estado fisiológico de la cobertura vegetal, sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación.

Los índices de vegetación en general se dividen en tres grupos, basados en la pendiente, la distancia y en transformaciones ortogonales (Elvidge & chen, 1995).

Los índices basados en la pendiente son combinaciones aritméticas simples que se enfocan en la respuesta espectral de la vegetación de las porciones del rojo y del infrarrojo del espectro electromagnético. Son llamados así porque cualquier valor particular del índice puede ser producido por un conjunto de valores de reflectancia de las bandas del rojo y del infrarrojo de una imagen; además estos índices son susceptibles a la división por cero, por este motivo se utilizan las normalizaciones (Campbell & Wynne, 2011).

Los índices basados en la distancia miden el grado de vegetación presente a través de la diferencia de cualquier reflectancia de píxel, con la reflectancia del suelo desnudo y se obtienen como una regresión lineal del infrarrojo cercano, contra el rojo para una muestra del suelo desnudo. Todos los miembros de este grupo requieren que la pendiente y el intercepto de la línea de suelo sean definidos por la imagen analizada; los píxeles que caen cerca de la línea de suelo o en ella son de suelo, mientras que los que caen lejos de ésta, se asumen como vegetación.

Los índices de transformaciones ortogonales consisten en la transformación de bandas espectrales disponibles para formar un nuevo conjunto de bandas no correlacionadas, dentro de las cuales una imagen de índices de vegetación verde puede ser definida.

Los IV estaban relacionados cuantitativa y funcionalmente con varios parámetros de la vegetación como el índice de área foliar (IAF), el porcentaje de cubierta vegetal, la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFA) y la biomasa verde (Zhao *et al.*, 2007).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el índice de vegetación bidimensional más utilizado en las aplicaciones agrícolas ya que reúne tres características importantes: su sencillez matemática, su fácil interpretación y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación, alcanzando un alto grado de correlación con diversos parámetros de interés agronómico, además de disponer de un rango de variación fijo (entre  $-1$  y  $1$ ), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Este índice da lugar a isolíneas de vegetación de pendiente creciente y convergente en el origen.

Aunque el NDVI se ve afectado por los efectos de los aerosoles y por la saturación en las regiones de alta biomasa (Huete *et al.*, 2002), es altamente sensible a los pequeños incrementos en la cantidad de vegetación fotosintética (Soudani *et al.*, 2008) y por lo tanto, está bien adaptado para capturar la dinámica de la vegetación de los sistemas de uso de suelo agrícola. El NDVI se ha utilizado ampliamente para el monitoreo de la vegetación, la evaluación del rendimiento de los cultivos y la detección de sequías (Kamble *et al.*, 2013).

Alternativamente, Gitelson *et al.* (1996) propuso el uso del índice de vegetación de diferencias verdes normalizadas (GNDVI) (donde la banda verde se sustituye por la banda roja en la ecuación de NDVI), lo cual puede resultar más útil para evaluar la variación de la copa en la biomasa de cultivos verdes. Por lo tanto, parece haber una serie de índices que podrían ser útiles para estimar la biomasa de cultivos y, en última instancia, el rendimiento de grano.

El índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) combina las reflectancias captadas en el infrarrojo cercano (NIR) y rojo (R), y utiliza un factor de corrección para minimizar la influencia del suelo llamada línea de suelo (L). El valor de este parámetro L oscila de 0 a 1 y disminuye a medida que aumenta la cubierta vegetal, con L = 1 para densidades de vegetación muy bajas, L = 0.5 para densidades de vegetación intermedias y L = 0.25 para densidades más altas; pero se sugiere que el valor de L sea de 0.5.

En el Cuadro 2 se muestran los índices de vegetación utilizados en la agricultura de precisión.

**Cuadro 2.** Índices de vegetación utilizados en la agricultura de precisión (Mulla, 2013).

Índice	Definición	Referencia
Índice verde normalizado (NG)	$G/(NIR+R+G)$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice rojo normalizado (NR)	$R/(NIR+R+G)$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice de vegetación proporcional (RVI)	$NIR/R$	Jordan, 1969
Índice de vegetación verde proporcional (GRVI)	$NIR/G$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice de vegetación diferencial (DVI)	$NIR-R$	Tucker, 1979
Índice de vegetación diferencial de verde (GDVI)	$NIR-G$	Tucker, 1979
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	$(NIR-R)/(NIR+R)$	Rouse <i>et al.</i> , 1973
Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)	$(NIR-G)/(NIR+G)$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	$1.5*[(NIR-R)/(NIR+R+0.5)]$	Huete, 1988
Índice de vegetación de verde ajustado al suelo (GSAVI)	$1.5*[(NIR-G)/(NIR+G+0.5)]$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice de vegetación ajustado y optimizado al suelo (OSAVI)	$(NIR-R)/(NIR+R+0.16)$	Rondeaux <i>et al.</i> , 1996
Índice de vegetación de verde ajustado y optimizado al suelo (GOSAVI)	$(NIR-G)/(NIR+G+0.16)$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice de vegetación ajustado al suelo modificado (MSAVI2)	$0.5*[2*(NIR+1)SQRT((2*NIR+1)^2-8*(NIR-R))]$	Qi <i>et al.</i> , 1994

G: Verde, R: Rojo, NIR: Infrarrojo cercano.

Los IV son útiles para cartografiar la variabilidad espacial dentro de parcelas y campos agrícolas (Mulla, 2013) y constituyen la base de la agricultura de precisión que requiere un monitoreo rentable de los cultivos para la aplicación específica del agua e insumos agrícolas (Govaerts *et al.*, 2007).

Los estudios agrícolas recientes basados en los índices de vegetación calculados a partir de imágenes adquiridas desde los VANTs han demostrado tener aplicaciones, tales como el mapeo de la cobertura foliar en cereales (Kipp *et al.*, 2014; Torres-Sánchez *et al.*, 2014), el contenido de clorofila (Berni *et al.*, 2009), las infestaciones de malezas (Torres-Sánchez *et al.*, 2013), las enfermedades de las plantas (García-Ruiz *et al.*, 2013) y los impactos del control de malezas en los cultivos (Rasmussen *et al.*, 2013; Streibig *et al.*, 2014). Los IV de las imágenes térmicas también han mostrado resultados favorables para detectar el estrés hídrico en los cereales (Berni *et al.*, 2009) y en los viñedos (Bellvert *et al.*, 2014).

### **3.5. Índice de área foliar**

El Índice de Área Foliar (IAF), es una cantidad adimensional, que presenta el área de la hoja (lado superior solamente) por unidad de área de suelo debajo de ella. Se expresa como  $m^2$  área foliar por  $m^2$  de área de suelo. Es una variable biofísica ampliamente utilizada en la investigación forestal y agrícola (Fang, 2015). Para un cultivo dado, el IAF cambia a lo largo del periodo de crecimiento y alcanza normalmente su máximo valor antes o en la floración. El IAF también depende de la densidad de las plantas y de la variedad del cultivo (Allen *et al.*, 2006).

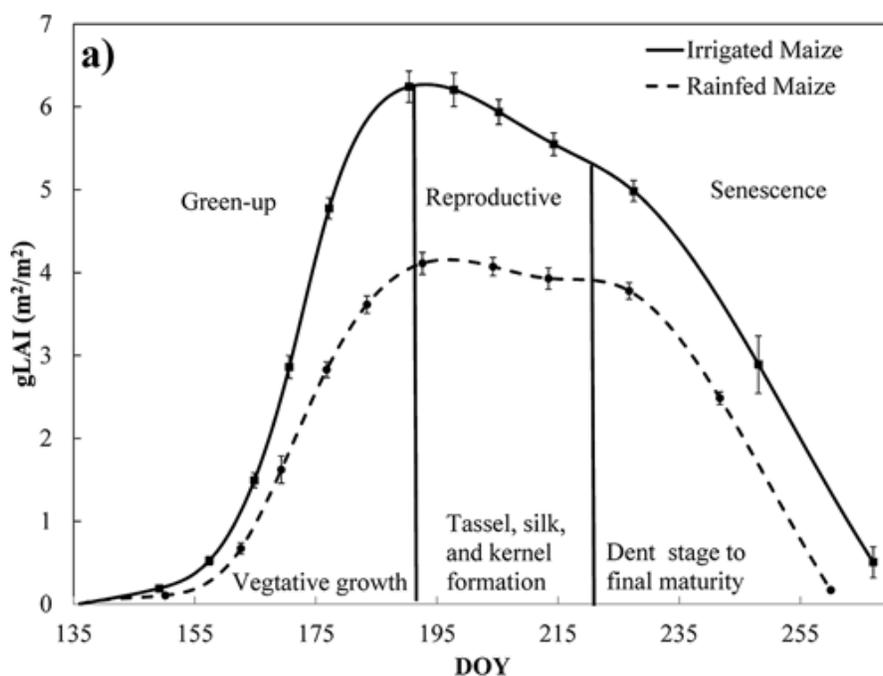
La determinación del IAF constituye un parámetro fundamental en la evaluación del desarrollo y crecimiento de los cultivos (Haboudane, 2004), en estudios de requerimientos hídricos y eficiencia bioenergética y en la determinación de daños producidos por patógenos y plagas. Además, por su estrecha relación con la intercepción de la radiación solar, la fotosíntesis y los procesos de transpiración, aspectos fuertemente vinculados a la acumulación de biomasa y la productividad (De Oliveira *et al.*, 2007). El IAF es uno de los índices más aplicados a la experimentación para la predicción del rendimiento de los cultivos y al balance hídrico en el sistema suelo-agua-atmósfera (Kiniry *et al.*, 1996). Un aumento en el IAF proporciona un aumento de producción de biomasa; pero, debido al autosombreamiento de las hojas, la tasa fotosintética media por unidad de área foliar decrece.

Los fisiólogos, biólogos y los agrónomos han demostrado que la medición de área foliar es uno de los parámetros muy importantes en la determinación de las etapas fenológicas, en la estimación del potencial de rendimiento biológico y agronómico, en el cálculo del uso eficiente de la radiación solar, así como también en el cálculo del uso eficiente del agua y de la nutrición de los cultivos (Sonnentag *et al.*, 2008).

Existen varios métodos para la medición del área foliar; los cuales se clasifican en dos grupos: Los métodos destructivos y no destructivos, que incluyen a los métodos directos, indirectos, de estimación, de comparación y de análisis de imágenes.

La estimación del IAF a partir de los datos derivados de los sensores remotos se enfrenta a dos dificultades principales: los índices de vegetación se acercan asintóticamente a un nivel de saturación cuando el IAF excede ciertos valores que depende del tipo de cultivo y del índice de vegetación; no existe una relación única entre el IAF y un índice de vegetación, sino más bien diversas de relaciones, cada una de ellas en función del contenido de clorofila o de otras características del dosel (Haboudane *et al.*, 2004).

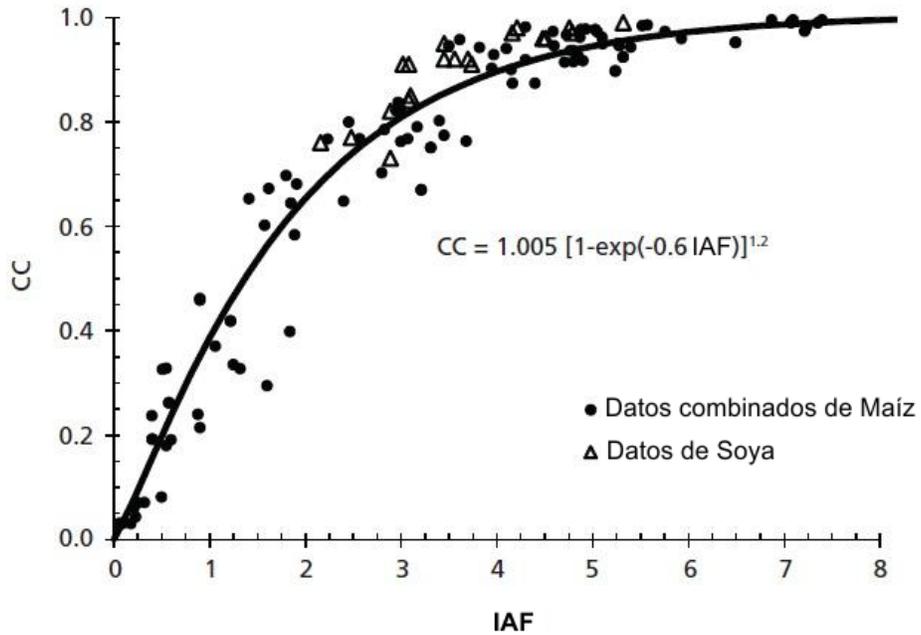
Nguy-Robertson *et al.* (2012) probaron el rendimiento de 12 índices de vegetación para estimar el IAF verde en maíz y soya; además obtuvieron un índice de vegetación, combinado que es sensible al IAF verde (Figura 10). El IAF verde representa el IAF de las hojas vivas independientemente de su capacidad fotosintética. Las hojas vivas pueden tener las características estructurales similares pero diversos contenidos de clorofila.



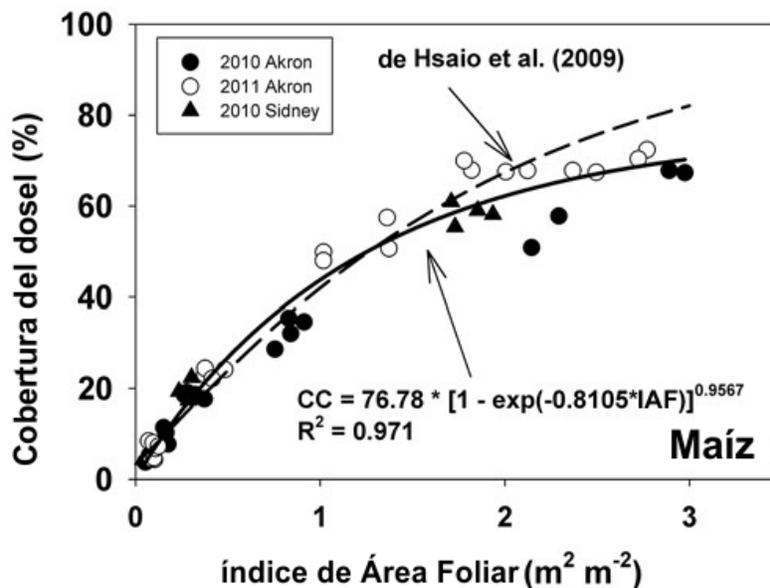
**Figura 10.** Índice de área foliar verde en las principales etapas de crecimiento del cultivo de maíz (Nguy-Robertson *et al.*, 2012).

Existe una relación entre el IAF y la cobertura del dosel (CC) sobretodo durante la fase de senescencia del dosel ya que no existe una manera sencilla para medir la cobertura del dosel, la cual se refiere únicamente a la cobertura verde, porque las hojas verdes y amarillas se entremezclan e incluso algunas hojas son mitad verdes y mitad amarillas, por tanto, convertir el IAF medido a CC es la única manera de obtener valores de CC durante esta fase del cultivo. Como guía general, la CC es 0.95 o mayor cuando el IAF excede un valor cercano a 4.5 o 5.0

(Figura 11), con algunas excepciones como son las especies que dependen en gran medida del seguimiento de la luz solar, como el girasol, que requiere un IAF de 3.5 para lograr la cobertura completa del dosel (Figura 12). Otra excepción es cuando el cultivo está plantado en grupos o muy cerca el uno del otro en filas con suficiente separación; en este caso, un IAF significativamente mayor que 5.0 es necesario para lograr la cobertura completa del dosel (Steduto *et al.*, 2012).



**Figura 11.** Cobertura de dosel en relación con el índice de área foliar basada en los datos obtenidos para maíz (datos combinados de varios tratamientos y años) y soja (Hsiao *et al.*, 2009).



**Figura 12.** Relación entre el índice de área foliar y la cobertura del dosel para maíz (Nielsen *et al.*, 2012).

### 3.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se define como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos (Er-Raki *et al.*, 2010). Por lo tanto, se necesita una división exacta de los modelos entre la evaporación del suelo y la transpiración para comprender mejor el ciclo hidrológico, desarrollar una planificación precisa del riego, mejorar la productividad de los cultivos y mejorar la eficiencia del uso del agua (Ding *et al.*, 2013)

Más del 90% del agua utilizada en la agricultura se pierde por evaporación del suelo y transpiración de los cultivos, refiriéndose a la evapotranspiración del cultivo. La función de evaporación y transpiración son diferentes, la transpiración está asociada con la productividad de los cultivos, mientras que evaporación no contribuye directamente (Kool *et al.*, 2014); la transpiración está fuertemente ligada, ya que se produce simultáneamente con la fotosíntesis a través de los poros estomáticos de las hojas (Pieruschka *et al.*, 2010). Por el contrario, la evaporación directa del suelo no es un factor que contribuye a la producción de cultivos, y debería reducirse mediante prácticas de manejo (por ejemplo, estrategias adecuadas de riego y cobertura de suelo) (Zhao *et al.*, 2010), por lo que la transpiración es considerado como el componente deseable, pero la evaporación como componente indeseable (Agam *et al.*, 2012). Una mejor comprensión de los componentes de la ET y de la cantidad de agua que se utiliza a través de la transpiración de las plantas puede ayudar a investigar si el riego puede ser mejorado y el agua disponible puede ser usada de manera más eficiente (Zhao *et al.*, 2013; Kool *et al.*, 2014).

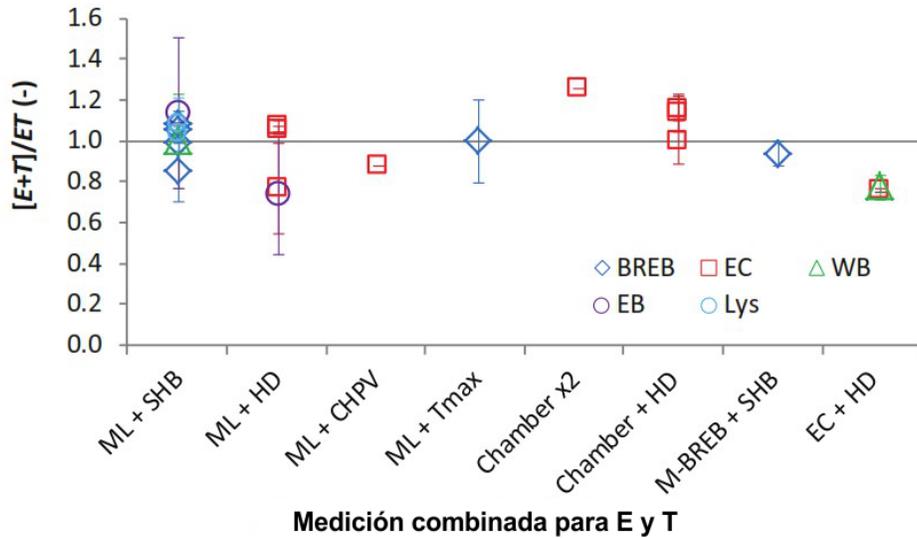
La evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

La ET es altamente variable en espacio y tiempo. Es variable en el espacio debido a las diferencias en la distribución de la precipitación, a las características de los diversos tipos de suelo y a los diferentes estratos de vegetación, mientras que la variabilidad en el tiempo se refiere a los cambios que ocurren en las condiciones climáticas, y los que el cultivo presenta a lo largo de su ciclo de desarrollo. Por lo cual es un proceso difícil de cuantificar (Irmak *et al.*, 2011) y a pesar de que se han estudiado por un largo tiempo aún sigue existiendo incertidumbre en la precisión de las estimaciones.

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia ( $E_{To}$ ), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $E_{Tc}$ ), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $E_{Tc aj}$ ) (Allen *et al.*, 2006).  $E_{To}$  es un parámetro que expresa el poder evaporante de la atmósfera y que está directamente relacionado con el clima.  $E_{Tc}$  se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo, adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas.  $E_{Tc}$  requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

Los métodos para estimar la ET pueden ser clasificados en cinco grandes grupos: Aerodinámicos, balance energético, combinatorios, semiempíricos y empíricos.

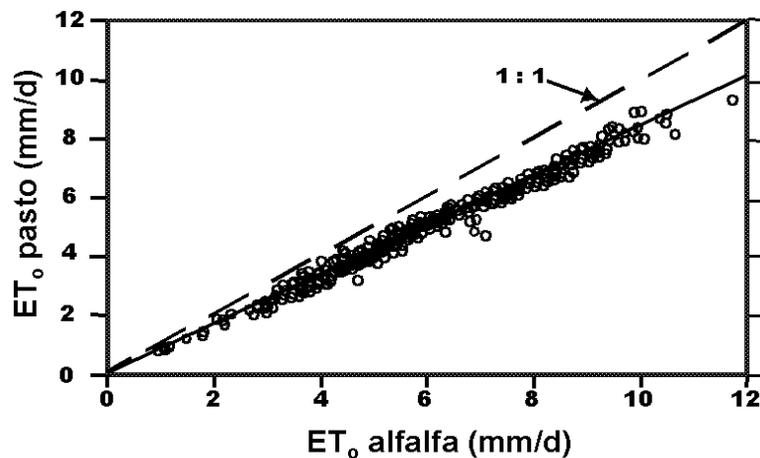
Los métodos aerodinámicos se basan en las leyes de transferencia de calor y masa, los de balance energético, en principios físicos de conservación de masa y energía, y los combinatorios son una mezcla de los aerodinámicos y de balance energético. Los métodos semiempíricos parten de principios físicos para obtener una ecuación base, sin embargo, la mayor parte de sus parámetros se estima mediante la técnica de regresión. Por último, los métodos empíricos se basan en ecuaciones totalmente empíricas, en las que los parámetros se obtienen por la técnica de regresión y no se fundamentan en principios físicos. En la Figura 13 muestra una evaluación de ocho combinaciones de medidas independientes de evaporación de la superficie del suelo (E) y transpiración (T); estas combinaciones de E y T se compararon con medidas de evapotranspiración utilizando la relación  $E + T/ET$  con el objetivo de derivar tendencias que pudieran indicar la precisión de los métodos. Cada punto representa un solo estudio y cada color indica los diferentes métodos para ET (ML: micro-lisímetro, SHB: equilibrio térmico del vástago, HD: disipación del calentador, Tmax: temperatura máxima, Chamber: cámara, CHPV: velocidad del pulso de calor compensado, (M) -BREB: (micro) relación de Bowen, EC: Covarianza turbulenta, EB: balance de energía, Lys: lisímetro de pesaje, WB: balance de agua).



**Figura 13.** Evaluación de combinaciones de medidas de evaporación y transpiración (Kool *et al.*, 2014).

### 3.6.1. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración potencial de un cultivo con características específicas (de referencia), usualmente pasto o alfalfa, que tiene sentido físico ya que su evapotranspiración se puede estimar a través de mediciones directas (Allen, 1996). En la Figura 14 se compara la evapotranspiración en dos cultivos de referencia pasto y alfalfa, estimados a partir de una ecuación tipo Penman cuyos parámetros fueron calculados con datos de lisímetros de varias localidades alrededor del mundo.



**Figura 14.** Evapotranspiración de dos cultivos de referencia (Wright, 1996).

La  $ET_0$  es la tasa evapotranspirativa de una superficie con una cobertura completa de un cultivo hipotético sin limitaciones de agua con una altura de 0.12 m. con una resistencia superficial de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0.23, que se asemeja a la evaporación que ocurre en

una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente (Allen *et al.*, 2006).

No se debe confundir la evapotranspiración estimada con la evapotranspiración medida. Solamente los lisímetros y los métodos micrometeorológicos como el método de la correlación turbulenta proporcionan medidas muy aproximadas a la evapotranspiración real del cultivo, mientras que los demás solo proporcionan una estimación de la evapotranspiración de referencia. Hay varios métodos para estimar la ETo con diferentes requerimientos de datos y grado de precisión. Algunos requieren datos mensuales, otros diarios, algunos horarios, y los más precisos datos de segundos. Para unos se requieren de mediciones de las cuatro variables meteorológicas (humedad y temperatura ambiental, radiación solar y velocidad del viento) relacionadas con la evapotranspiración, mientras que para otros solo se requiere de alguna combinación de las cuatro variables.

La FAO recomienda el uso del método de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998), las ventajas del método son las siguientes:

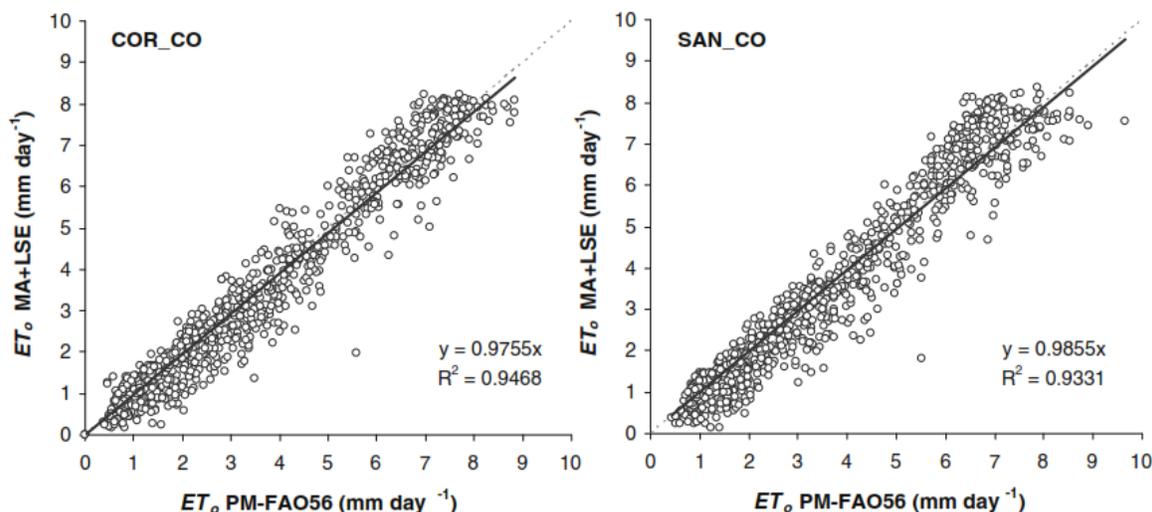
- Modelo físicamente establecido
- Incorpora parámetros fisiológicos del cultivo
- Incorpora parámetros aerodinámicos
- Probado intensamente en varias localidades alrededor del mundo
- Buena aproximación para estimar la evapotranspiración de referencia para pasto

El método de FAO Penman-Monteith para estimar ETo, es derivado de la ecuación original de Penman-Monteith y de las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial. La ETo provee un estándar de comparación mediante el cual: se puede comparar la evapotranspiración en diversos períodos del año o en otras regiones y se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

Se espera que la ETo como base para la estimación práctica de ETc continúe debido a su uso actual, aceptación generalizada, rendimiento consistente y relativamente bueno proporcionado por la definición de ETo y por los parámetros de estandarización basados en el método Penman-Monteith como se establece en la FAO56 y por ASCE-EWRI (2005).

La ETo, seguirá siendo utilizado para caracterizar el clima local o como un componente de los índices de sequía donde ETo es contrastado con la precipitación (Dai, 2011; Paulo *et al.*, 2012) o donde las anomalías en ETo se utilizan para indicar el inicio de las sequías (McEvoy *et al.*, 2012).

Cruz-Blanco *et al.* (2014) calcularon la ETo con el método FAO Penman-Monteith y con un enfoque alternativo denominado MA+LSE basado en la ecuación Makkink-Advection (MAK-Adv) en combinación con la radiación solar detectada de forma remota y un pronóstico meteorológico numérico de la temperatura del aire cercana a la superficie (Figura 15). En conclusión la ETo es fundamental para la generación de programas de riego, es un componente clave para una buena gestión del agua de riego.



**Figura 15.** Regresiones de ETo diario utilizando FAO Penman-Monteith y MA + LSE para dos estaciones (Cruz-Blanco *et al.*, 2014).

### 3.6.2. Evapotranspiración del cultivo

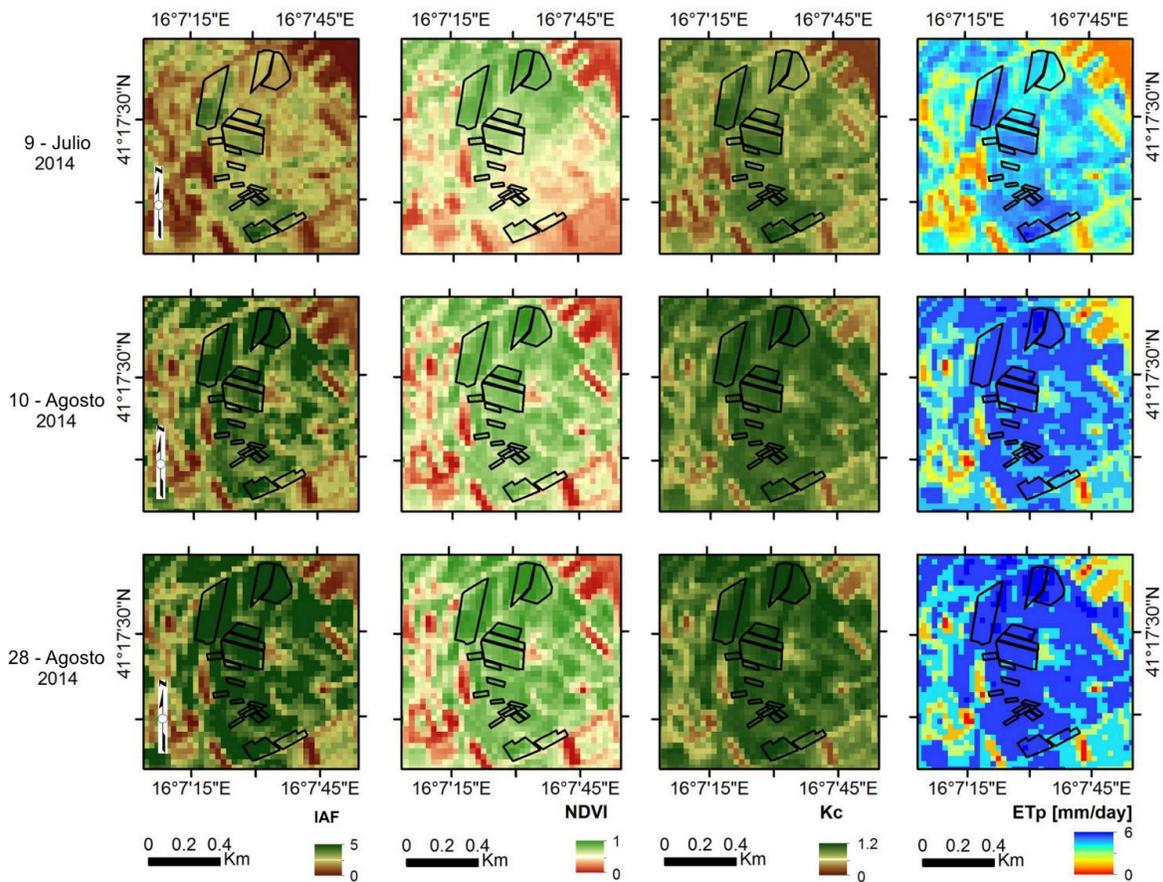
La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) se denomina como el enfoque del coeficiente del cultivo (K<sub>c</sub>) y la evapotranspiración de referencia (ETo) que considera los efectos del cultivo y clima respectivamente. Las contribuciones de la FAO-56 incluyeron un análisis profundo y la descomposición de las dos etapas K<sub>c</sub>-ETo para estimar el uso del agua de los cultivos y la expansión de K<sub>c</sub> para determinar la ET<sub>c</sub> bajo diferentes condiciones de crecimiento y manejo de los cultivos, teniendo en cuenta las influencias de a) etapa de crecimiento del cultivo, cantidad de vegetación y tipo de cultivo; b) La fecha de siembra, la duración del cultivo y la cosecha; c) espaciamiento entre plantas, densidad de plantas, altura del cultivo y arquitectura del dosel; d) frecuencia de mojado y su distribución; e) disponibilidad de agua en el suelo y estrés hídrico asociado; f) salinidad del suelo y agua y g) prácticas de cultivo. El modelo FAO-56 es el método más utilizado para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (Pereira *et al.*, 2015).

ET<sub>c</sub> desempeña un papel clave en el balance energético e hídrico de los sistemas agrícolas (Burba & Verma, 2005). El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo es el siguiente:

- Identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada; etapa y seleccionando los valores correspondientes de Kc.
- Ajustar los valores de Kc seleccionados según la frecuencia de humedecimiento o las condiciones climáticas durante cada etapa.
- Construir la curva del coeficiente del cultivo (la cual permite la determinación de Kc para cualquier etapa durante el período de desarrollo).
- Calcular ETC como el producto de ETo y Kc.

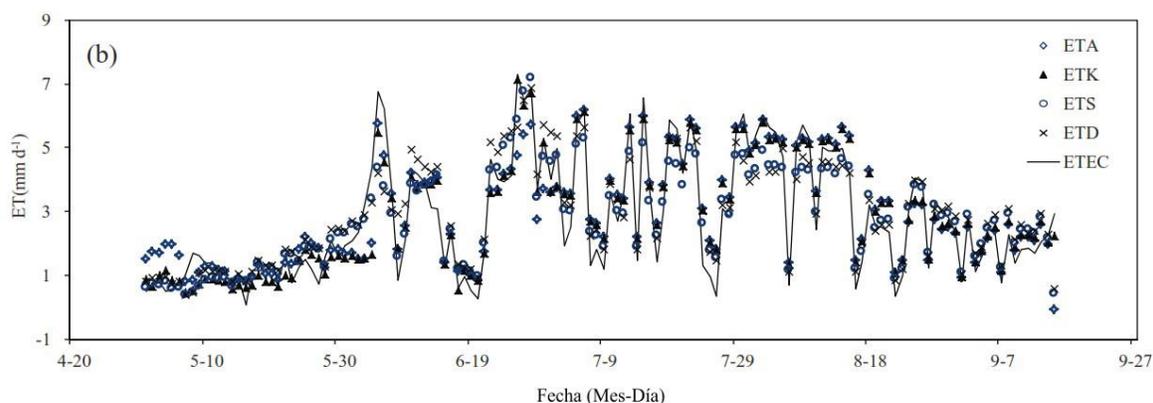
Debido a que los valores medidos de ETC son en su mayoría restringidos e influenciados por una pequeña área dentro de los cultivos, se han realizado diversas investigaciones sobre la ETC, que estudian las tendencias espaciales de la evapotranspiración.

Vanino *et al.* (2015) determinaron la evapotranspiración del cultivo vinculados a los días grado crecimiento y a las principales etapas fenológicas del viñedo (Figura 16). La ETC se obtuvo usando datos de imágenes satelitales y el enfoque de coeficiente único del cultivo para establecer relación entre los índices de vegetación y el Kc durante dos temporadas del cultivo.



**Figura 16.** Mapas de LAI, NDVI, Kc y ETC para campos de viñedo (Vanino *et al.*, 2015).

Jiang *et al.* (2014) en su investigación evaluaron los efectos de la densidad de siembra sobre el  $K_c$  y  $ET_c$  de maíz; desarrollaron un método relativamente simple y preciso con la relación de densidad para calcular  $K_c$  y  $ET_c$  y compararon la precisión de la  $ET_c$  utilizando los métodos de coeficiente de cultivo ajustado (método de Allen), coeficiente basal ( $K_{cb}$ ), coeficiente único de evaporación ( $K_{cm}$ ) y coeficiente de densidad ( $K_{densidad}$ ), con el fin de validar si el método  $K_{densidad}$  tiene un mejor rendimiento en el cálculo de  $ET_c$  bajo diferentes densidades de siembra o no (Figura 17).



**Figura 17.** Evapotranspiración del cultivo estimado a partir de las variaciones de  $K_c$  (Jiang *et al.*, 2014).

### 3.7. Coeficiente de cultivo

Existen dos enfoques de cálculo para obtener los coeficientes de cultivo: los enfoques del coeficiente único y del coeficiente dual del cultivo (Allen *et al.*, 2006). Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo ( $K_c$ ). El coeficiente único  $K_c$  incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo, de la evapotranspiración del cultivo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivo son apropiados y más convenientes que los valores de  $K_c$  calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo. Solamente en los casos en que el  $K_c$  sea necesario para períodos diarios, para cultivos específicos y para años específicos, se requerirá los coeficientes separados de transpiración y evaporación.

En el enfoque del coeficiente dual del cultivo, el coeficiente del cultivo se divide en dos factores que describen por separado los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación de suelo. Se utilizan dos coeficientes: el coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) para describir la

transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación del agua del suelo ( $K_e$ ) para describir la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. El coeficiente único  $K_c$  es remplazado por:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (1)$$

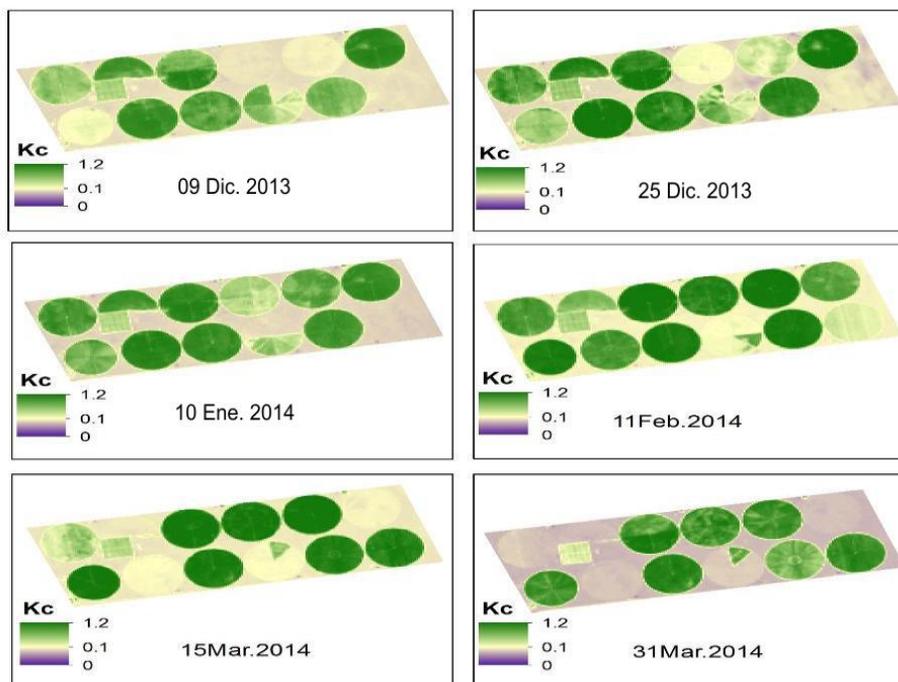
El coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) se define como la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia ( $ET_c / ET_o$ ) cuando la superficie del suelo se encuentra seca pero la transpiración mantiene su tasa potencial, es decir donde la transpiración no está limitada por la ausencia del agua. Por lo tanto,  $K_{cb} ET_o$  representa esencialmente el componente de la transpiración en el valor de  $ET_c$ ; el término  $K_{cb} ET_o$  incluye además la evaporación residual producida por la difusión del agua del suelo que se encuentra por debajo de la superficie seca del terreno.

El coeficiente de la evaporación  $K_e$  representa al componente de la evaporación en el valor de  $ET_c$ . Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia, el valor de  $K_e$  será máximo. El valor  $K_e$  se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo o incluso cero cuando no exista agua remanente para ser evaporada. La estimación del valor de  $K_e$  requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo.

El coeficiente  $K_c$  es específico para cada cultivo y varía a lo largo de su desarrollo fenológico, estos valores son necesarios para ajustarse a diferentes regiones climáticas y condiciones de tipo de suelo, sobre todo considerando futuras proyecciones de cambio climático que pueden alterar la duración de las etapas fenológicas (Moriondo *et al.*, 2015). El  $K_c$  varía en el espacio y en el tiempo debido a la variabilidad inherente en la fecha de siembra, la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la precipitación antecedente, la emisividad, la cantidad de vegetación y las condiciones atmosféricas, como la temperatura del aire, la velocidad del viento y el déficit de presión de vapor (Kamble *et al.*, 2013).

Las características espectrales de la vegetación pueden proporcionar una estimación indirecta del coeficiente de cultivo o coeficiente basal del cultivo. De hecho, varios autores han probado la similitud entre los patrones estacionales de los diferentes índices de vegetación y la transpiración sobre los cultivos anuales (Duchemin *et al.*, 2006; Er-Raki *et al.*, 2007).

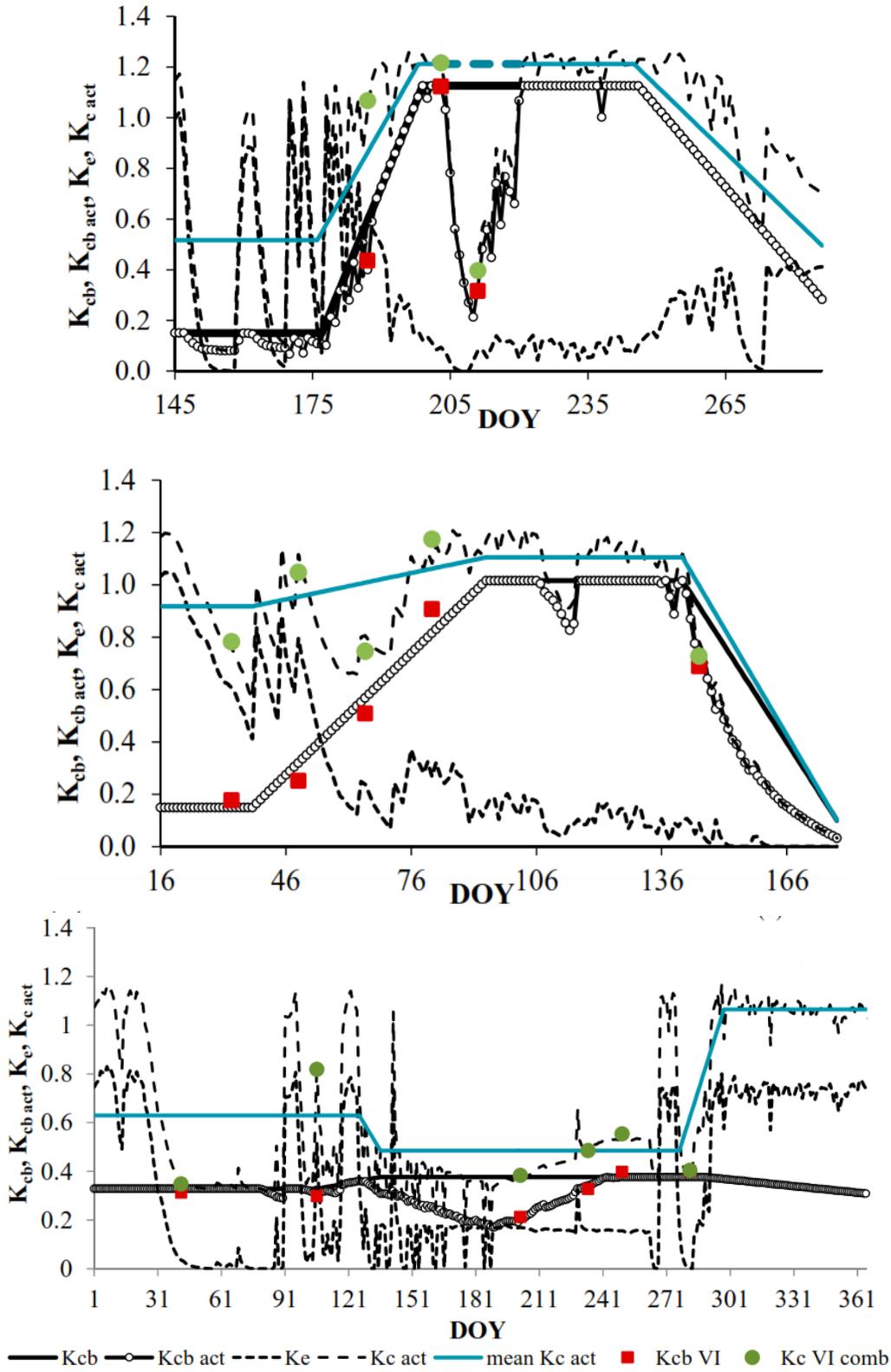
Uno de los métodos comúnmente utilizados para las estimaciones del  $ET_c$  y  $K_c$  son las relaciones empíricas entre los índices de vegetación y las observaciones de campo. Los índices usados para estimar  $K_c$  son el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de vegetación de diferencia ponderada (WDVI); el más estudiado es el NDVI. En la Figura 18 se observan los valores de  $K_c$  para el cultivo de trigo estimados mediante técnicas de sensores remotos.



**Figura 18.** Cambio en los valores de Kc durante la temporada de crecimiento del trigo (El-Shirbeny *et al.*, 2014).

Una de las ventajas de utilizar los coeficientes reales de los cultivos basados en índices de vegetación (IV) es la capacidad de explicar las variaciones en el crecimiento de las plantas debido a condiciones climáticas anormales; además permite obtener la variación espacial del Kc real (o Kcb) dentro del campos de cultivo. Existen varios estudios reportados en la literatura que relacionan Kc (o Kcb) con IV para diferentes tipos de vegetación. Los más recientes se enfocan en la estimación de Kcb debido a que la transpiración de la planta está directamente más relacionada con el IV. Existen estudios que consideran una relación lineal entre Kc y NDVI (Farg *et al.*, 2012; Kamble *et al.*, 2013; Singh & Irmak, 2009), Kcb y NDVI (Campos *et al.*, 2010; Johnson & Trout, 2012; Navarro *et al.*, 2016), Kcb y SAVI (Jayanthí *et al.*, 2007; Odi-Lara *et al.*, 2016) y una relación exponencial entre Kc y NDVI (Er-Raki *et al.*, 2013): otros estudios determinan Kc o Kcb basados en el porcentaje de cobertura del suelo o índice de área foliar (IAF) (Fernández-Pacheco *et al.*, 2014)

En el trabajo realizado por Pôças *et al.* (2015) se desarrolló y probó una nueva ecuación para determinar Kcb real basado en IV, considerando el coeficiente de estrés (Ks) y el coeficiente de densidad (Kd ) calculados con la fracción de cobertura del suelo (fc) estimado con IV; además de un enfoque combinado para estimar Kc utilizando Kcb y Ke obtenido con el modelo diario de balance hídrico del suelo, para los cultivos de maíz, cebada y olivo (Figura 19).



**Figura 19.** Variación estacional de los coeficientes diarios  $K_{cb}$ ,  $K_{cb\ act}$ ,  $K_e$  y  $K_{c\ act}$  para maíz, cebada y olivo (Pôças *et al.*, 2015).

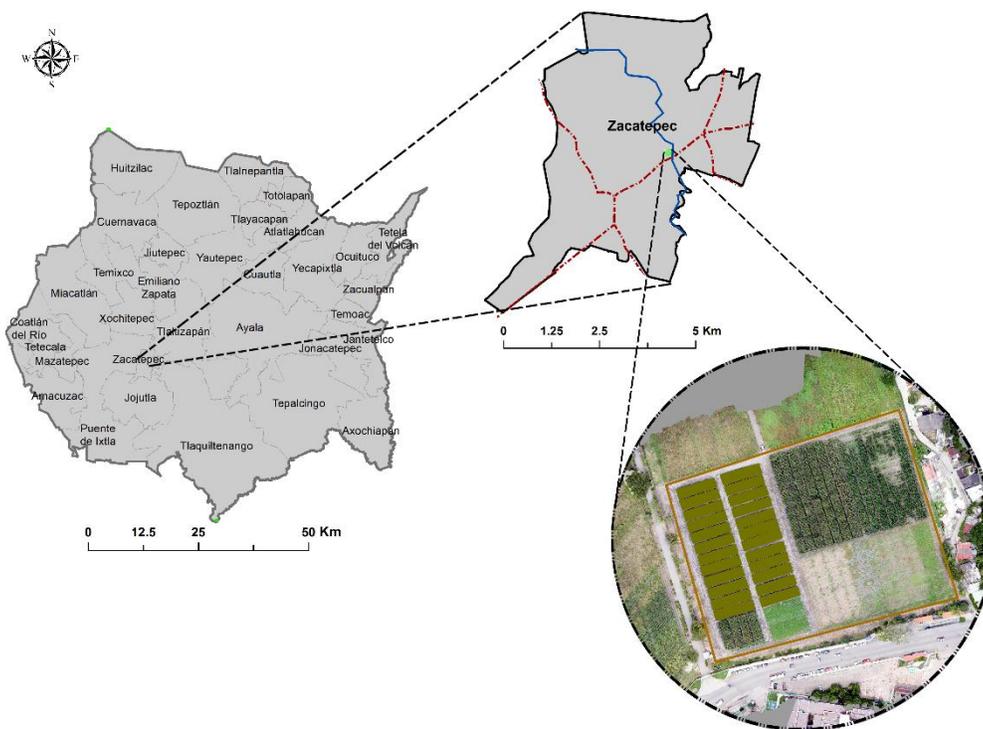
## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describe el sitio de estudio, los materiales y métodos que serán utilizados en cada uno de los capítulos presentados en este trabajo.

### 4.1. Sitio de estudio

El estudio se realizó en el campo experimental Zacatepec del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en el municipio de Zacatepec, al sur del Estado de Morelos, en la región de los valles entre las coordenadas  $18^{\circ}39' 6.45''\text{N}$  y  $99^{\circ} 11' 59.63''\text{O}$  (Figura 20).

El sitio experimental presenta un clima cálido sub-húmedo con una temperatura media anual de  $24.3^{\circ}\text{C}$ , tiene una estación seca de noviembre a mayo, el temporal de lluvias inicia a mediados del mes de mayo y finaliza los últimos días de octubre. La precipitación media es de  $892\text{ mm.}$ , con un máximo de lluvia en los meses de junio, julio y septiembre.



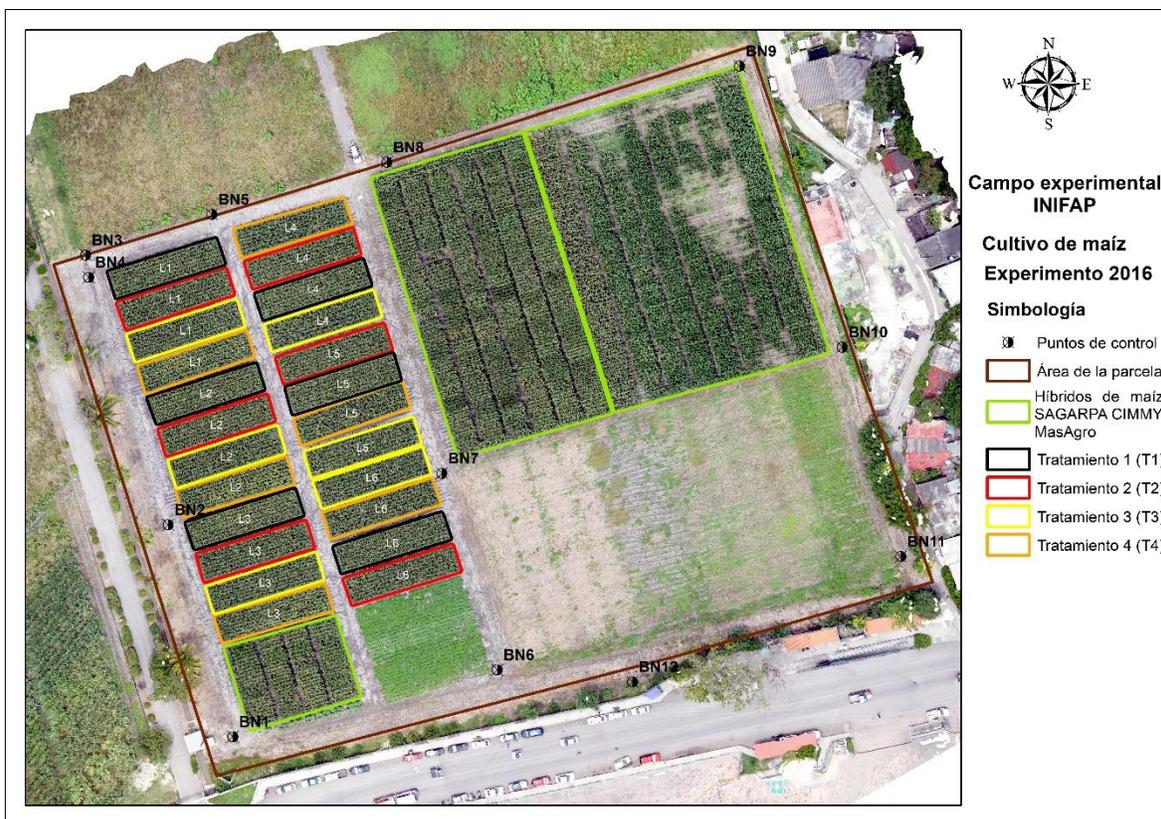
**Figura 20.** Localización de la zona de estudio.

La parcela experimental cubre una superficie de  $2\text{ ha}$ , donde  $1\text{ ha}$  corresponde al cultivo de maíz, de las variedades H-515 e híbridos de maíz blanco y amarillo utilizados en investigaciones por la SAGARPA-CIMMYT-MasAgro. Las fechas de siembra fueron de 5 al 7 de julio del 2016.

En el híbrido de maíz H-515 se analizaron cuatro tratamientos con seis repeticiones, cada una en un área de 6 m × 25 m con una separación entre surcos de 0.8 m (Figura 21); los tratamientos consistieron en los diferentes sistemas de labranza y densidad de población, tal como se describen a continuación:

- Tratamiento 1 (T1): Sistema de labranza cero con rastrojo no removido y densidad de 80,000 plantas/ha.
- Tratamiento 2 (T2): Sistema de labranza cero con rastrojo no removido y densidad de 60,000 plantas/ha.
- Tratamiento 3 (T3): Sistema de labranza cero con rastrojo removido y densidad de 60,000 plantas/ha.
- Tratamiento 4 (T4): Sistema de labranza mínima con rastrojo removido y densidad de 60,000 plantas/ha.

Parámetros agronómicos como el índice de área foliar (IAF), la altura y grosor de las plantas, y el número y la longitud de las hojas se midieron directamente en campo, tal como se describe en los siguientes capítulos.



**Figura 21.** Distribución de los tratamientos y de los puntos de control en la parcela.

## 4.2. Materiales

La plataforma aérea para la adquisición de las imágenes estuvo integrada por un VANT y dos cámaras digitales. El VANT empleado fue un hexacóptero DJI A2 (Figura 22). Este vehículo tiene la capacidad de realizar despegues y aterrizajes verticales, posee una autonomía de vuelo de 15 minutos, una capacidad de carga de 2.5 kg y una máxima velocidad de ascenso y descenso de 6 m/s. La aeronave está dotado de un sistema GPS que le permite volar sobre una ruta previamente programada que se acciona automáticamente para la toma de las imágenes según la configuración de vuelo. En el momento de la captura de cada imagen, el VANT registra su posición GPS, su altura y la hora.

Las cámaras utilizadas fueron una Multispectral Tetracam ADC Snap y una Sony  $\alpha$  5100. La cámara Tetracam ADC Snap posee 12.4 mm de distancia focal verdadera, sensor de 1.3 megapíxeles (1280 x 1024 pixel) y obturador electrónico global de acción rápida; esta cámara cuenta con las bandas del rojo (R), verde (G) e infrarrojo Cercano (NIR), con un rango de 520 a 920 nanómetros. La cámara Sony  $\alpha$  5100 (ILCE-5100L) con distancia focal de 16 mm, toma las imágenes con un sensor de 24.3 megapíxeles (6,000 x 4,000 píxeles) en color verdadero RGB (por las siglas en inglés Red-Green-Blue).

El GPS RTK (Global Positioning System-Real Time Kinematic) marca TopCon modelo GR-5 se utilizó para obtener las coordenadas en tiempo real de puntos terrestres. La precisión del GPS es menor a un 1 cm en la vertical y la horizontal; cuenta con dos antenas, una de posición fija y otra móvil que se desplaza en cada punto donde se desee obtener sus coordenadas.

El ceptómetro modelo AccuPAR LP-80 se empleó para calcular la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y estima el índice de área foliar (IAF). Este equipo consiste en un registrador de datos (datalogger) y una sonda impulsada por un microprocesador; la sonda contiene 80 sensores independientes, espaciados a 1 cm entre sí. Los fotosensores miden la RFA en las longitudes de onda en la banda de los 400-700 nm. Además, se utilizaron materiales menores como nivel de mano, vernier, y cinta métrica para medir el grosor de la planta, la altura, ancho y largo de la hoja.



**Figura 22.** Hexacóptero DJI A2 en vuelo sobre el campo de cultivo.

### **4.3. Métodos**

Se utilizó la técnica fotogramétrica para el procesamiento de las imágenes obtenidas con la plataforma VANT y generar modelos digitales de elevación (MDE) y ortomosaicos para cada una de las fechas analizadas. La precisión de los MDE y ortomosaicos se determinó mediante un análisis estadístico de bondad de ajuste. Se obtuvieron índices de vegetación RGB y multiespectrales de los ortomosaicos para calcular las variables agronómicas del maíz: cobertura vegetal del cultivo, índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) y evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ); y a partir de los modelos digitales de elevación se determinó la altura de las plantas del cultivo. Estas metodologías se explican a detalle en los capítulos siguientes.

## 5. GENERACIÓN DE LOS ORTOMOSAICOS

### 5.1. Metodología

#### 5.1.1. Apoyo topográfico

Se colocaron 12 puntos de control fijo distribuidos uniformemente sobre el terreno antes de realizar el primer vuelo (Figura 23). Las coordenadas de estos puntos se obtuvieron con el GPS RTK modelo GR-5. Las coordenadas de cada punto de control se muestran en el Cuadro 3, en el sistema UTM Zona 14 Norte datum WGS84.

**Cuadro 3.** Coordenadas de los puntos de control.

Punto	X (m)	Y (m)	Z (m)
BN1(Base)	479033.064	2062337.588	910.976
BN2	479018.467	2062385.610	910.584
BN3	478999.770	2062446.656	910.879
BN4	479000.483	2062441.633	910.741
BN5	479028.369	2062455.887	910.781
BN6	479092.914	2062352.753	910.341
BN7	479080.389	2062397.246	910.518
BN8	479067.960	2062467.671	910.883
BN9	479147.725	2062489.464	910.918
BN10	479170.954	2062425.817	910.666
BN11	479184.243	2062378.391	910.485
BN12	479123.495	2062350.031	910.839



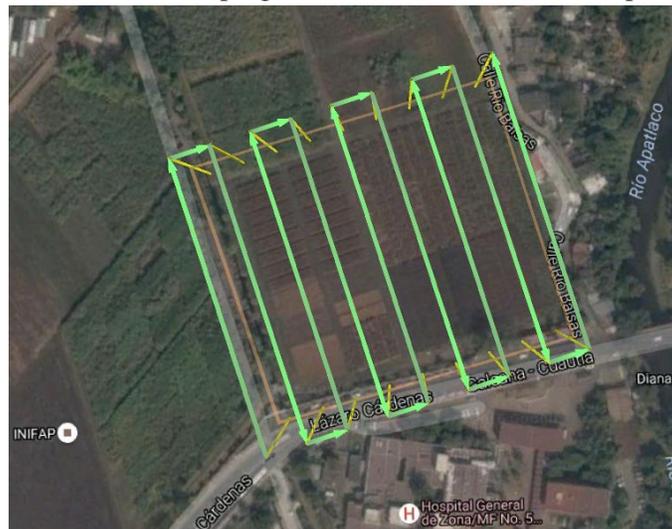
**Figura 23.** Ubicación del punto base (izquierda) y marca de un punto de control en el terreno (derecha).

### 5.1.2. Misión de vuelo y adquisición de imágenes

En esta fase se planifican las misiones de vuelo y se configura el VANT para la adquisición de las imágenes con la resolución adecuada. En este caso, las misiones de vuelo fueron programadas y ejecutadas mediante el software UGCS, cubriendo una superficie de 2 ha sobre el cultivo. Con la cámara multispectral se realizaron dos misiones de vuelo (Figura 24) con las siguientes características: altura media de vuelo de 52 m sobre la superficie, resolución del terreno en la imagen de 2.10 cm/píxel, traslape lateral y frontal del 75% y una velocidad media de vuelo de 6 m/s; estas dos misiones se ejecutaron en un tiempo efectivo de 11 minutos con un total de 26 líneas de vuelo trazadas a una distancia entre líneas de 7 m. Con la cámara Sony se realizó una sola misión (Figura 25) con una resolución del terreno en la imagen 1.25 cm/píxel, un tiempo efectivo de vuelo de 4 minutos, con 9 líneas de vuelo a una distancia entre líneas de 22 m., la altura de vuelo, el traslape y la velocidad fueron las misma que en la cámara multispectral.



**Figura 24.** Misiones de vuelo programada con la cámara Multiespectral Tetracam.



**Figura 25.** Misión de vuelo programada con la cámara Sony.

Una vez obtenidas las características de vuelo se realizó el despegue manual del VANT, se ejecutó la misión de vuelo programada de manera automática y terminado el recorrido se pasó a control manual para proceder al aterrizaje. Es importante vigilar la potencia de los motores, estado de las baterías y posición durante el vuelo.

Las imágenes se adquirieron en 11 fechas distribuidas a lo largo del desarrollo del cultivo, a los 11, 18, 26, 53, 73, 86, 94, 101, 114, y 128 días después de la siembra (DDS). En cada vuelo se obtuvo en promedio 104 imágenes con la cámara Sony y 326 con la cámara multispectral.

### 5.1.3. Procesamiento de imágenes

Las imágenes obtenidas con la cámara multispectral fueron corregidas radiométricamente con el software PixelWrench2 (PW2); usando como base la imagen de un espectralón tomado con la cámara en campo (Figura 26). Este espectralón fue proporcionado por el fabricante de la cámara.



**Figura 26.** Espectralón empleado para la corrección radiométrica.

La restitución fotogramétrica de las imágenes se realizó con el software PIX4D, el cual combina las imágenes aéreas tomadas con el VANT; convirtiéndolas en mapa 2D o 3D, mediante la obtención de nube de puntos, modelo digital de elevaciones y ortomosaicos. El software Pix4D, permitió eliminar errores en la nube de puntos para obtener resultados más precisos en el modelo digital de elevación y el ortomosaico. En el entorno del programa se realizó la corrección geométrica de las imágenes (RGB y multispectrales) en base a los 12 puntos de control terrestres.

En los modelos digitales de elevación, para determinar su precisión, se calculó la raíz del cuadrado medio del error en puntos de verificación.

## 5.1. Resultados

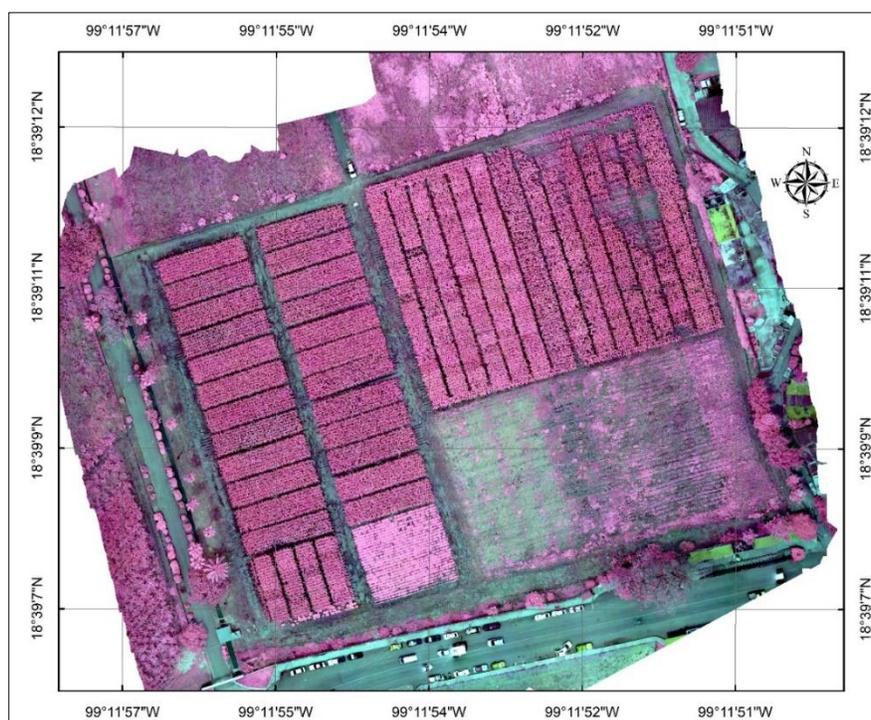
La adquisición de las imágenes desde VANT a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo permitieron monitorear los cambios en la altura del cultivo así como la tasa de crecimiento y cobertura vegetal.

En el Cuadro 4 se muestran los RMSE en el eje Z de los modelos digitales de elevación (MDE) que se obtuvieron durante el desarrollo fenológico del cultivo; estos modelos digitales tienen precisiones de centímetros. El 15 de julio se presenta el mayor error en MDE (RMSE=10.76 cm), ya que solamente se procesaron 5 puntos de control mal distribuidos sobre el terreno; y el 13 de octubre presenta el menor error en el modelo (RMSE=1.90 cm).

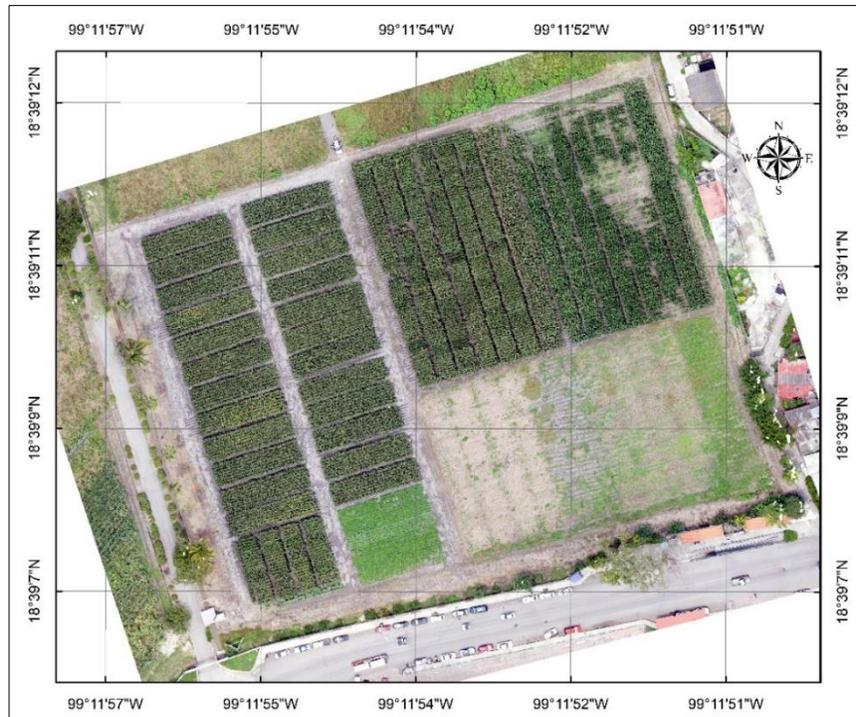
**Cuadro 4.** Errores obtenidos en el eje Z de los MDE.

Fecha	RMSE en Z (cm)	Fecha	RMSE en Z (cm)
15 de julio	10.76	28 de Septiembre	2.47
22 de julio	4.47	06 de Octubre	2.80
30 de Julio	4.72	13 de Octubre	1.90
26 de Agosto	5.40	26 de Octubre	2.66
15 de Septiembre	2.67	09 de Noviembre	2.83

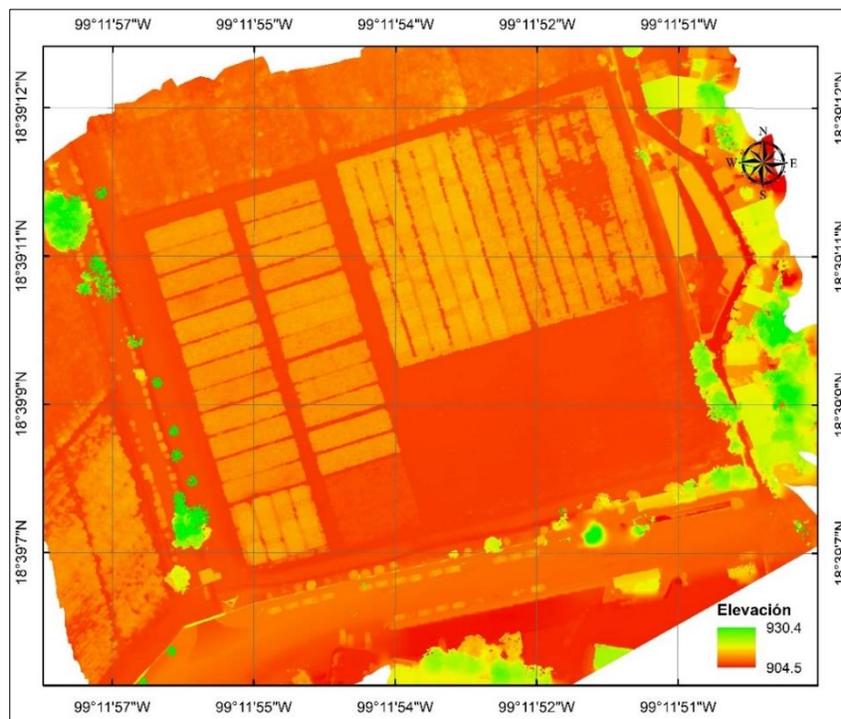
En las tres figuras siguientes, se muestran el ortomosaico RGB, multiespectral y el modelo digital de superficie ( Figura 27, Figura 28 y Figura 29), que presentan el estado del cultivo a los 73 DDS (15 septiembre).



**Figura 27.** Ortomosaico multiespectral.



**Figura 28.** Ortomosaico visible.



**Figura 29.** Modelo digital de elevación (MDE).

## **6. DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA Y ALTURA DEL CULTIVO DE MAÍZ UTILIZANDO SENSORES REMOTOS BASADO EN UN VANT.**

### **6.1. Introducción**

La cobertura vegetal se define como la fracción ocupada por la cubierta verde o la proporción de la superficie de suelo que es interceptada por la proyección vertical de la vegetación. La cobertura vegetal es un parámetro de gran importancia en el seguimiento de los cultivos, relacionado con el crecimiento del cultivo, que tiene relación directa con la evapotranspiración, ya que la evolución de la cobertura vegetal indica las fases de la evaluación del coeficiente de cultivo (Calera, 2005). En la curva de evolución del coeficiente de cultivo, el máximo valor viene definido cuando el cultivo alcanza la cobertura efectiva completa.

La determinación del momento en que se alcanza la cobertura efectiva completa suele ser compleja y costosa, ya que además de la dificultad de medir la cobertura vegetal es preciso estimarla en algunos casos en cultivos de varios metros de altura, por lo que es frecuente utilizar fases fenológicas para apreciarla. Sin embargo es necesario tener en cuenta el posible deslizamiento temporal de la fase fenológica en relación con la evolución de la cobertura. Un procedimiento para determinar la fracción de cobertura vegetal cuyo uso se está generalizando rápidamente es el de la adquisición de imágenes con ayuda de los vehículos aéreos no tripulados (VANTs). El tratamiento digital de las imágenes permite obtener la fracción o porcentaje de cobertura vegetal de los cultivos.

La altura de los cultivos se clasifica como la distancia más corta entre el límite superior de los tejidos fotosintéticos principales de una planta y el nivel del suelo (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). La mayoría de los datos de altura se recopilan con una reglas de medición simple (Torres & Pietragalla, 2012), pero que resulta ser laborioso, ineficiente y puede introducir un nivel de subjetividad en los datos recopilados. La aplicación de este método en grandes campos de cultivos limita la frecuencia y densidad de muestreo. Se necesita una adquisición rápida, precisa, continua y en temporada de estos datos para comprender mejor las influencias externas y ambientales a lo largo del ciclo de desarrollo de los cultivos. Los métodos actuales no son suficientes para satisfacer esta necesidad, en particular para usarse en ensayos de cultivos, donde el número de mediciones requeridas son muchas y como tal se necesita el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos.

Con las imágenes de alta resolución de los VANTs se pueden obtener los modelos digitales de elevación que son empleados para modelar con precisión zonas de cultivos, a partir del cual se puede calcular las alturas de los cultivos. Las reconstrucciones digitales 3D de paisajes o escenas son aplicables a de diversos campos de investigación, así como para el monitoreo de cultivos agrícolas (Holman *et al.*, 2016).

## 6.2. Objetivos

- Estimar la cobertura vegetal del cultivo de maíz, mediante índices de vegetación RGB y multiespectrales obtenidos con imágenes adquirida desde un VANT.
- Determinar la variación espacio-temporal de la altura de planta en el cultivo maíz mediante los modelos digitales de elevaciones obtenidos de las imágenes visibles de alta resolución espacial adquiridas con una plataforma VANT.

## 6.3. Metodología

### 6.3.1. Estimación de la fracción de la cobertura vegetal

Se evaluaron seis índices de vegetación (IV) para clasificar los píxeles de vegetación en cada lote de los tratamiento y estimar la fracción de cobertura vegetal del cultivo; tres de los índices de vegetación se aplicaron a los ortomosaicos RGB: índice exceso de verde (ExG) (Woebbecke *et al.*, 1995), índice de extracción de la vegetación (CIVE) (Kataoka *et al.*, 2003) y índice de vegetación verde (VIg), también conocido como índice de diferencia verde-rojo normalizado (NGRDI) (Gitelson *et al.*, 2002) y tres a los ortomosaicos multiespectrales: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973), índice de vegetación verde de diferencia normalizada (GNDVI) (Gitelson *et al.*, 1996) e índice verde normalizado (NG) (Sripada *et al.*, 2006).

$$\text{ExG} = 2g - r - b \quad (1)$$

$$\text{CIVE} = 0.441r - 0.811g + 0.385b + 18.78745 \quad (2)$$

$$\text{VIg} = \frac{G - R}{G + R} \quad (3)$$

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (4)$$

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - G}{\text{NIR} + G} \quad (5)$$

$$\text{NG} = \frac{G}{\text{NIR} + R + G} \quad (6)$$

Para el cálculo de los índices de vegetación en los ortomosaicos RGB (por las siglas en inglés Red-Green-Blue), se aplicó una normalización del espacio de color, con valores que van 0 a 1 (Gée *et al.*, 2008); este proceso de normalización se describe de la siguiente manera:

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad r = \frac{R}{R + G + B} \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (7)$$

$$R = \frac{R}{R_{\max}} \quad G = \frac{G}{G_{\max}} \quad B = \frac{B}{B_{\max}} \quad (8)$$

Donde  $R_{\max}=G_{\max}=B_{\max}$  tiene un valor de 255 para imágenes de 24 bits.

A partir de los histogramas de intensidades de las imágenes en escala de grises se calculó el valor umbral que permitió la separación entre las clases propuestas: cultivo y suelo. El valor umbral se determinó de forma automática mediante el algoritmo de umbralización de Otsu (Otsu, 1979). Los píxeles con valores de ExG, VIg y NG mayores al valor umbral se consideraron como cultivo, y para el caso del CIVE, NDVI y GNDVI los píxeles con valores menores al valor umbral se clasificaron como cultivo.

En base a la clasificación de los píxeles de vegetación obtenidas en cada índice, se determinó para cada lote la fracción de cobertura vegetal (FCV) como la relación entre los píxeles clasificados como vegetación y los píxeles totales de un área delimitada.

$$FCV = \frac{\text{Área clasificada con vegetación}}{\text{Área total delimitada}} \times 100 \quad (9)$$

La precisión de la cobertura vegetal, se evaluó comparando los valores estimados de la FCV con valores de la fracción de cobertura vegetal digitalizados ( $FCV_D$ ), mediante la siguiente expresión:

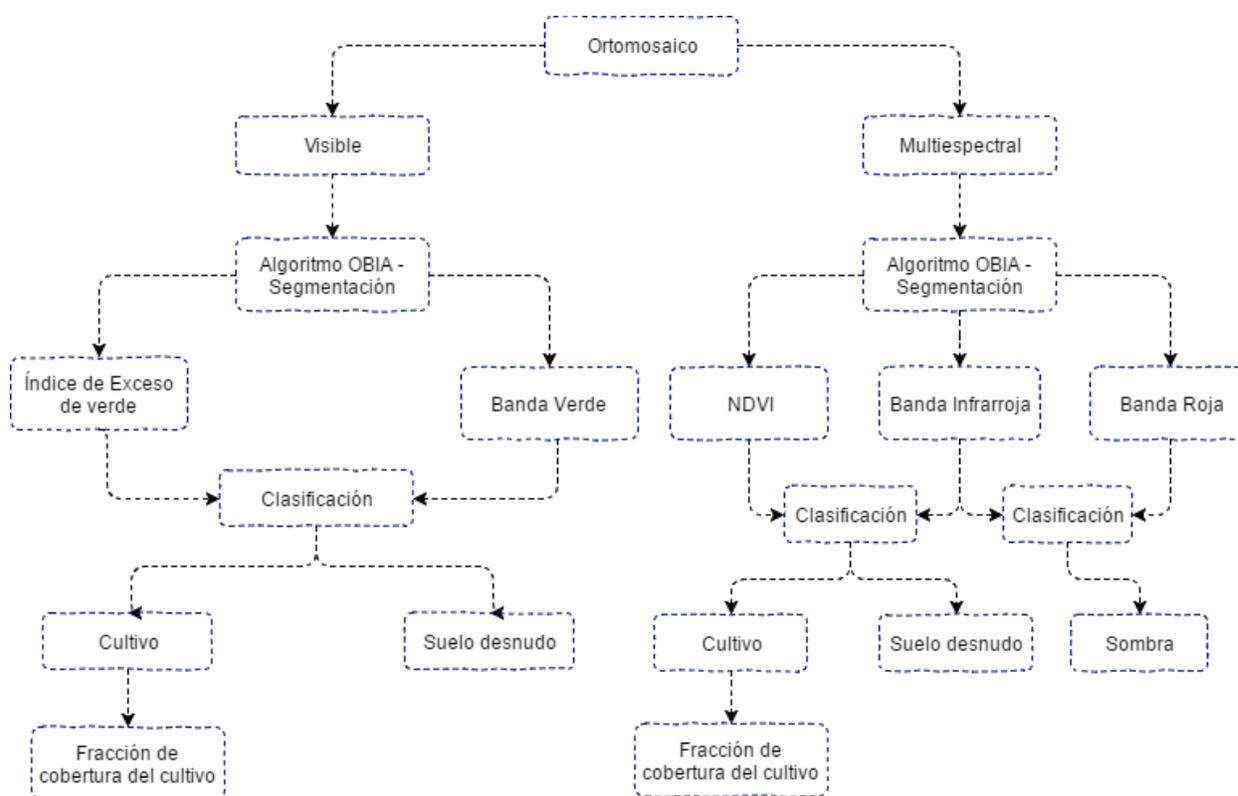
$$\text{Precisión (\%)} = 100 - |FCV_D - FVC| \quad (10)$$

La  $FCV_D$  se determinó con el método de análisis de imágenes basado en objetos (OBIA: Object-based image analysis) en el software eCognition developer 9.0 (Trimble, 2014). El procedimiento OBIA permite la combinación de información espectral, contextual y morfológica, entre otras características de los objetos creados mediante la segmentación de las imágenes. La metodología de digitalización consistió en las siguientes tres fases:

- Segmentación de la imagen: La imagen se segmentó en objetos utilizando el algoritmo multiresolution segmentation (Liu & Yang, 1994); para una mejor delimitación de la vegetación, se asignó un peso de uno a las tres bandas del ortomosaico RGB y del ortomosaico multispectral. Los parámetros de escala, forma y compacidad fueron de 5, 0.1, 0.5, respectivamente.
- Clasificación de la imagen: Para clasificar al cultivo se utilizaron índices de vegetación que resaltaban al cultivo. La clasificación en las etapas tempranas de crecimiento del cultivo (Figura 30) se realizó en base a los ortomosaicos visibles en el cual se distinguía fácilmente el cultivo del suelo desnudo; en las etapas intermedias y de senescencia se utilizaron los ortomosaicos multispectrales para diferenciar con mayor precisión al cultivo del suelo y la sombra. La metodología empleada se muestra en la Figura 31.
- Finalmente la clasificación del cultivo se supervisó y corrigió manualmente.



**Figura 30.** Detalle de condiciones del cultivo en dos etapas contrastantes (Izquierda: etapa vegetativa, derecha: etapa reproductiva).



**Figura 31.** Flujo de trabajo para la digitalización de la cobertura del cultivo.

### 6.3.3. Determinación de la altura de las plantas del cultivo

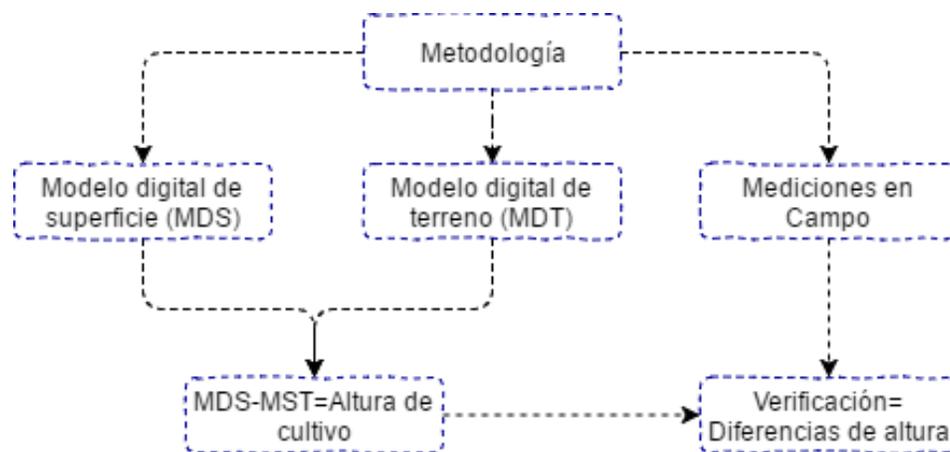
Los modelos digitales de elevación (MDE), son estructuras numéricas que describen las características morfológicas de un terreno, también catalogado como una representación de la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Con las imágenes visibles capturadas por la plataforma VANT se generaron los modelos digitales de superficie (MDS) y el modelo digital del terreno (MDT) utilizando el software PIX4D como se explica en el

capítulo anterior; este software utiliza el algoritmo de estructura del movimiento (SFM) (Verhoeven, 2011). El uso de algoritmos SFM para la generación de modelos digitales de elevación derivado de imágenes basadas en VANTs es cada vez más popular desde 2012 (Bendig *et al.*, 2013). Estudios realizados generan los modelos de superficie del cultivo y del terreno para estimar la altura absoluta de las copas de los cultivos (Bendig *et al.*, 2012; Bendig *et al.*, 2013). Holman *et al.* (2016) obtiene el modelo de superficie del cultivo (alturas del cultivo) como la diferencia entre el modelo de digital de superficie y el modelo digital de elevaciones del terreno.

Para el cálculo de las alturas del cultivo (AP), se utilizó la siguiente ecuación:

$$AP = MDS - MDT \quad (11)$$

El MDS se obtuvo para cada una de las fechas analizadas y MDT corresponde únicamente a una fecha (22 de julio) donde se puede apreciar a detalle las condiciones de la superficie del terreno. Un diagrama de flujo que explica el procedimiento para la determinación de la altura del cultivo se muestra en la Figura 32.



**Figura 32.** Diagrama de flujo del procedimiento para determinar la altura de las plantas.

Para verificar los datos obtenidos a partir de los modelos digitales de elevación se obtuvo mediciones de altura de las plantas en cada uno de los lotes analizadas durante el desarrollo fenológico del cultivo. En la Figura 33 se muestran los puntos donde se realizaron las mediciones.



**Figura 33.** Ubicación de los puntos de muestreo de las plantas.

La validación de los datos se probó utilizando dos indicadores de bondad de ajuste: el error absoluto medio (MAE), la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Kobayashi & Salam, 2000) y el error porcentual absoluto medio. El RMSE proporciona las variaciones ponderadas de errores (residuales); MAE mide la magnitud media ponderada de los errores absolutos; y MAPE mide el porcentaje de error promedio de las estimaciones. MAE y RMSE caracterizan las diferencias entre las variables medidas y estimadas; MAE es menos sensible a valores de datos extremos (Willmott, 1982).

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (12)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$\text{MAPE} = \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^n \left| \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \right| \quad (14)$$

Donde  $y_i$  son los valores observados,  $\hat{y}_i$  son los valores estimados y  $n$  es el total de muestras.

Los valores bajos de MAE y RMSE indican una alta precisión. De acuerdo a Willmott & Matsuura (2005) el MAE es la medida más natural e inequívoca de la magnitud del error promedio; sin embargo, el RMSE es una de las medidas de error más utilizadas. El valor de

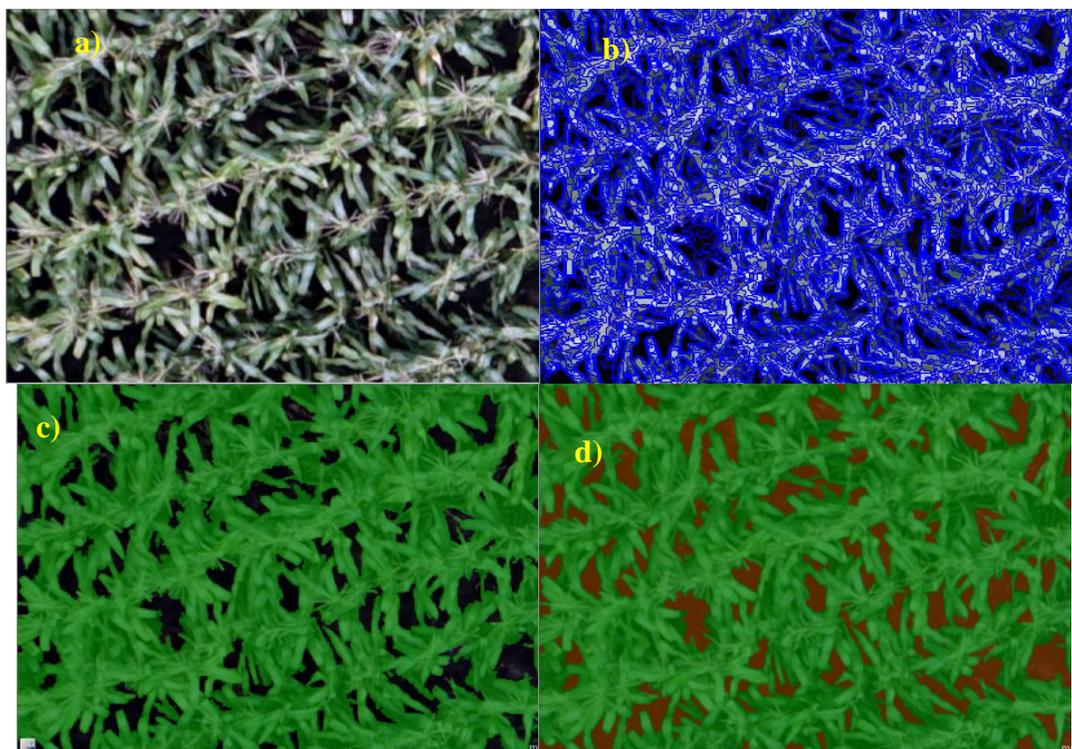
MAE pueden expresarse en porcentaje mediante el MAPE (Bergmeir & Benítez, 2012; Liu *et al.*, 2010).

## 6.4. Resultados y discusiones

### 6.4.1. Fracción de la cobertura vegetal

#### a. Fracción de la cobertura vegetal digitalizada

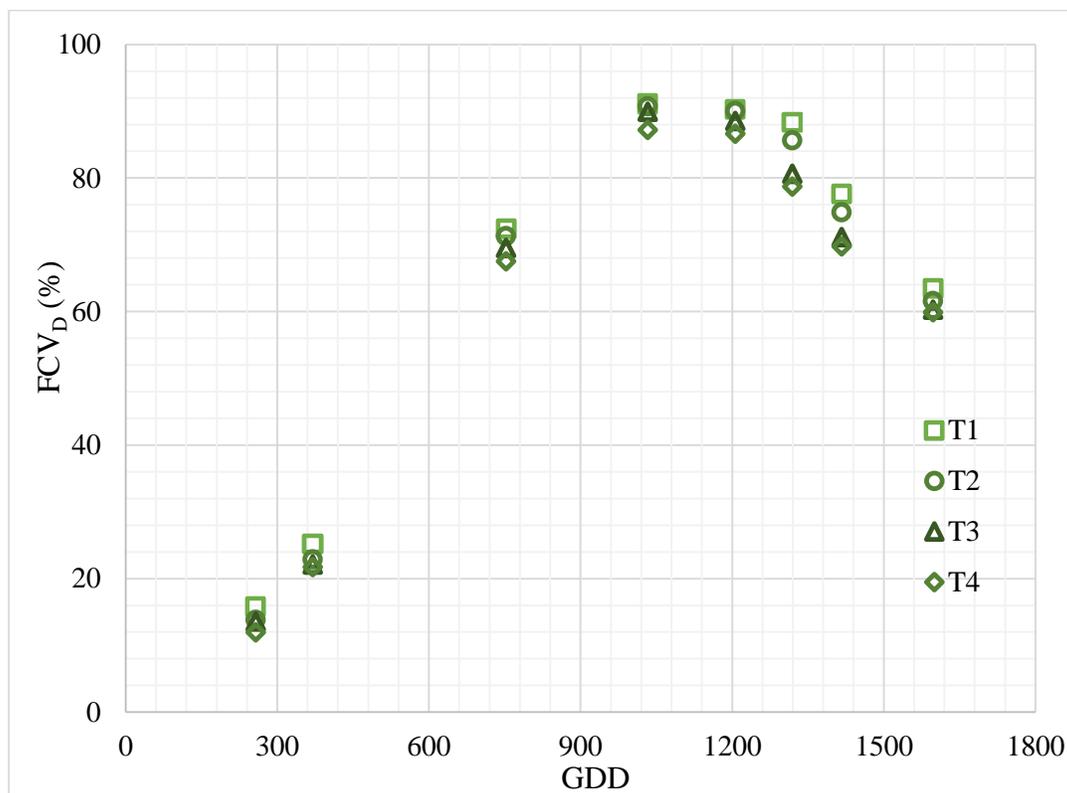
En la Figura 34 se muestran los resultados de las fases de digitalización del cultivo en los ortomosaicos. Para facilitar la digitalización del cultivo en cada ortomosaico fue necesario utilizar distintos parámetros de clasificación que se relacionaban directamente con la etapa de desarrollo en la que se encontraba el cultivo, en el cual se propusieron valores umbrales en función del índice ExG y de la banda verde normalizada con valores en un rango de 0.06 a 0.12 y 0.36 a 0.43; además la identificación y verificación de la zona del cultivo fue posible gracias a la alta resolución espacial de las imágenes; todo lo anterior permitió una digitalización exitosa del cultivo.



**Figura 34.** Clasificación del ortomosaico a) ortomosaico visible, b) segmentación de la imagen, c) clasificación del cultivo d) clasificación del cultivo y suelo.

La cobertura digitalizada promedio del cultivo para los cuatro tratamientos en la parcela experimental se muestra en la Figura 35, donde se observa que la máxima  $FCV_D$  se presentó a los 1033 días grado crecimiento acumulado (GDD), con valores de 91.10, 90.73, 89.93 y

87.20% para el T1, T2, T3 y T4, respectivamente. Después de alcanzar la cobertura máxima, la cobertura vegetal disminuye hasta alcanzar un valor de 59.86 % en el T4. Durante las etapas reproductivas los valores de cobertura ente los tratamientos indicaron mayores diferencias debido a las condiciones meteorológicas (fuertes vientos) presentadas en el sitio de estudio.



**Figura 35.** Fracción de cobertura vegetal digitalizada por tratamiento.

### b. Fracción de la cobertura vegetal estimada mediante índices de vegetación

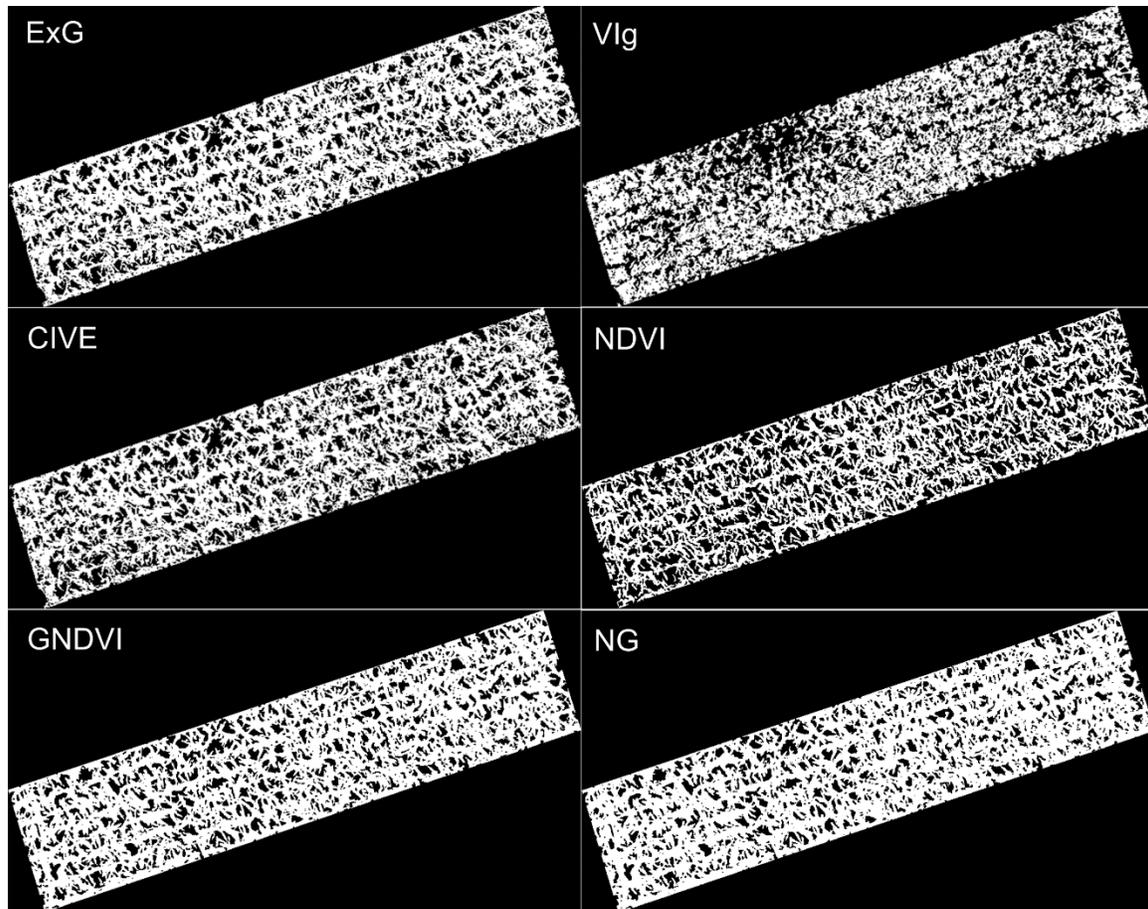
Los valores umbrales máximos y mínimos que resultaron de aplicar el algoritmo de Otsu para clasificar al cultivo, se presentan en el Cuadro 5. Este algoritmo brinda valores umbrales cercanos al óptimo (Torres-Sánchez *et al.*, 2014). El rango de los valores umbrales durante el desarrollo del cultivo fue inferior en los índices CIVE, GNDVI y NG, y superior para los índices ExG, VIg y NDVI.

**Cuadro 5.** Valores umbrales máximos y mínimos calculados con el algoritmo de Otsu.

Índices	ExG		VIg		CIVE		NDVI		GNDVI		NG	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
<b>GDD</b>												
<b>258</b>	0.07	0.01	0.04	-0.03	18.79	18.76						
<b>370</b>	0.12	0.09	0.09	0.02	18.76	18.74						
<b>752</b>	0.25	0.19	0.26	0.18	18.71	18.69						
<b>1033</b>	0.21	0.17	0.07	0.05	18.72	18.71	0.85	0.82	0.72	0.68	0.14	0.12
<b>1206</b>	0.21	0.17	0.16	0.10	18.72	18.71	0.80	0.77	0.67	0.62	0.16	0.14

<b>1319</b>	0.16	0.13	0.16	0.10	18.74	18.73	0.75	0.73	0.70	0.65	0.14	0.12
<b>1417</b>	0.14	0.11	0.11	-0.08	18.75	18.74	0.65	0.60	0.63	0.58	0.16	0.14
<b>1598</b>	0.07	0.02	-0.13	-0.18	18.79	18.76	0.54	0.47	0.60	0.57	0.15	0.13

En la Figura 36 se muestra la clasificación del cultivo en un lote correspondiente a los 1033 GDD obtenida a partir de los índice de vegetación y valores umbrales; haciendo un análisis visual, de los seis índices, con el índice VIg se clasificó un menor número de píxeles como cultivo, mientras que en el NG se clasificó un mayor número de píxeles.



**Figura 36.** Clasificación de la fracción de la cobertura del cultivo a 1033 GDD usando los valores umbrales.

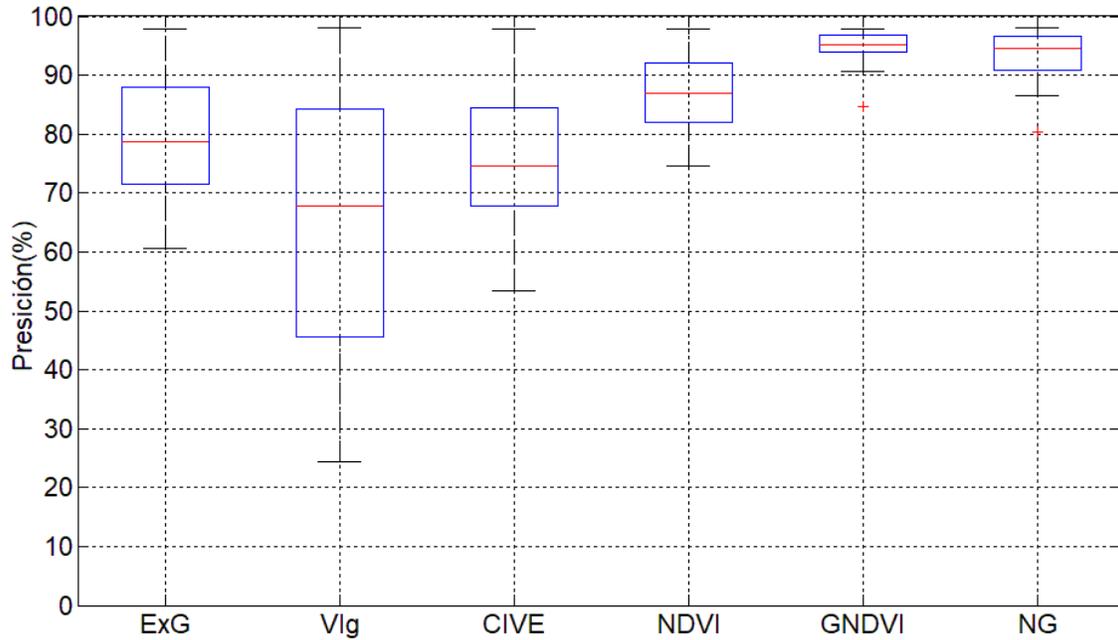
En la etapa temprana de crecimiento del cultivo considerada como las tres primeras fechas de la adquisición de las imágenes; las precisiones más altas (> 90%) se presentan en los índices ExG y CIVE; sin embargo, en la etapa intermedia y de senescencia la capacidad de discriminar el cultivo por parte de estos índices se reduce, debido a la disminución en el pigmento verde de las hojas y la presencia de espigas (Cuadro 6). En la primera fecha los tres índices en RGB sobrestimaron el porcentaje de cobertura debido al valor de transición del umbral provocada por las sombras cuando el cultivo presentó alturas bajas. En promedio, en esta etapa el ExG presenta la máxima precisión con un valor medio de 94.40%, mientras que la menor precisión

la obtuvo el VIg (86.16%). Los resultados que indican que el índice ExG clasifica con una alta precisión la cobertura vegetal durante la etapa temprana de crecimiento está acorde a lo obtenido por otros autores (Geipel *et al.*, 2014; Gée *et al.*, 2008). En esta etapa no se adquirieron datos para el cálculo de índices basados en NIR.

En la etapa intermedia y de senescencia se contó con datos para la estimación de índices RGB y multiespectrales. En el caso de los índices visibles, el ExG tiene una precisión promedio del 74.98%, siendo ésta inferior a la obtenida en la etapa temprana. El CIVE por otro lado, obtiene un promedio del 70.58%. Estos resultados son más bajos comparados con los índices multiespectrales, que presentan una precisión promedio del 96.16, 94.67 y 89.25% para GNDVI, NG y NDVI, respectivamente (Figura 37); lo que destaca la importancia de la banda infrarrojo en la discretización del cultivo. Comparando todos los índices, el que muestra la mayor precisión es GNDVI y el de la precisión más baja es VIg (58.96%). El GNDVI resultó ser más preciso porque compensa los efectos del suelo en el cálculo de la biomasa (Mulla, 2013), variable que se encuentra estrechamente relacionado con la variación de la cobertura vegetal (Gitelson *et al.*, 1996).

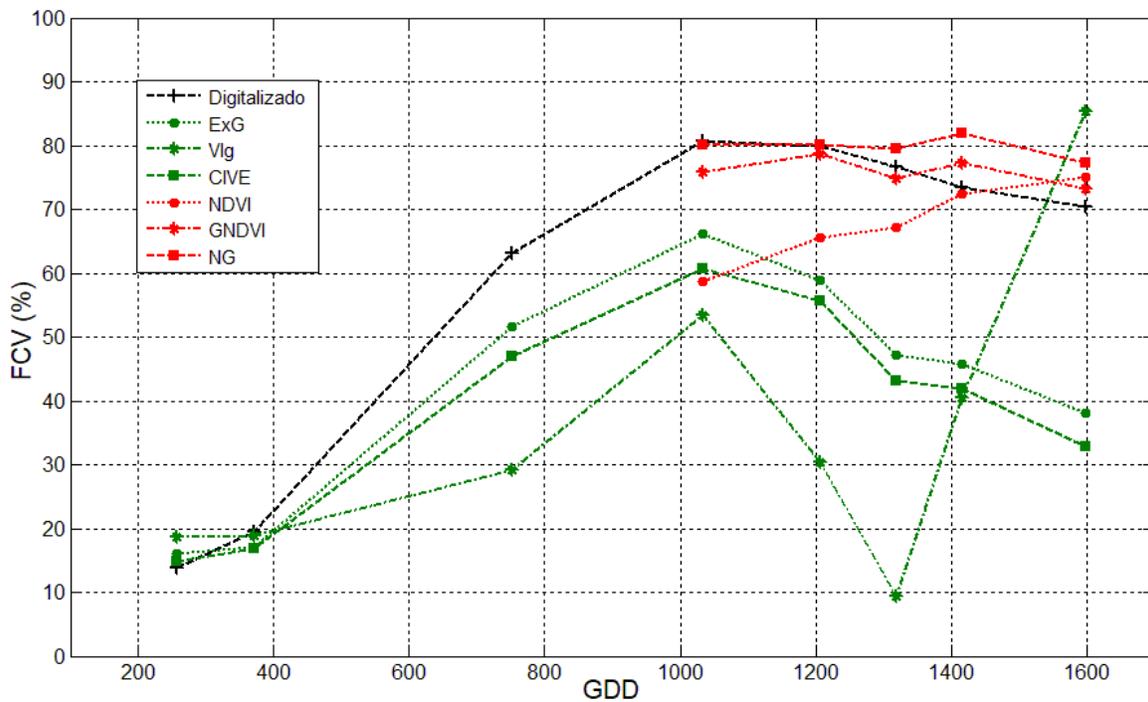
**Cuadro 6.** Precisión media ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar (s), para cada índices en las fechas de vuelo.

Índices	ExG		VIg		CIVE		NDVI		GNDVI		NG	
	$\bar{X}$ (%)	$\pm s$ (%)										
<b>GDD</b>												
<b>258</b>	97.26	2.56	94.32	5.02	97.79	1.87						
<b>370</b>	97.59	1.80	98.20	1.56	97.41	1.77						
<b>752</b>	88.38	3.93	65.96	3.22	83.83	7.33						
<b>1033</b>	85.44	4.00	72.71	5.45	79.92	5.13	77.94	2.17	95.11	1.73	98.53	0.81
<b>1206</b>	78.91	3.42	50.32	7.40	75.66	3.56	85.61	2.46	97.93	2.11	93.47	14.91
<b>1319</b>	70.53	4.47	32.69	4.44	66.45	4.98	90.57	3.48	97.01	2.39	96.79	2.32
<b>1417</b>	72.43	4.16	53.86	23.10	68.53	4.38	97.34	2.63	95.47	1.85	91.40	2.50
<b>1598</b>	67.57	4.80	85.20	4.91	62.34	5.32	94.78	4.18	95.31	3.43	93.14	5.05
<b>Media</b>	82.26		69.16		78.99		89.25		96.16		95.28	
<b>RMSE</b>	21.20		38.66		24.92		13.13		4.62		9.23	



**Figura 37.** Diagrama de caja que muestra la precisión de los índices de vegetación.

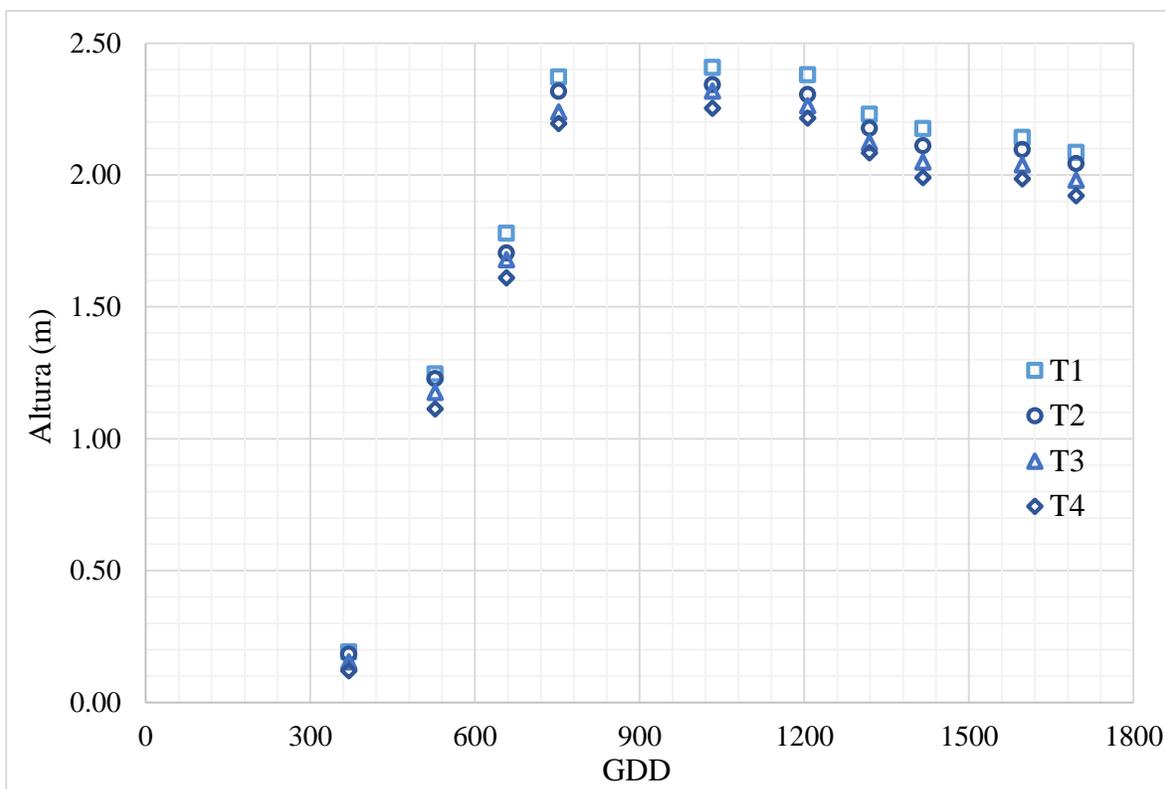
En general de los seis índices analizados, el VIg es el índice que presenta la menor precisión para la estimación del porcentaje de cobertura, ya que en la etapa temprana e intermedia subestima los valores y en la senescencia sobreestima los valores (Figura 38).



**Figura 38.** Porcentaje de cobertura del cultivo calculado con los índices de vegetación.

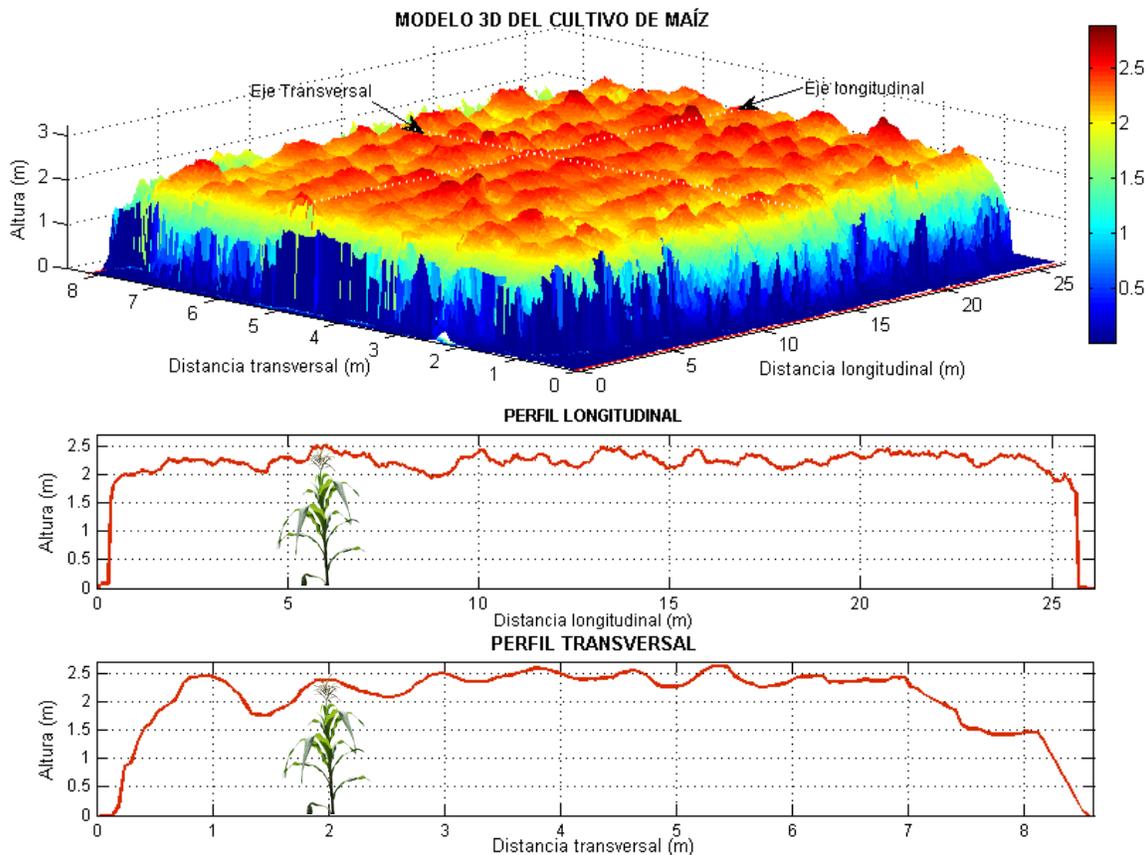
### 5.4.2. Alturas del cultivo

Se obtuvo el desarrollo de las alturas medias de las plantas de maíz para cada uno de los tratamientos analizados en las repeticiones (Figura 39). La altura media máxima alcanzado durante el crecimiento del cultivo fue de 2.41 m. presentándose en los lotes del T1. En la etapa de madurez del cultivo la altura media fue de 2.10, 2.04, 1.98 y 1.92 m. para el T1, T2, T3 y T4, respectivamente. Generalmente las condiciones más desfavorables se presentan en el T4 debido al sistema de labranza que se utilizó durante la siembra que corresponde en este caso a una labranza mínima donde las desventajas manifestadas tienen una relación con las condiciones del clima y la textura del suelo. Las alturas del cultivo presentan un comportamiento asintótico.

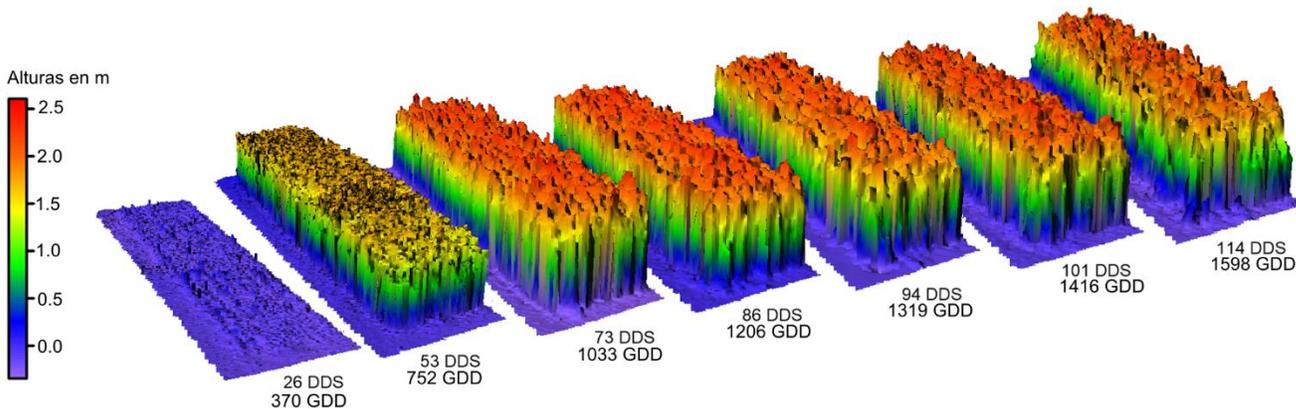


**Figura 39.** Altura de las plantas del cultivo por tratamiento.

Los modelos digitales de elevación de alta resolución permiten generar productos como son modelos 3D y perfiles. En la Figura 40 se muestra para un lote de maíz el modelo 3D y el perfil longitudinal y transversal, donde se observa la variabilidad espacial de la altura de las plantas y la delimitación de los surcos; en este caso las plantas que se encuentran a los extremos del lote presentan menor altura. La variación temporal de las alturas a lo largo del desarrollo del cultivo se presenta en la Figura 41.



**Figura 40.** Perfil longitudinal y transversal de un lote de cultivo de maíz.



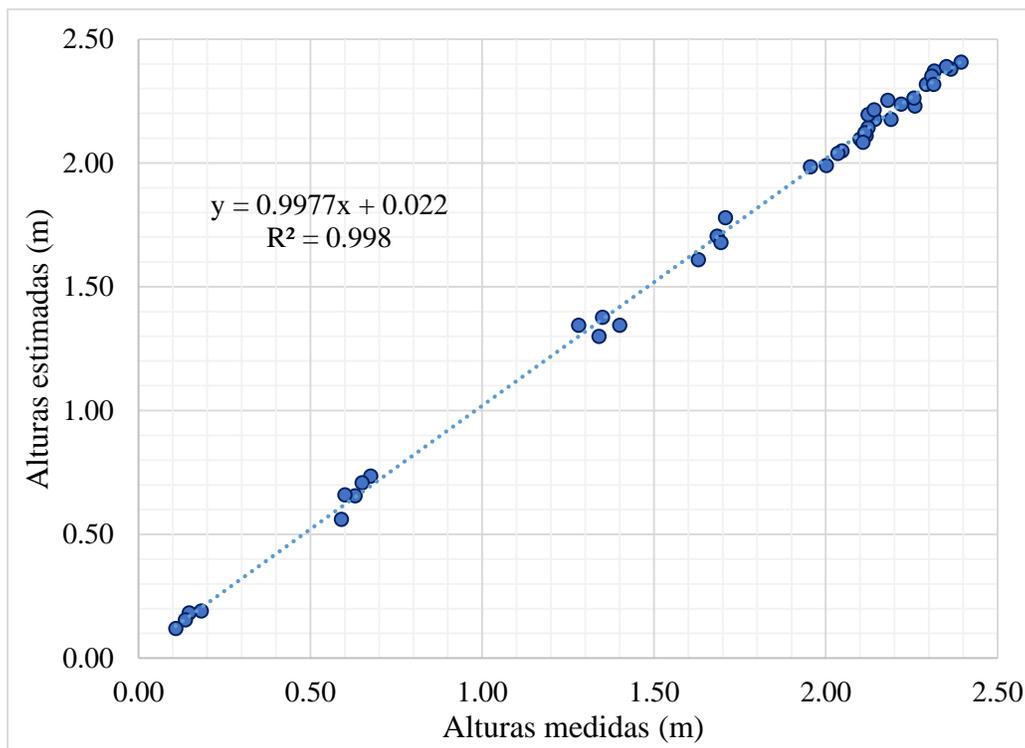
**Figura 41.** Variabilidad temporal de las alturas del cultivo.

En la Figura 42 se muestra una relación lineal entre las alturas medidas del cultivo en cada lote de repetición de los tratamientos y las alturas estimadas a partir de la diferencia entre MDS y MDT (Ecuación 11).

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre los valores medidos y estimados fue de 0.998. El RMSE indica que las alturas estimadas con los modelos digitales de elevación presentan una

diferencia de aproximadamente 3.20 cm con respecto a las alturas medidas en campo; el MAE resultó de 2.37 cm con MAPE de 2.27%.

El valor del RMSE (3.2 cm) comparado con el obtenido por Holman *et al.* (2016) que arrojó un valor de 3.0 cm en un campo de trigo, resulta ser menor debido a que la altura de vuelo que manejaron en el VANT fue de 40 m y en nuestro caso la altura de vuelo fue de 52 m. El análisis anterior indica que a altitudes más bajas de vuelo con el VANT se obtendrán alturas de cultivo más precisas, ya que se alcanza una mayor resolución de la superficie de la imagen; pero tendrá el inconveniente de cubrir menor superficie, además el número de imágenes por vuelo aumentará haciendo ineficiente el procesamiento.



**Figura 42.** Validación de las alturas del cultivo

Los errores de altura estimada del cultivo pudieron deberse a dos factores: a la precisión de los modelos digitales empleados, donde el RMSE máximo obtenido fue de 4.72 cm y a la precisión de las mediciones realizadas en campo.

## 5.5. Conclusiones

Los índices de vegetación visibles y multiespectrales utilizados en este estudio, mostraron que son capaces de discriminar el cultivo en los ortomosaicos generados a partir de imágenes adquiridas desde una plataforma VANT, siendo unos índices más eficientes que otros. En la etapa temprana de crecimiento del cultivo, los índices visibles que tienen una mejor precisión promedio en el cálculo de la cobertura fueron Exg y CIVE (94.40 y 93.01%).

En la etapa intermedia y de senescencia, en las que se analizaron los seis índices de vegetación, las más altas precisiones promedio se presentaron en los índices GNDVI y NG (96.16 y 94.67 %), esto muestra la importancia del uso de la banda infrarrojo cercano en la discretización del cultivo en estas etapas; en el caso de los índices visibles la precisión disminuyó con respecto a la etapa temprana. El GNDVI presentó el menor error en el cálculo de la cobertura con un RMSE de 4.62 % y el mayor error lo obtuvo el VIg con un RMSE 38.66 %. En general los índices multiespectrales en la etapa intermedia y de senescencia tuvieron las respuestas más satisfactorias en la obtención de la cobertura del cultivo.

La selección del índice de vegetación y el valor umbral fueron los pasos más importantes en la clasificación del cultivo. El algoritmo de umbralización de Otsu permitió obtener de manera automática el valor umbral más adecuado, lo que determina en gran medida la correcta separación entre el cultivo y otro tipo de coberturas.

Se mejora la metodología para la estimación espacial de las alturas del cultivo, utilizando únicamente un MDT para obtener las diferencias de elevaciones entre los MDS. El MDT muestra el estado de la parcela antes de que emerja el cultivo, por lo que es necesario obtenerse unos días después de la siembra. La diferencia entre los MDS y el MDT permitió estimar la altura de las plantas del cultivo comparables en precisión a las medidas realizadas directamente en campo. Los parámetros de error en la estimación de las alturas del cultivo, con respecto a alturas medidas en campo, presentaron un  $R^2 = 0.99$ ,  $RMSE = 3.20$  cm,  $MAE = 2.37$  cm y  $MAPE = 2.27\%$ , estos valores estadísticos muestran que la metodología empleada permite obtener alturas muy precisas.

La resolución espacial muy alta de los modelos digitales de elevación derivados de las imágenes del VANT permitió evaluar la variabilidad espacial de la altura del cultivo tanto en campo como a escala de la parcela.

Para futuros trabajos, en el caso de la cobertura vegetal es necesario obtener un mayor número de muestreos durante las etapas vegetativas ya que durante estas etapas se presenta el mayor desarrollo y crecimiento del cultivo, y por tanto la mayor variabilidad.

## **7. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL MAÍZ A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES**

### **7.1. Introducción**

Una de las variables importantes dentro de la agricultura de precisión es estimar el requerimiento hídrico de los cultivos, que se define como la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) (Allen *et al.*, 2006); el modelo FAO-56 es el método más utilizado para la estimación del ET<sub>c</sub> (Pereira *et al.*, 2015), que requiere del conocimiento del coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

El valor ET<sub>o</sub> se estima usualmente mediante datos meteorológicos y representa los efectos de las condiciones climáticas en el proceso de evapotranspiración (Suvocarev *et al.*, 2013). El K<sub>c</sub> trata de reflejar aquellas características que diferencia el cultivo de la superficie de referencia; estas características entre el cultivo y la superficie de referencia se refieren básicamente a: la altura del cultivo, el albedo de la cobertura, el área de las hojas, y el área expuesta de suelo desnudo (Calera, 2005). El coeficiente de K<sub>c</sub> es específico para cada cultivo, varía en función de las etapas fenológicas y condiciona el manejo del agua suministrada al cultivo durante su etapa de crecimiento (Vanino *et al.*, 2015).

El K<sub>c</sub> varía en el espacio y el tiempo según la fecha de siembra (Kamble *et al.*, 2013). Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del K<sub>c</sub> expresa los cambios fenológicos del cultivo y el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente K<sub>c</sub> a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo.

A escala regional, los procedimientos para estimar el K<sub>c</sub> directamente en campo presentan limitaciones. En este contexto los sensores remotos son una herramienta útil para determinar el K<sub>c</sub> basado en la radiación reflejada del cultivo en las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. En los últimos años, se han realizado diversos estudios donde la información obtenidos de sensores remotos es utilizada en el modelo FAO-56, con el fin de proporcionar una alternativa a la estimación indirecta de ET<sub>c</sub> y K<sub>c</sub> a grandes escalas, lo cual sirve como apoyo para una mejor gestión del agua en grandes zonas de riego. Las imágenes generadas por los sensores remotos en el rango visible e infrarrojo cercano pueden utilizarse para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos sin estrés (Hunsaker *et al.*, 2007); en este caso, la interpretación de datos de sensores remotos se basa en las relaciones conocidas entre la reflectancia espectral y los parámetros biofísicos del cultivo.

En lo que respecta a la información obtenida desde sensores remotos, uno de los métodos usados para la estimación de K<sub>c</sub> se basa en relaciones empíricas entre los índices de vegetación (VI) y las observaciones de campo. Diversos investigadores han utilizado índices de

vegetación multiespectral para estimar los valores de  $K_c$  a escala de campo para el maíz (Navarro et al., 2016; Pôças et al., 2015; Farg et al., 2012; Singh et al., 2009), algunos otros han demostrado que estos índices podrían utilizarse para para estimar los coeficientes de los cultivos basales en cultivos agrícolas (Odi-Lara et al., 2016).

## 7.2. Objetivos

- Determinar el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para maíz a partir de imágenes adquiridas con una cámara multiespectral desde una plataforma VANT.
- Desarrollar un modelo de regresión lineal entre los valores de  $K_c$  y NDVI.
- Estimar la evapotranspiración de referencia y del cultivo apoyado con datos meteorológicos e imágenes multiespectrales de alta resolución.

## 7.3. Metodología

### 7.3.1. Determinación del coeficiente de cultivo ( $K_c$ )

El valor del  $K_c$  a lo largo del ciclo fenológico se determinó mediante la ecuación (9), en el cual el  $K_c$  del día  $n$  está en función de los días grado crecimiento acumulados  $X_n$  (Ojeda-Bustamante et al., 2004).

$$K_{c_n} = K_{\max} \operatorname{erfc} \left( \left( \frac{x_n - x_{K_{\max}}}{\alpha_1} \right)^2 \right) \quad (15)$$

$$x_n = \frac{\text{GDD}_n}{\alpha_0} \quad (16)$$

Dónde:  $K_{\max}$  es el valor máximo del coeficiente de cultivo ( $K_c$ );  $\operatorname{erfc}$  representa la función error complemento;  $x_n$  expresa los días grado crecimiento acumulado (GDD) hasta el día  $n$ , normalizado con respecto al parámetro  $\alpha_0$ ;  $\alpha_0$  es el valor GDD requerido para completar el ciclo fenológico del cultivo;  $x_{K_{\max}}$  es el valor adimensional normalizado  $x$  cuando se presenta el valor máximo  $K_{\max}$ ;  $\alpha_1$  se obtienen del ajuste entre los datos experimentales y el modelo. Estos valores fueron tomados directamente en campo.

Los días grado crecimiento acumulado (GDD) realiza la acumulación térmica diaria de la diferencia entre la temperatura media y una temperatura base particular para cada cultivo y etapa de desarrollo. La estimación diaria de la variable día grado ( $^{\circ}D_i$ ) se realiza mediante la ecuación (17) (Ojeda-Bustamante et al., 2004):

$$\begin{aligned} ^{\circ}D_i &= T_a - T_{\min} \text{ si } T_a < T_{\max} \\ ^{\circ}D_i &= T_{\max} - T_{\min} \text{ si } T_a \geq T_{\max} \\ ^{\circ}D_i &= 0 \text{ si } T_a \leq T_{\min} \end{aligned} \quad (17)$$

Donde:  $T_a$  es la temperatura media ambiental diaria,  $T_{\min}$  y  $T_{\max}$  son las temperaturas mínimas y máximas del aire, dentro del cual la planta se desarrolla. Los datos de temperatura media se

obtuvieron de una estación meteorológica ubicada a 160 m. de la parcela. Las temperaturas de desarrollo del maíz usadas para calcular los °D<sub>i</sub>, fueron de 10 y 30°C.

### 7.3.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El procedimiento anterior para estimar el K<sub>c</sub> se ve limitada si se desea representar la variabilidad espacial de esta variable. En este contexto los sensores remotos son una herramienta útil para obtener un coeficiente de cultivo basado en la reflectancia. Los índices de vegetación calculados a partir de imágenes multiespectrales permite la estimación de la E<sub>Tc</sub> y K<sub>c</sub> en una escala de píxeles, donde cada píxel representa un único sistema de suelo-vegetación (Chen *et al.*, 2005).

Los índices comúnmente usados para estimar K<sub>c</sub> son el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de vegetación de diferencia ponderada (WDVI). El índice de vegetación más utilizado y estudiado para estimar el K<sub>c</sub> es el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973) que se basa en el comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta. Los valores del NDVI se encuentran correlacionados con los parámetros de la vegetación, como el índice de área foliar, la productividad primaria neta y bruta (Gitelson *et al.*, 2008). Este índice de vegetación se calculó mediante la ecuación (18) empleando el software eCognition:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (18)$$

Donde, NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano; R es la reflectancia en la banda del rojo. Los valores del NDVI se encuentran correlacionados con los parámetros de la vegetación, como el índice de área foliar, la productividad primaria neta y bruta (Gitelson *et al.*, 2008).

Los valores del NDVI varían entre -1.0 y 1.0, donde el cero corresponde a un valor aproximado cuando no existe vegetación, mientras valores cercanos a 1 representan vegetación densa. Wardlow & Egbert (2008) encontraron rangos de NDVI entre -0.2 a 0.2 para coberturas urbanas, suelo desnudo, nubes y cuerpos de agua. Riaño (2006) menciona como un rango crítico del NDVI para discriminar las coberturas vegetales los valores entre 0.1 y 0.5 para la vegetación bastante densa y de 0 a 0.07 para las coberturas con suelo desnudo o poca vegetación. De acuerdo con la NASA (2010) los valores negativos de NDVI se asocian a nubes y agua, los valores positivos cercanos a cero indican suelo desnudo y valores positivos de NDVI que oscilan entre 0.1 - 0.5 indican vegetación escasa y los valores en el rango 0.6 a 0.7 indican vegetación muy verde y densa. El NDVI se ha utilizado ampliamente para el monitoreo de la vegetación, la evaluación del rendimiento de los cultivos y la detección de sequías (Kamble *et al.*, 2013).

Se calcularon los valores del NDVI de los píxeles correspondientes al cultivo y se obtuvieron los parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar por cada lote y tratamiento analizado de los 11 ortomosaicos.

### 7.3.3. Relación Kc-NDVI

Usando NDVI, Cuesta *et al.* (2005) desarrollaron una relación lineal ( $Kc = 1.25 (NDVI) + 0.2$ ) para determinar el coeficiente de cultivo de algunos cultivos a partir de los datos de sensores remotos. Un desarrollo más reciente en la estimación del Kc con el NDVI fueron los trabajos realizado por Campos *et al.* (2010) y Kamble *et al.* (2013), usando imágenes satelitales con las siguientes ecuaciones,  $Kc = 1.44 (NDVI) - 0.10$  y  $Kc = 1.4571 (NDVI) - 0.1725$  respectivamente.

Los estudios anteriores muestran que el Kc y NDVI durante el desarrollo de cultivo presentan comportamiento similares esto fundamenta la relación entre el NDVI y el Kc mediante una regresión lineal simple; por esta razón en este trabajo se optó por usar este tipo de regresión y englobar estas dos variables para tener un modelo que prediga el Kc mediante el conocimiento del NDVI. En base al modelo de regresión lineal Kc-NDVI se calculó el Kc en cada uno de los píxeles que corresponden a cultivo para conocer la variabilidad espacial de dicha variable.

### 7.3.4. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración potencial de un cultivo con características específicas (de referencia), usualmente pasto o alfalfa, que tiene sentido físico ya que su evapotranspiración se puede estimar a través de mediciones directas (Ojeda & Ruíz, 2015). El método de FAO Penman-Monteith para estimar ETo, es derivado de la ecuación original de Penman-Monteith y de las ecuaciones de la resistencia aerodinámica; se expresa:

$$E_{To} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{C_n}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (19)$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>); Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup>día<sup>-1</sup>); Ra es la radiación extraterrestre (mm día<sup>-1</sup>); G es el flujo de calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>); T es la temperatura media del aire a 1.5 a 2.5 m de altura (°C), es es la presión e vapor de saturación (kPa); ea es la presión real de vapor (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>); γ es la constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>); Cn y Cd es el numerador y denominador que cambia con tipo de referencia y tiempo de cálculo. Los valores para los parámetros Cn y Cd se describen por Pereira *et al.* (2014).

ET<sub>o</sub> provee un estándar de comparación mediante el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos períodos del año o en otras regiones y se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento que se obtuvieron de la estación meteorológica INIFAP ubicada aproximadamente a 160 m. de la parcela experimental.

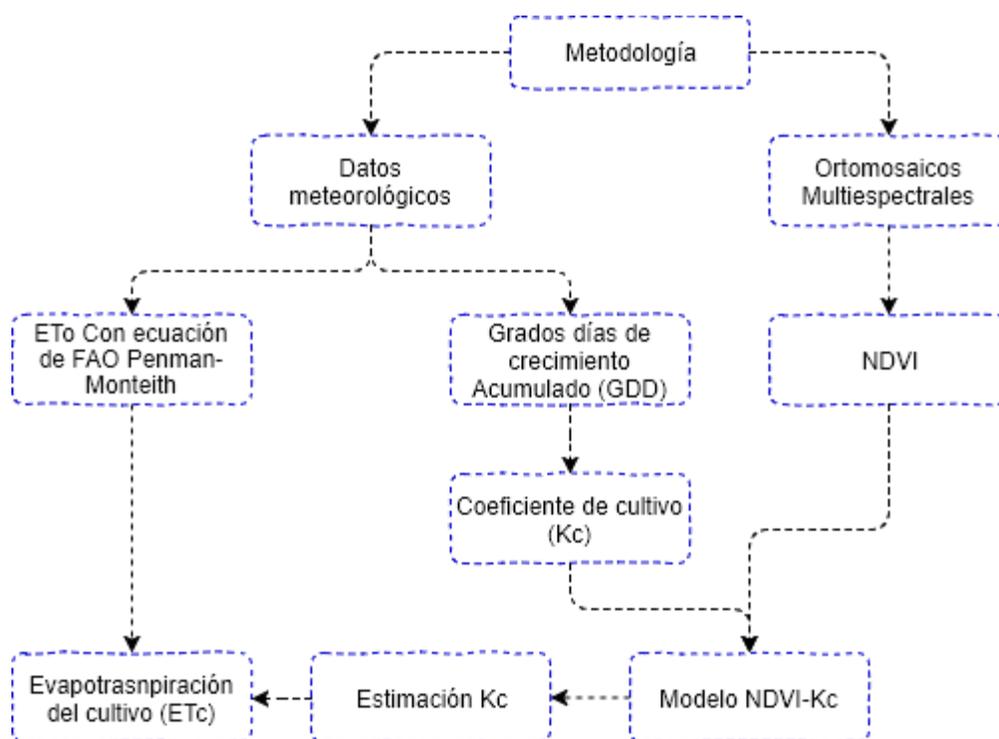
### 7.3.5. Evapotranspiración del cultivo

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como requerimiento de agua del cultivo. La evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua pérdida a través de la evaporación del suelo y transpiración del cultivo.

Para este estudio la evapotranspiración del cultivo se calculó de acuerdo con el enfoque de la FAO 56. El método de cálculo consiste en determinar la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) a partir de la integración de la relación entre la ET<sub>c</sub> y la ET<sub>o</sub> dentro de un coeficiente único K<sub>c</sub>.

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (20)$$

La metodología general de trabajo se presenta en el siguiente diagrama de flujo (Figura 43).

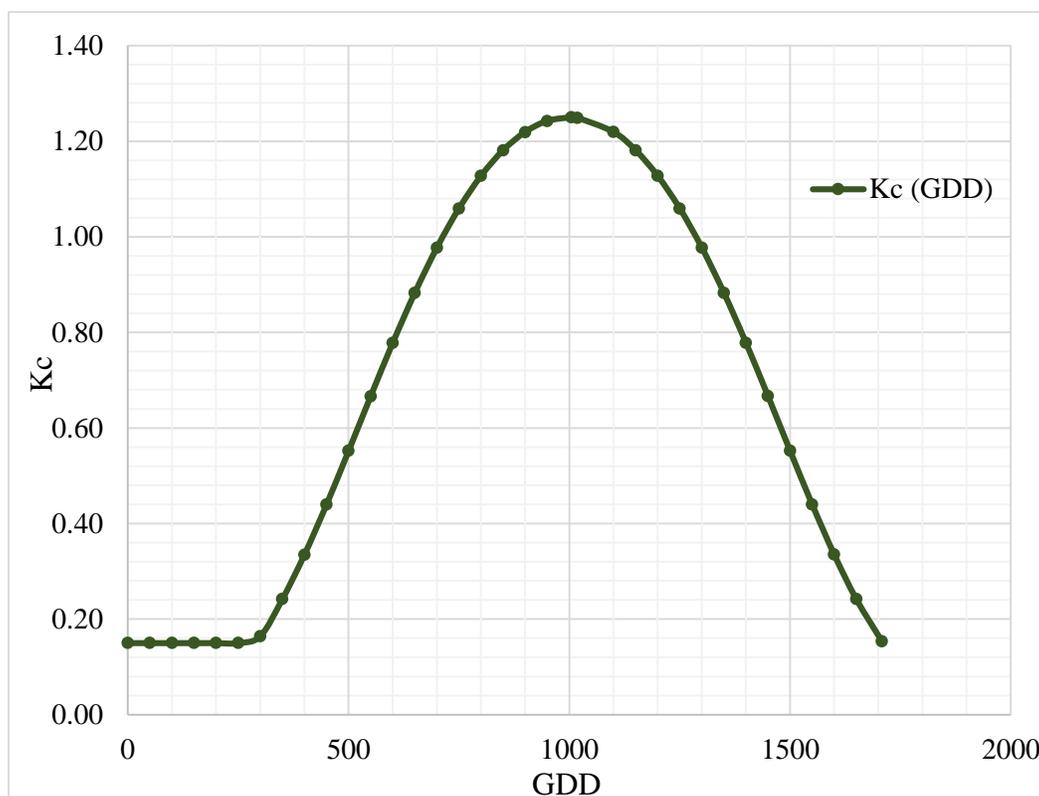


**Figura 43.** Diagrama de flujo para determinar K<sub>c</sub> y ET<sub>c</sub>.

## 7.4. Resultados y discusiones

### 7.4.1. Coeficiente de cultivo (Kc)

La duración del ciclo fenológico del cultivo de maíz fue de 122 días equivalentes a 1695 GDD. En la Figura 44 se muestra la curva del coeficiente del cultivo donde el valor de Kc máximo es de 1.25 alcanzado a mediados de septiembre con 71 días después de la siembra (DDS) y 1004 GDD, presentándose durante la etapa reproductiva.



**Figura 44.** Coeficientes de cultivo (Kc) basado en los grados días crecimiento.

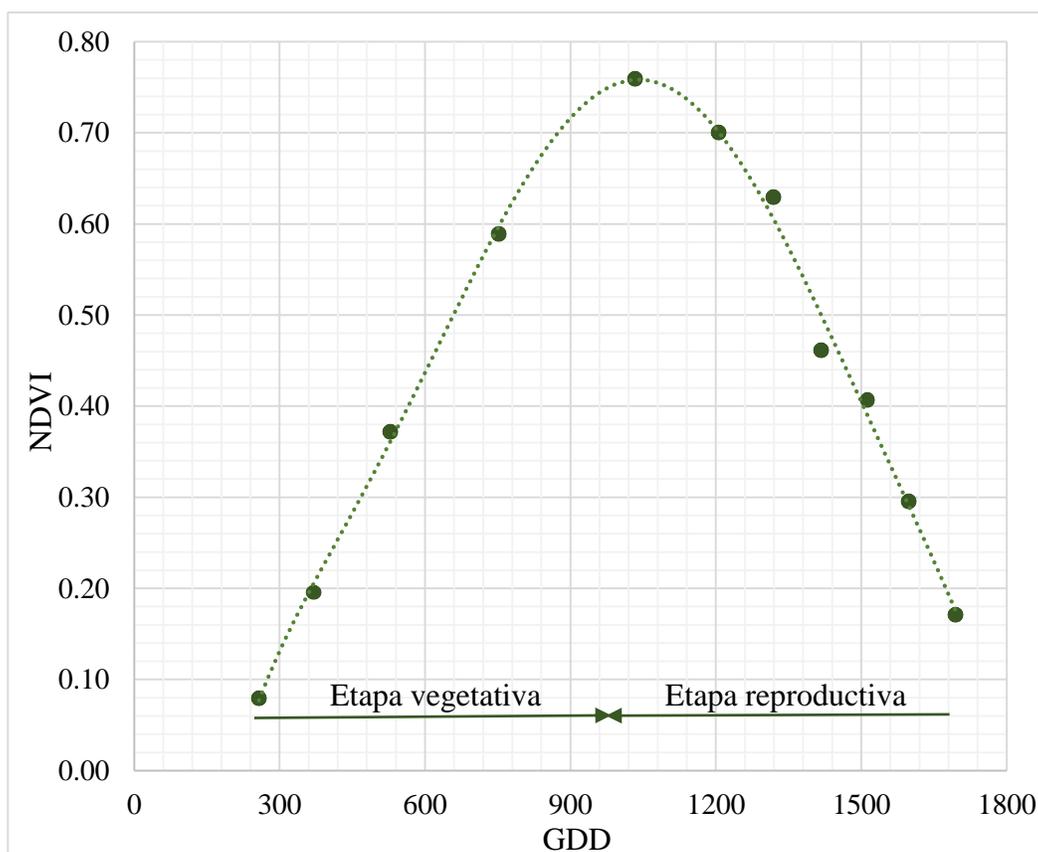
### 7.4.2. Desarrollo del NDVI a partir de los ortomosaicos multiespectrales

Mediante el NDVI se puede dar seguimiento a la fenología de los cultivos. El valor del NDVI medio máximo obtenido en la zona experimental durante las fechas de vuelo del VANT fue de 0.759 que se adquirió el 15 de septiembre a los 1033 GDD y 73 DDS, posterior a la etapa fenológica VT (Floración masculina) y durante la etapa R1 (floración femenina), tal como sucede con la altura máxima y cobertura efectiva completa indicada en el capítulo anterior. En el Cuadro 7 se puede observar que el T1 presenta valores superiores del NDVI con respecto a los otros tratamientos y el T4 resulta ser el más desfavorable; esto se debe básicamente a las condiciones del sistema de labranza y densidad de población en la que fue sembrado el cultivo en cada tratamiento.

En la Figura 45 se muestra la evolución de la curva del NDVI en la parcela donde se dividen las dos etapas de crecimiento del maíz con un valor de 0.740 al final de la etapa vegetativa e inicio de la etapa reproductiva; donde el aumento del NDVI empieza a los 752 GDD.

**Cuadro 7.** Valores medios del NDVI por tratamiento.

Fechas de vuelo	GDD	NDVI				Media
		T1	T2	T3	T4	
22 de jul	258	0.081	0.080	0.080	0.078	0.080
30 de jul	370	0.181	0.180	0.246	0.176	0.196
10 de ago	527	0.376	0.374	0.374	0.366	0.373
26 de ago	752	0.591	0.593	0.591	0.581	0.589
15 de sep	1033	0.767	0.763	0.762	0.745	0.759
28 de sep	1206	0.709	0.705	0.703	0.685	0.701
06 de oct	1319	0.645	0.639	0.628	0.608	0.630
13 de oct	1417	0.472	0.471	0.457	0.445	0.461
20 de oct	1512	0.411	0.409	0.408	0.399	0.407
26 de oct	1598	0.312	0.311	0.281	0.278	0.296
3 de nov	1695	0.182	0.181	0.163	0.160	0.171



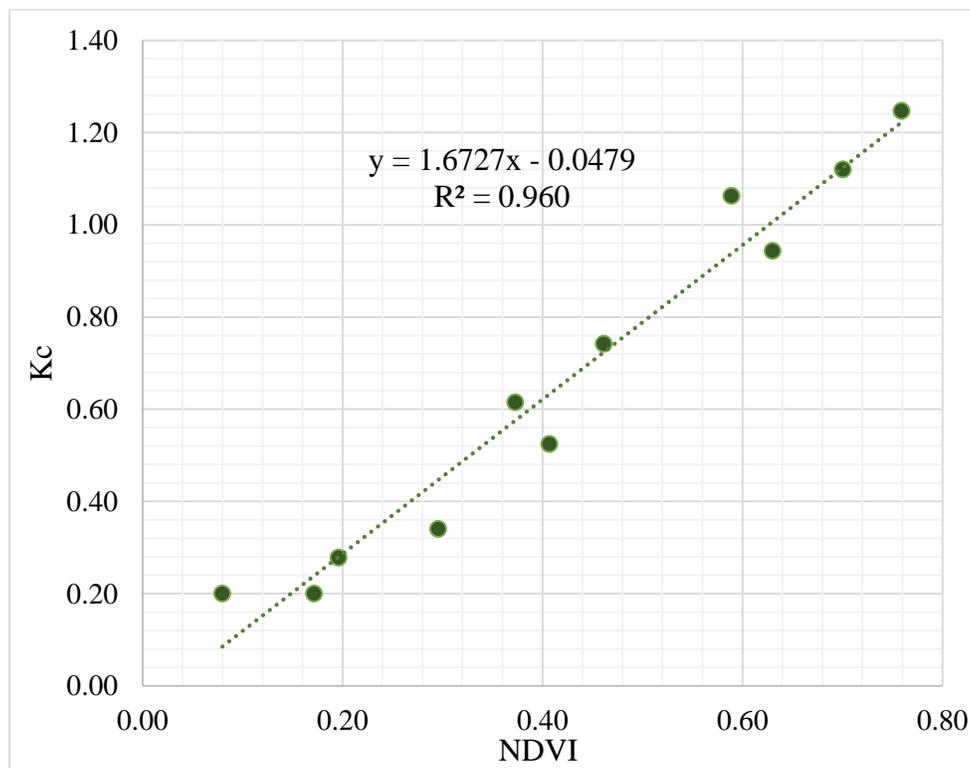
**Figura 45.** Evolución temporal del NDVI en el sitio experimental.

Los valores del NDVI encontrados en los 11 ortomosaicos multispectrales estudiados oscilan entre 0.080 y 0.759 durante el periodo de crecimiento del cultivo (Figura 45); en la etapa vegetativa los valores incrementan de 0.080 a 0.759 y en la etapa reproductiva desciende desde 0.759 a 0.171.

Calera *et al.* (2004) obtuvieron como valor de NDVI mínimo y máximo 0.15 y 0.85 y un valor inicial para la etapa de reproductiva del maíz de 0.83, determinados a partir de las imágenes satelitales landsat 7. Gitelson *et al.* (2014) determinaron los valores de NDVI para maíz con imágenes satelitales MODIS (resolución de 250 m.); los datos de NDVI obtenidos en la etapa vegetativa y reproductiva van de 0.05 a 0.93. Estos valores comparados con los obtenidos muestran una ligera diferencia que se debe principalmente a la resolución espacial de las imágenes y a que los valores obtenidos dentro de cada pixel corresponden únicamente a los cultivos.

### 7.4.3. Modelo NDVI-Kc

En la Figura 46 se muestra la relación entre los valores del NDVI y el Kc para el maíz. La correlación de ambas variables es mayor en las primeras y últimas etapas de crecimiento y ligeramente menor en las etapas intermedias; esto se atribuye a las condiciones climáticas presentadas (lluvias torrenciales y fuertes vientos) durante las etapas intermedias alterando el desarrollo y crecimiento del cultivo afectando directamente la cobertura.



**Figura 46.** Relación entre NDVI y Kc en el sitio experimental.

La relación entre estas dos variables se expresa con la siguiente ecuación:

$$Kc_{NDVI} = 1.6727 (NDVI) - 0.0479 \quad (21)$$

Dónde: 1.6727 y 0.0479 representan los coeficientes de pendiente e intersección respectivamente; el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.960, este valor indica que existe una alta correlación entre ambos parámetros y que el NDVI puede explicar gran parte de la varianza de  $Kc$ . La relación entre estas dos variables es mayor en el T4 seguido del T3, T2 y T1 dentro del sitio experimental.

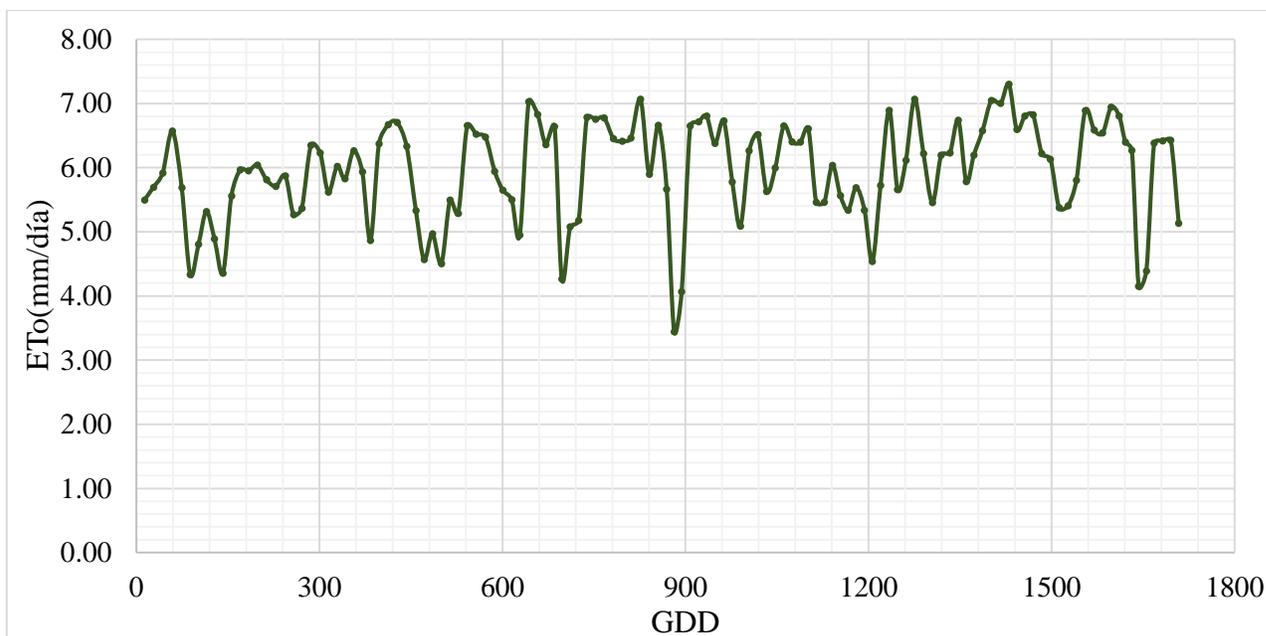
Singh & Irmak (2009) desarrollaron un modelo de correlación lineal simple entre el  $Kc$  y NDVI, donde el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que obtuvieron fue de 0.83 para un cultivo de maíz de temporal; el NDVI se estimó en base a imágenes de satélite Landsat 5 y 7 (30 m. de resolución espacial); este coeficiente de correlación resulta ser menor al obtenido en este estudio; esta diferencia radica en que las imágenes usadas presentan una alta resolución espacial, lo que permite obtener valores más exactos de NDVI además de que estos datos se obtuvieron únicamente en los píxeles correspondientes al cultivo.

Dado que la evolución del coeficiente de cultivo ( $Kc$ ), está bien definido por la evaluación de los días grado crecimiento acumulado (GDD) es claro que la evolución del NDVI es similar a la del  $Kc$ , tal y como se muestra. Este hecho es muy relevante ya que fundamenta la relación entre el NDVI y el  $Kc$ , y es la base de la aplicación de la estimación de la evapotranspiración del cultivo en óptimas condiciones mediante el NDVI.

El coeficiente de cultivo para suelo desnudo se basa en la determinación de las pérdidas por evaporación del suelo.

#### **7.4.4. Evapotranspiración de referencia**

En la Figura 47 se muestra la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) calculada a partir del método de la FAO Penman-Monteith para el sitio experimental en el cual el valor de  $ET_o$  incrementa hasta 7.30 mm/día y disminuye a 3.44 mm/día a los 1430 y 881 GDD. Con el análisis de datos se sabe que los días en el que ocurrió bajas en la  $ET_o$  se tuvo un aumento en la humedad relativa y una disminución de la velocidad del viento y en la radiación solar; de la misma forma Liu *et al.* (2013) concluyen que al haber un descenso en la humedad relativa con un incremento en la velocidad del viento, favorece al aumento de la  $ET_o$  y Bhartiya *et al.* (2014) demostraron que la  $ET_o$  depende principalmente de la humedad relativa.



**Figura 47.** Evapotranspiración de referencia de la zona de estudio.

#### 7.4.5. Evapotranspiración de cultivo

Se calculó la ETC para cada uno de los tratamientos a partir del modelo NDVI-Kc y de la ETo. En el Cuadro 8 se observa que el T1 presenta una mayor ETC con un valor máximo alcanzado de 6.95 mm/día respecto a los otros tratamientos, esto se debe a que el Kc aumenta a medida que el NDVI aumenta y a las condiciones más favorables de cultivo (practica agrícola) en este tratamiento. Los valores de Kc comienzan siendo pequeños y crecen a medida que la planta cubre más el suelo, es decir cuando se logra la cobertura efectiva completa, posteriormente empieza a disminuir; lo mismo sucede con el ETC siempre y cuando la ETo no disminuya drásticamente por algún evento meteorológico.

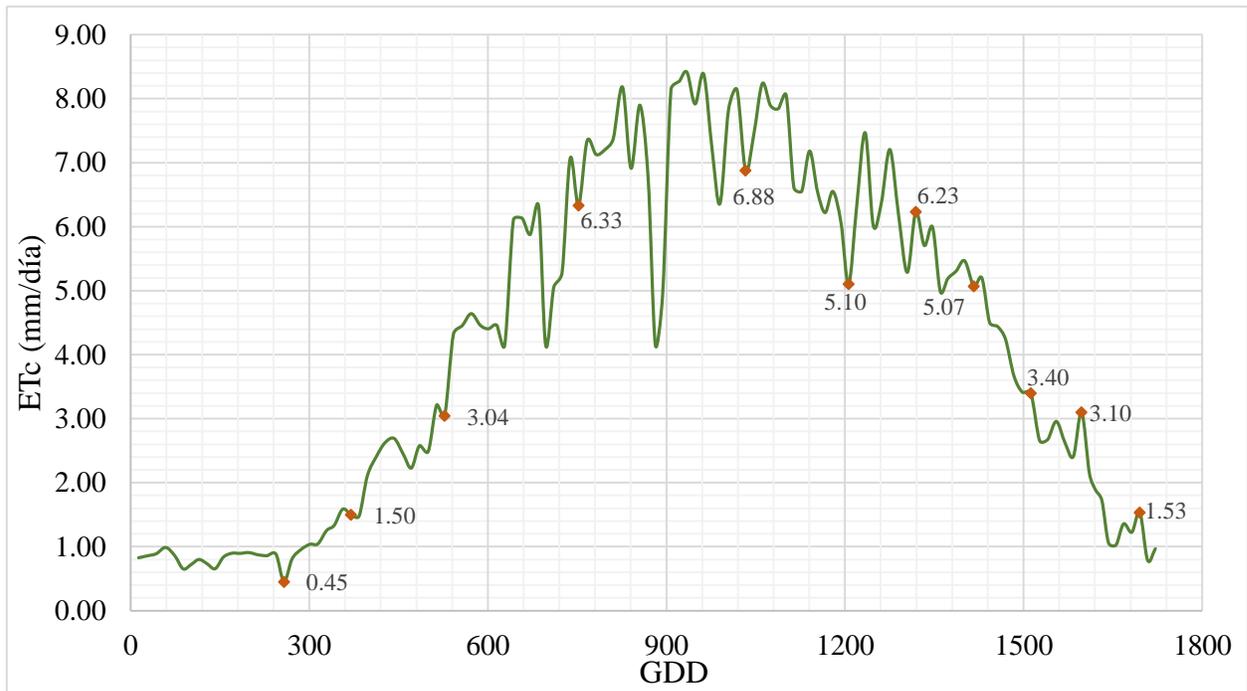
**Cuadro 8.** Evapotranspiración del cultivo (ETc) de maíz por tratamiento.

Fechas	GDD	ETc (mm/día)			
		T1	T2	T3	T4
22 de jul	258	0.46	0.45	0.45	0.44
30 de jul	370	1.52	1.51	1.50	1.46
03 de ago	427	2.46	2.44	2.44	2.38
10 de ago	527	3.08	3.06	3.06	2.98
19 de ago	658	5.84	5.81	5.80	5.66
26 de ago	752	6.36	6.38	6.35	6.25
15 de sep	1033	6.95	6.91	6.91	6.75
28 de sep	1206	5.17	5.13	5.12	4.98
06 de oct	1319	6.39	6.32	6.21	6.01
13 de oct	1417	5.19	5.18	5.01	4.88
20 de oct	1512	3.44	3.42	3.41	3.33

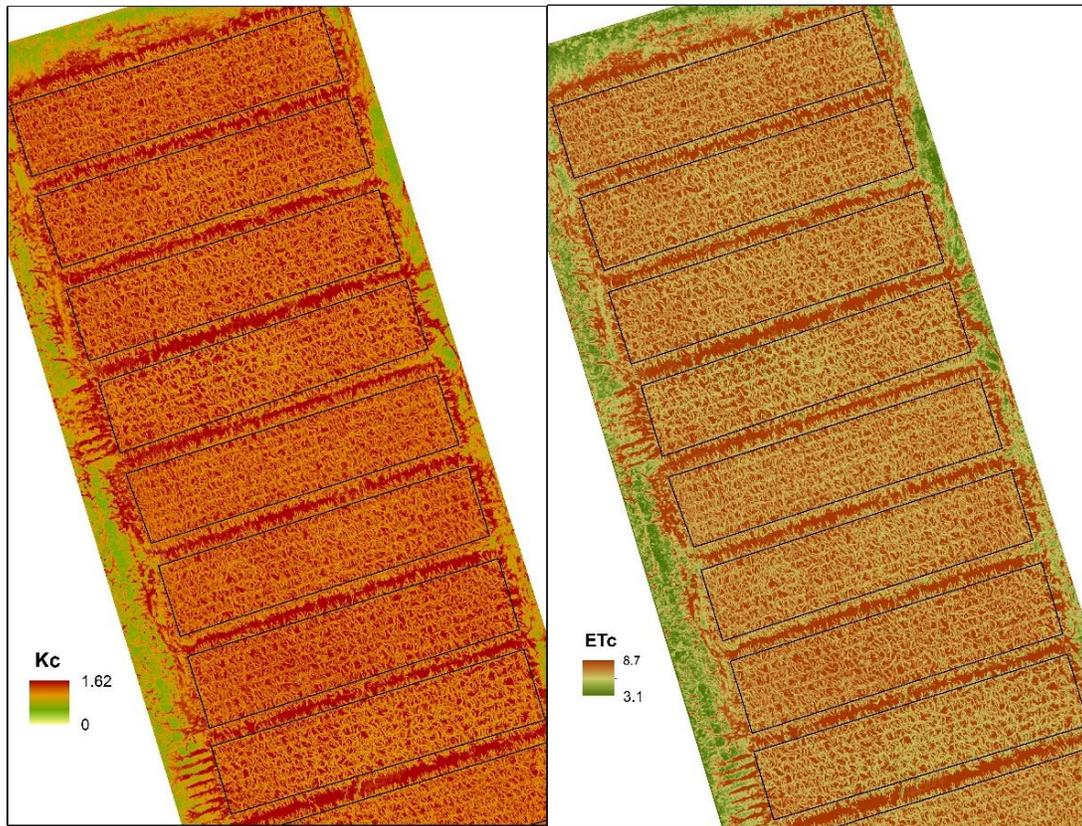
26 de oct	1598	3.29	3.28	2.93	2.89
3 de nov	1695	1.65	1.64	1.45	1.41

La curva de la ETc de maíz durante el periodo de crecimiento en la zona de estudio se muestra en la Figura 48. En la curva se observa algunos puntos con valores de la ETc que fueron determinados con el Kc derivado del modelo NDVI-Kc, mientras que los otros valores se obtuvieron con el Kc de los GDD.

Empleando el modelo NDVI-Kc es posible generar mapas de distribución espacial para Kc y ETc, como el que se presenta en la Figura 49.



**Figura 48.** Evapotranspiración del cultivo (ETc) de maíz en el sitio experimental.



**Figura 49.** Mapas de Kc y ETc obtenidos del modelo NDVI-Kc.

## 7.5. Conclusiones

El valor máximo del Kc en función de los días grado crecimiento acumulados fue de 1.25. Los valores obtenidos del NDVI para el cultivo se encuentran entre 0.080 a 0.759, donde el valor máximo se adquirió el 15 de septiembre a los 1033 GDD y 73 DDS; además con este valor en la curva del NDVI se divide a las etapas vegetativas y de las etapas reproductivas del cultivo.

Es importante destacar que los índices de vegetación captados por los sensores remotos juegan un papel muy importante para la determinación del Kc y ETc. Se desarrolló un modelo de regresión lineal simple,  $Kc_{NDVI} = 1.6727 (NDVI) - 0.0479$ , para estimar el Kc conociendo los valores del NDVI del cultivo en cualquier etapa de su desarrollo fenológico, el coeficiente de determinación  $R^2$  fue de 0.96, lo que muestra que ambas variables están estrechamente relacionadas entre sí, sin embargo, cabe aclarar que la alta correlación se debe también a la alta resolución espacial de las imágenes y que únicamente se tomaron en cuenta los píxeles correspondientes al cultivo.

El uso de sensores remotos montados en los VANTs resuelven las limitaciones que actualmente enfrenta la estimación de la ETc con satélites y de forma tradicional. Con las imágenes adquiridas desde un VANT se pueden conocer de manera detallada el patrón de distribución, etapas fenológicas y condiciones de estrés de los cultivo lo que permite obtener con una mayor precisión la ETc. Mediante el modelo NDVI-Kc se obtuvieron los mapas de variación espacial del Kc y ETc, lo cual brinda información valiosa sobre todo en zonas agrícolas extensas.

Entre más preciso sea la curva Kc más fiable será la estimación de la evapotranspiración del cultivo. La estimación de la curva Kc del cultivo utilizando un VANT equipado con cámaras multiespectrales es más precisa en comparación a otras tecnologías de percepción remota debido a que las observaciones durante el desarrollo del cultivo presentan una mayor resolución temporal y espacial.

## 8. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE MAÍZ MEDIANTE SENSORES REMOTOS

### 8.1. Introducción

El índice de área foliar (IAF) se define como el área de las hojas por unidad de área de superficie del suelo (Bréda, 2003); es un parámetro dinámico que depende de la especie del cultivo, las condiciones agronómicas, la etapa de desarrollo, la estacionalidad y las prácticas de manejo (Das *et al.*, 2016). El IAF es una información básica para el seguimiento del desarrollo y crecimiento agronómico de los cultivos (Mendoza, 2015); tiene una estrecha relación con la intercepción de la radiación solar, la fotosíntesis, procesos de transpiración y balance de energía aspectos fuertemente vinculados a la acumulación de biomasa (Haboudane *et al.*, 2004), además es uno de los índices aplicados a la experimentación para la predicción del rendimiento de los cultivos y modelado del balance hídrico en el sistema suelo agua atmosfera (Verger *et al.*, 2014).

Los métodos para estimar el IAF se pueden agrupar en dos categorías principales: directos e indirectos (Gower *et al.*, 1999; Bréda, 2003; Jonckheere *et al.*, 2004). Los métodos directos son los más precisos, pero presenta el inconveniente de ser destructivos, laboriosos y requieren alta inversión de tiempo para adquirir la información (Jonckheere *et al.*, 2004); unas de las técnicas más usadas en el método directo para estimar el IAF es mediante la determinación del área foliar (Zheng & Moskal, 2009).

Los métodos indirectos permiten determinar el IAF más rápido, por lo tanto permiten obtener una muestra espacial más grande, sin embargo, es necesario la validación de los datos a partir de los métodos directos que pueden considerarse como métodos de calibración (Jonckheere *et al.*, 2004). Actualmente, el métodos más utilizado para estimar la variabilidad espacial del IAF es a partir de los sensores remotos mediante índices de vegetación (IV) obtenidas de las imágenes satelitales o aéreas; los datos de sensores remotos son útiles para ajustar las propiedades de los cultivos y el suelo teniendo en cuenta las condiciones locales (Guérif & Duke, 2000). Los IV se transforman en IAF utilizando una relación estadística calibrada sobre medidas experimentales (Verrelst *et al.*, 2012; Viña *et al.*, 2011) o sobre simulaciones del modelo de transferencia radiactiva (Haboudane *et al.*, 2004).

A pesar de los notables avances tecnológicos y teóricos de los sensores remotos, el proceso de asimilación ha sido limitado en parte debido a la resolución espacial gruesa de los datos disponibles que se requieren en los modelos de cultivo (Duveiller & Defourny, 2010). La tecnología de los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) abre nuevos horizontes para la obtención de las variables de los cultivos a alta resolución espacial y temporal (Guillen-Climent *et al.*, 2012), sin embargo, relativamente pocas investigaciones se han dedicado a la estimación del IAF a partir de los datos de los VANTs (Duan *et al.*, 2014; Lelong *et al.*, 2008).

En la práctica la estimación del IAF a partir de los datos de sensores remotos enfrenta dos dificultades: los índices de vegetación se aproximan asintóticamente a un nivel de saturación cuando IAF supera los 2 a 5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, dependiendo del tipo de índice de vegetación; no existe una relación única entre el IAF y un índice de vegetación, sino más bien un conjunto de relaciones, cada una en función del contenido de clorofila y otras características del dosel (Haboudane *et al.*, 2004).

Se han desarrollado varios estudios con sensores remotos que establecen una relación entre los índices de vegetación (IV) y el IAF usando imágenes satelitales (Kross *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2012; Nguy-Robertson *et al.*, 2012), y algunos trabajos aplicando las imágenes multiespectrales adquiridas desde los VANTs (Kalisperakis *et al.*, 2015; Córcoles *et al.*, 2013; Mathews & Jensen, 2013) El índice más común y ampliamente usado en la literatura es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que encuentra altamente correlacionado con los cambios en la densidad del dosel medidos por el IAF (Rouse *et al.*, 1973), sin embargo, es sensible a la reflectancia del suelo y a los valores relativamente bajos de IAF (Liu *et al.*, 2012), también se ha empleado el índice de vegetación ajustado al suelo optimizado (OSAVI), el índice de relación simple (SR), entre otros.

## 8.2. Objetivos

- Estimar y validar el índice de área foliar (IAF) con el ceptómetro e índices de vegetación obtenidos con imágenes adquiridas desde la plataforma VANT.

## 8.3. Metodología

Para determinar el índice de área foliar (IAF) se utilizaron dos métodos indirectos: ceptómetro (Accupar LP-80) e índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes adquiridas desde la plataforma VANT. La validación de los datos se realizó mediante el método directo del área foliar con mediciones realizadas directamente en campo.

### 8.3.1. Método indirecto

#### a) Ceptómetro

El ceptómetro estima el índice de área foliar (IAF) en función de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) que llega por encima (RFA<sub>a</sub>) y debajo del follaje (RFA<sub>d</sub>) de la planta, mediante la siguiente relación propuesta por Campbell & Norman (2012):

$$IAF = \frac{\left[ \left( 1 - \frac{1}{2K} \right) f_b - 1 \right] \ln \left( \frac{RFA_d}{RFA_a} \right)}{A(1 - 0.47f_b)} \quad (22)$$

Donde, IAF en  $m^2/m^2$ ,  $K$  es el coeficiente de extinción de la planta obtenido de  $K = 1/(2*\cos \nu)$ , siendo  $\nu$  el ángulo cenital,  $f_b$  es la fracción de la radiación directa con respecto a la radiación solar recibida y  $A$  es un coeficiente de absorción general del dosel igual a 0.86.

Las mediciones con el ceptómetro se realizaron bajo condiciones de cielo despejado, próximos al mediodía entre las 10 y las 13 horas, de esta forma el ángulo cenital fue el menor posible, y el factor  $f_b$  correspondió siempre a fracciones elevadas de radiación solar directa, lo que permitió obtener datos más homogéneos.

Para la adquisición de los datos fue necesario utilizar un nivel de mano para colocar el equipo en un ángulo de  $180^\circ$  en forma horizontal. Las mediciones con ceptómetro se realizaron en 11 fechas distribuidas a lo largo del desarrollo del cultivo en intervalos de 15 días aproximadamente con 5 repeticiones en cada tratamiento con un total de 220 datos (Figura 50).



**Figura 50.** Estimación del IAF obtenidos con el registrador de datos y sensor RFA externo del ceptómetro.

## b) Índices espectrales

Otro de los métodos empleados para estimar el IAF a gran escala es mediante los índices de vegetación (IV) obtenidas de imágenes satelitales o aéreas. La mayoría de los índices de vegetación utilizados para la estimar el IAF combinan la reflectancia en las longitudes de onda del visible y del infrarrojo cercano (NIR) (Liu *et al.*, 2012).

Los IV que se emplearon fueron el NG, NDVI (Ecuación 12), GNDVI y MTVI2. El NG se empleó porque combina la reflectancia en las tres bandas obtenidas por la cámara multispectral; el NDVI porque es uno de los índices que se ha utilizado ampliamente en aplicaciones agrícolas, además es el más común para determinar el IAF (Colombo *et al.*, 2003; Haboudane *et al.*, 2004); el GNDVI debido a que más sensible a la variación del contenido de clorofila en el cultivo, también es un indicador de senescencia en caso de estrés o etapa de madurez tardía (Gitelson *et al.*, 1996) y el índice de vegetación triangular modificado (MTVI2) ya que fue desarrollado con el fin de reducir la perturbación de la variación del

contenido de clorofila foliar para la estimación del IAF de los cultivos verdes, además incorpora un mecanismo de ajuste para reducir el efecto del suelo (Haboudane *et al.*, 2004).

$$NG = \frac{G}{NIR + R + G} \quad (23)$$

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (24)$$

$$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G} \quad (25)$$

$$MTVI2 = \frac{1.5[1.2(NIR - G) - 2.5(R - G)]}{\sqrt{(2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{R})} - 0.5} \quad (26)$$

Para estimar el IAF con los datos de detección remota se relacionaron de manera lineal los valores medidos de IAF y los valores correspondientes a cuatro índices de vegetación derivado de las imágenes multiespectrales adquiridas desde una plataforma VANT. Generalmente las ecuaciones que describen estas relaciones varían tanto en forma matemática como en coeficientes empíricos, dependiendo de los experimentos, los índices utilizados y el tipo de vegetación.

Para obtener las relaciones funcionales entre el IAF y los índices de vegetación estudiados en el presente trabajo, se obtuvieron los valores de los índices de vegetación correspondientes únicamente a los píxeles del cultivo, es decir, que se realizó una clasificación de la cobertura vegetal tal como se describe en el capítulo anterior.

### 8.3.2. Validación

La validación de los métodos indirectos se realizó comparando los valores estimados del IAF con los valores obtenidos con el método directo. El método directo consistió en la determinación del área foliar (AF) con la medición de largo y ancho de las hojas; el AF se calculó mediante la siguiente ecuación general propuesta para el cultivo de maíz (McKee, 1964).

$$AF = L \times W \times A \quad (27)$$

Donde L es la longitud de la hoja, W es el ancho máximo de la hoja y A es una constante de 0.75. Otros investigadores obtuvieron valores para la constante A entre 0.72 y 0.79 (McKee, 1964; Keating & Wafula, 1992; Birch *et al.*, 1998; Stewart & Dwyer, 1999). En un estudio reciente realizado por Mokhtarpour *et al.* (2010) se obtuvo un valor para la constante A de 0.754.

Para calcular el área foliar de la planta de maíz en los cuatro tratamientos se utilizó la ecuación 21, con la constante A de 0.754 propuesta por Mokhtarpour *et al.* (2010); las mediciones del largo y ancho máximo de las de hojas se obtuvieron durante el desarrollo fenológico del cultivo con 3 repeticiones por tratamiento.

Finalmente los cálculos correspondientes al IAF de la planta se realizaron con la ecuación 28, descrita por (Reis *et al.*, 2013):

$$IAF = \frac{AF \times NP}{AT} \quad (28)$$

Donde, IAF es índice de área foliar ( $m^2 m^{-2}$ ); AF es superficie de área foliar de la planta ( $m^2$ ); NP es el número de plantas por  $m^2$  y AT es el área considerada total de  $1 m^2$ .

Para el análisis estadístico se utilizó el RMSE como indicadores de bondad de ajuste para la validación de los datos.

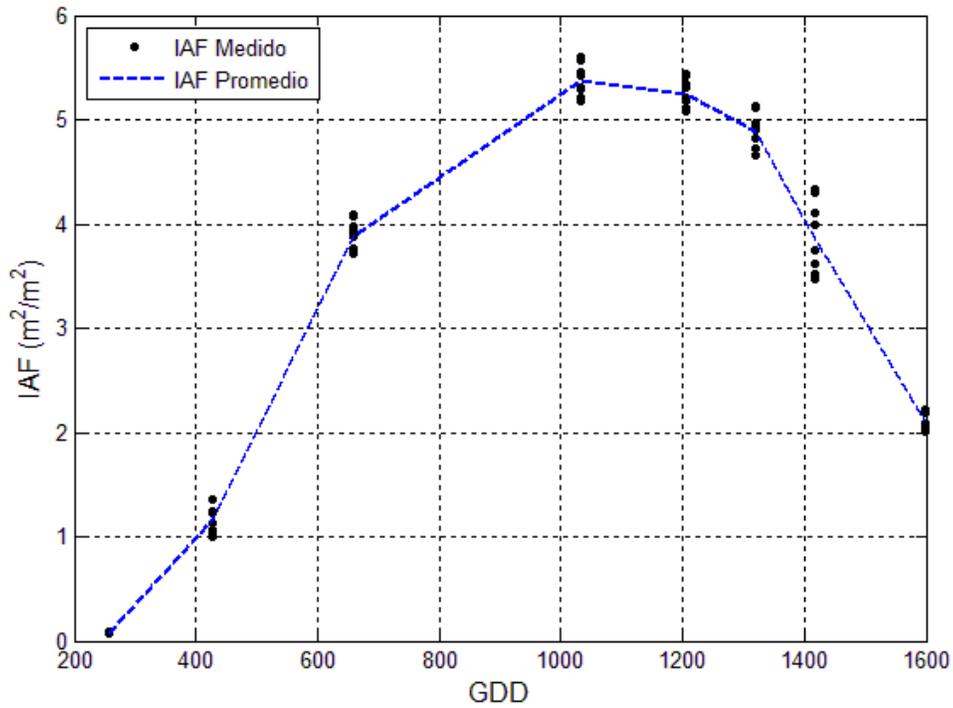
## 8.4. Resultados y discusiones

### 8.4.1. Estimación del IAF

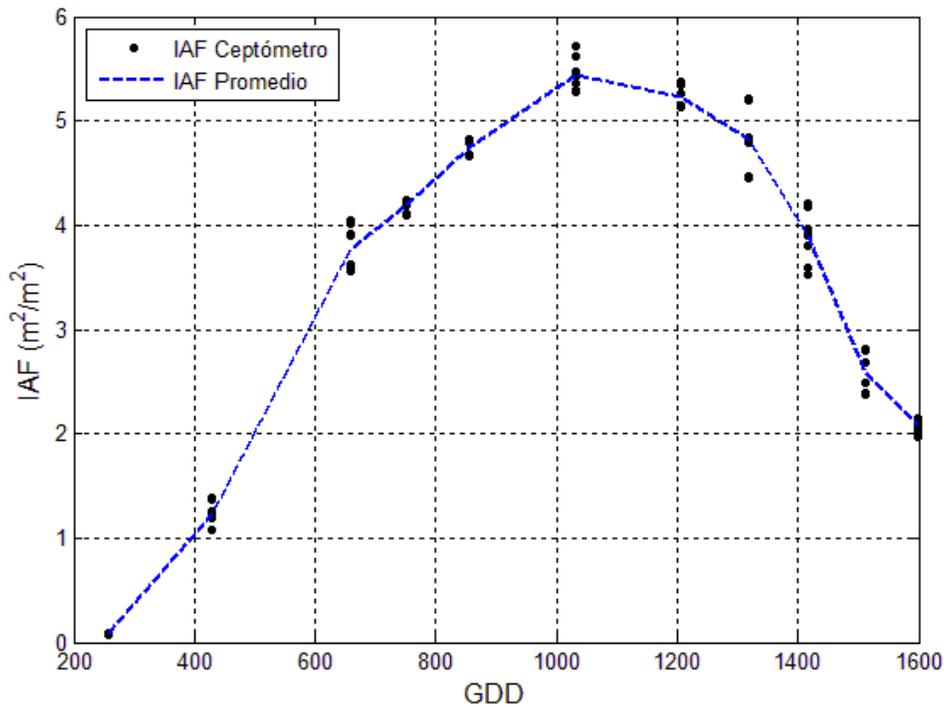
Los valores del IAF medidos y estimados con el ceptómetro dentro de la parcela experimental durante las etapas de crecimiento del cultivo de maíz se muestran en la Figura 51 y Figura 52. Los valores medios máximos medidos del IAF oscilan entre 5.58 y 5.17  $m^2/m^2$  y de 5.62 a 5.29  $m^2/m^2$  para el caso de los valores estimados; estos valores se obtuvieron a los 1033 GDD y 73 DDS para todos los tratamientos lo que corresponde a la etapa reproductiva del cultivo. Del análisis por tratamiento los valores más altos se presentaron en el T1 y los valores más bajos en el T4

Es necesario indicar que a pesar de que los tratamientos T2, T3 y T4 se sembraron con las mismas densidades, los valores del IAF presentan variaciones entre ellas; debido a que el sistema de labranza utilizado en cada tratamiento fue diferente, donde el T4 tuvo las condiciones más desfavorables.

Una vez obtenidas las curvas del IAF se generaron las ecuaciones de regresión no lineal para obtener los modelos cuadráticos para cada tratamiento. Por el método directo los modelos cuadráticos se ajustaron a un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.992, 0.988, 0.982 y 0.978 para T1, T2, T3 y T4, respectivamente y por el método indirecto de estimación con el ceptómetro los modelos se adaptaron a una  $R^2$  de 0.985, 0.981, 0.973 y 0.966 para T1, T2 y T3 respectivamente.



**Figura 51.** Índice de área foliar medido en el sitio experimental.



**Figura 52.** Índice de área foliar estimado con el ceptómetro en el sitio experimental.

Para estimar el IAF con datos de detección remota, se propusieron relaciones empíricas entre el IAF y cuatro índices vegetación. El procedimiento consistió en establecer una relación empírica entre los valores medidos del IAF y los valores correspondientes al índice espectral

(NG, NDVI GNDVI y MTVI2). Los resultados indican que dos de los cuatro índices de vegetación presentan un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superior al 0.90, los cuales corresponden al NDVI y MTVI2; mientras que el GNDVI y NG muestran un  $R^2$  inferior al 0.88 (Figura 53).

El IAF y el NG presentan una relación lineal baja con un  $R^2$  de 0.59; cuando los valores del IAF son mayores a  $4.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$  y los valores de NG menores a 0.2 los punto de dispersión se ajustan a la línea de tendencia, lo que indica que la relación entre estas dos variables puede ser utilizado durante la etapa de floración del cultivo. Lo comparación con otros resultados no fue posible ya que no existen estudios en el que se estime el IAF a partir del NG. La ecuación que relaciona el IAF y NG es:

$$\text{IAF}_{\text{NG}} = -48.16(\text{NG}) + 14.44 \quad (29)$$

La relación lineal que muestra el IAF y el NDVI es muy alta con un  $R^2$  de 0.95; como puede observarse cuando el IAF supera los  $4.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$  la dispersión de los puntos hacia la línea de tendencia es menor. Este coeficiente de determinación es mayor que el reportado por Kross *et al.* (2015) y Liu *et al.* (2012) con un valor de 0.89 para imágenes RapidEye (5 m de resolución) y 0.78 para imágenes Landsat 7 (30 m de resolución), respectivamente, lo que indica que la resolución espacial de las imágenes ayuda a identificar con mayor precisión datos y características del cultivo. Lelong *et al.* (2008) utilizando un VANT, estimaron el IAF a partir del NDVI obtenido de las imágenes con resolución espacial de 10 cm/pixel, para una sola fecha de desarrollo del trigo obteniendo un  $R^2$  de 0.82. La ecuación que describe la estimación del IAF en función del NDVI es la siguiente:

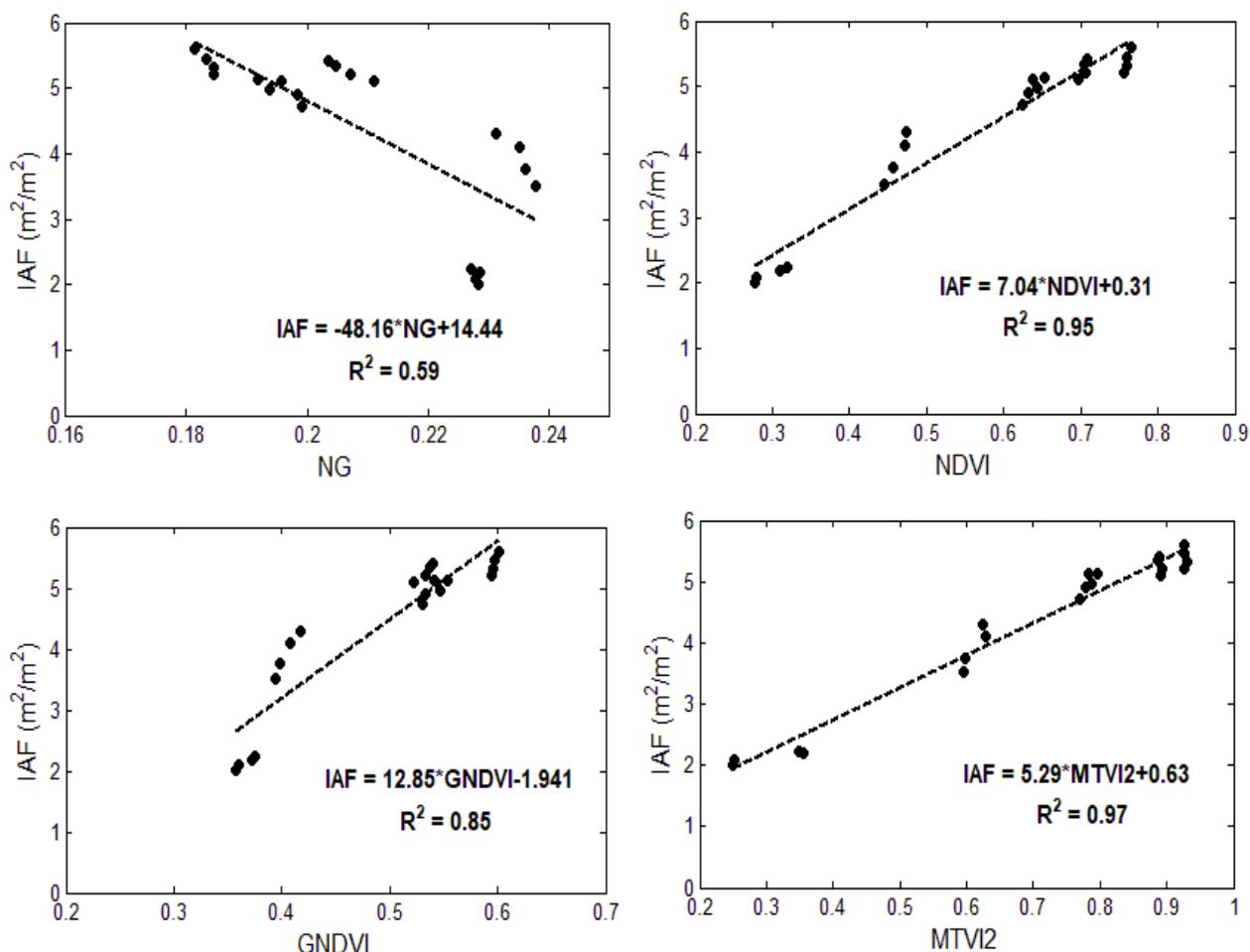
$$\text{IAF}_{\text{NDVI}} = 7.04(\text{NDVI}) - 0.31 \quad (30)$$

Para el caso del IAF y el GNDVI la relación presenta un  $R^2$  de 0.85; el comportamiento del IAF con respecto al GNDVI muestra que los puntos de dispersión se acercan más a la línea de tendencia cuando se tienen valores altos de IAF; presentando una menor relación cuando los valores del IAF son inferiores a  $4 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . Kross *et al.* (2015) obtuvieron para este índice un  $R^2$  de 0.89 similar al que obtuvieron con el NDVI, para nuestro caso estos índices presentaron diferentes  $R^2$  debido a que se consideró únicamente los valores del índice de vegetación del cultivo y a la resolución espacial obtenida en las imágenes. Hunt *et al.* (2010) adquirieron un  $R^2$  igual al obtenido en este estudio (0.85) pero con imágenes de un VANT de 4.9 cm/pixel de resolución para el cultivo de trigo. La relación que estima el IAF en función del GNDVI es la siguiente:

$$\text{IAF}_{\text{GNDVI}} = 12.85(\text{GNDVI}) - 1.94 \quad (31)$$

Estudios previos han mostrado buenas relaciones entre el IAF medido y índice de vegetación triangular modificado (MTVI2) derivados de datos del Landsat 5, MODIS y RapidEye (30 m, 205 m y 5 m) (Liu *et al.*, 2009; Nguy-Robertson *et al.*, 2012; Kross *et al.*, 2015). Aunque el MTVI2 está diseñado para datos hiperespectrales, el coeficiente de determinación que se obtuvo con los datos multispectrales fue de 0.97, lo que indica una correlación más alta que la obtenida con el NDVI; donde la ecuación correspondiente a la estimación del IAF en función del MTVI2 queda de la siguiente manera:

$$IAF_{MTVI2} = 5.29(MTVI2) + 0.63 \quad (32)$$

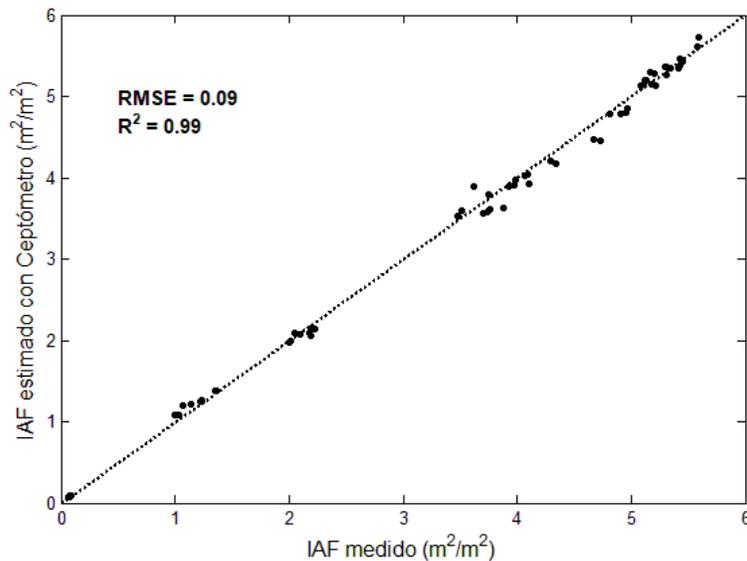


**Figura 53.** Relación entre los índices de vegetación y el IAF.

#### 8.4.3. Validación del IAF

Esta metodología permitió confirmar que las estimaciones del índice de área foliar con el ceptómetro a partir de la intercepción de la radiación de la cobertura del cultivo son muy precisos con un  $R^2$  y RMSE de 0.99 y 0.10 m²/m², respectivamente (Figura 54).

Del análisis estadístico realizado para cada tratamiento donde se caracterizan las diferencias entre las variables medidas y estimadas del IAF (ceptómetro) , se tiene que el valor máximo de  $R^2$  y RMSE, se presenta en el T3 seguido de manera consecutiva de los T4, T1 y T2; es decir que el T2 presenta el menor RMSE ( $0.05 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ).



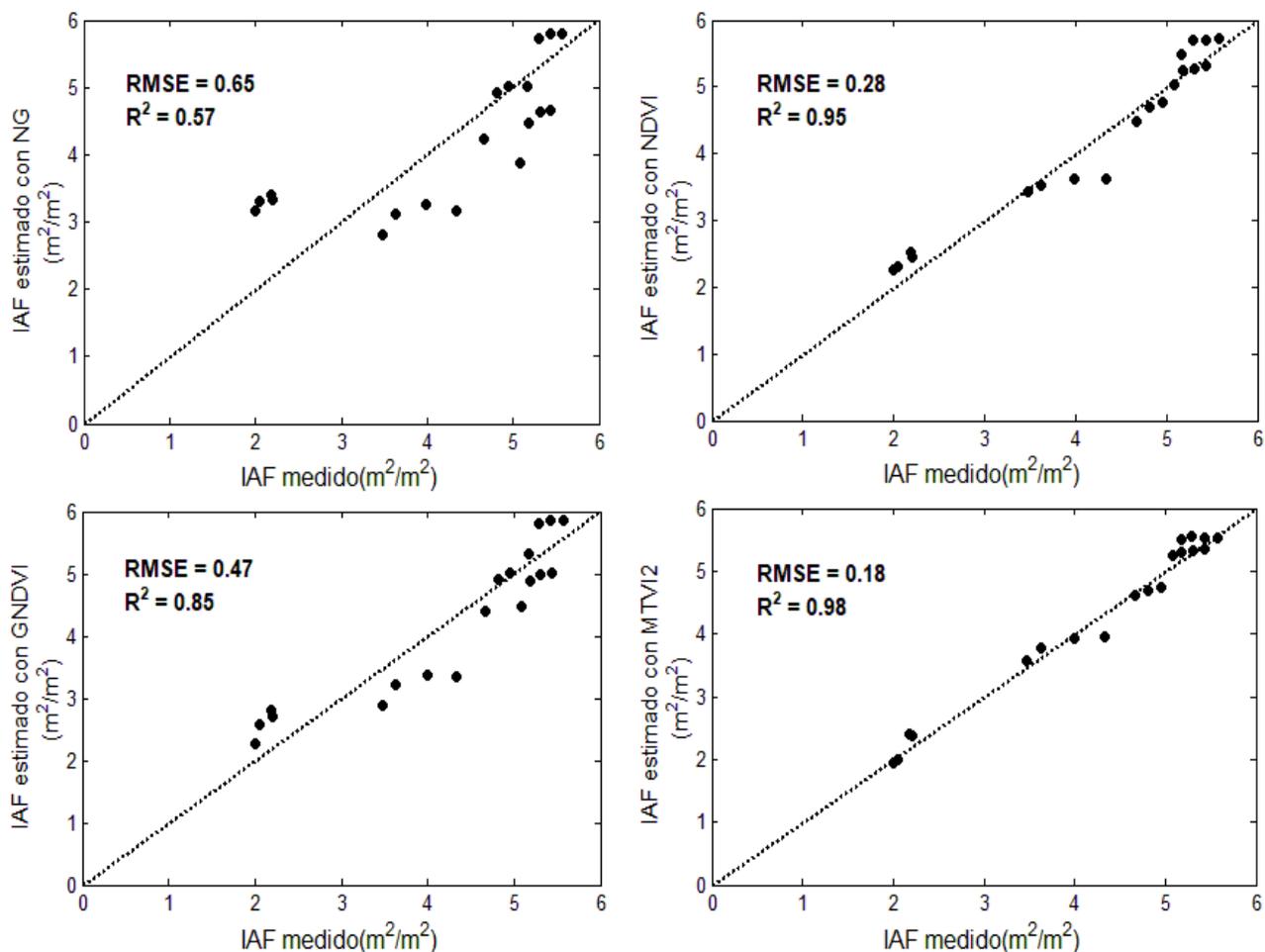
**Figura 54.** Relación entre el IAF medido y el IAF estimado con el ceptómetro.

La validación independientemente de las mejores funciones demostró que los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multispectrales adquiridas por un VANT son adecuados para la estimación del IAF de maíz.

La relación del IAF medido con el IAF estimado a partir del NDVI, GNDVI y MTVI2 muestra un  $R^2$  superior al 0.85 y un RMSE por debajo de  $0.50 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , y para el NG se tiene un  $R^2$  de 0.57 y un RMSE de  $0.65 \text{ m}^2/\text{m}^2$  (Figura 55). Los índices que presentaron resultados más favorables fueron el NDVI y MTVI2 con  $R^2$  de 0.95 y 0.98 y un RMSE de 0.28 y  $0.18 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , respectivamente; la mínima diferencia que pudieran presentar estos índices se muestra con mayor claridad durante la transición de la etapa vegetativa a la etapa reproductiva.

Resultados similares obtuvieron Liu *et al.* (2012) donde encontraron el menor RMSE de la relación entre el IAF y el MTVI2 ( $0.60 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) con respecto a la relación de IAF y el NDVI ( $0.66 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) para imágenes Landsat 7.

A pesar de que los resultados demuestran que el índice MTVI2 es el más aceptable para estimar el IAF por su máximo  $R^2$  y mínimo RMSE, es más recomendable utilizar el NDVI por la sencillez de cálculo, además de ser el índice más analizado dentro de la agricultura; y en particular en este caso los valores generados con el NDVI tienen de la misma manera un alto  $R^2$  y un bajo RMSE.



**Figura 55.** Relación entre el IAF medido y el IAF estimado con el NDVI.

## 8.5. Conclusiones

El valor máximo del IAF se consiguió después de la floración a los 1033 GDD y 73 DDS. Se consiguió un  $R^2 = 0.99$  y un RMSE entre los valores del IAF medidos y los valores IAF estimados con el ceptómetro, lo cual indica que las mediciones del IAF realizadas con ceptómetro son precisos.

Debido a la resolución espacial y temporal muy alta de las imágenes multiespectrales adquiridas desde una plataforma VANT y al considerar los pixeles correspondientes únicamente al cultivo se obtuvo una mayor relación entre los índices de vegetación y el IAF. En general tres de los cuatro índices de vegetación analizados presentan una alta relación lineal con un  $R^2$  de 0.95, 0.85 y 0.97 para el NDVI, GNDVI y MTVI2, respectivamente; el NG fue el índice que menos se ajustó al IAF presentando un  $R^2$  de 0.59.

El análisis estadísticos de la relación entre el IAF medido y el IAF estimado con los índices de vegetación se tiene que los dos índices mayor se ajustan al IAF son NDVI y MTVI2, mostrando un  $R^2=0.95$  y  $RMSE=0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$  para el NDVI y un  $R^2=0.98$  y  $RMSE=0.18 \text{ m}^2/\text{m}^2$  para el MTVI2. Aunque el MTVI2 arroja la máxima correlación lineal y el mínimo error, se considera al NDVI más aceptable para determinar el IAF debido a su simplicidad de cálculo.

Independientemente del método de estimación del IAF todos los valores obtenidos presentan un comportamiento similar, en el cual el IAF se satura después de  $5 \text{ m}^2/\text{m}^2$  y al finalizar el desarrollo del cultivo se obtiene un valor aproximado de  $2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . A medida que aumenta la cobertura vegetal aumenta el IAF, viéndose afectado en algunas ocasiones por las condiciones meteorológicas.

## **9. DESCRIPCIÓN DE LA FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE MAÍZ A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS CON EL VANT**

### **9.1. Introducción**

La fenología es el estudio de las fases o actividades periódicas y repetitivas del ciclo de vida de las plantas y su variación temporal a lo largo del año (Mantovani *et al.*, 2003). La fenología tiene como finalidad estudiar y describir de manera integral los diferentes eventos fenológicos que se dan en las especies vegetales dentro de ecosistemas naturales o agrícolas en su interacción con el medio ambiente. En este sentido, la realización de las observaciones fenológicas, consideradas importantes, son la base para la implementación de todo sistema agrícola, permitiendo a los productores agrícolas obtengan con su aplicación una mayor eficiencia en la planificación y programación de las diferentes actividades agrícolas conducente a incrementar la producción de los cultivos (Yzarra *et al.*, 2011).

Eventos fenológicos como la brotación, la floración, la fructificación e incluso la senescencia, responden directamente a cambios macro y microclimáticos (Sparks *et al.*, 2009; Badeck *et al.*, 2004), siendo las variables de temperatura, fotoperíodo, radiación solar, humedad relativa y precipitación las responsables de los cambios de estados fenológicos en las plantas (genética de planta) (Dahlgren *et al.*, 2007). Dentro de las variables más influyentes se encuentran la temperatura, el fotoperíodo y la precipitación (Sherry *et al.*, 2007). El conocimiento de la fenología en diferentes fechas de siembra y en distintas condiciones agroecológicas constituye uno de los aspectos agronómicos fundamentales para el cultivo y la producción de cualquier vegetal.

La observación fenológica se realiza tradicionalmente a partir de un muestreo sistemático de campo para establecer la fase o etapa de desarrollo que presenta el cultivo, y cuyo registro es interpretado de acuerdo a las condiciones ambientales. A partir del avance alcanzado por las técnicas de percepción remota, desde los últimos años del siglo pasado la observación y registro de la actividad vegetal se viene realizando también a partir de los datos espectrales de reflectancia producidos por los sistemas de teledetección. Cuando se la realiza desde los aviones tripulados y no tripulados o satélites esta tarea de seguimiento presenta, de manera particular, las siguientes ventajas respecto a la forma tradicional de observación fenológica: es realizada por un único observador, ofrece una visión sinóptica del territorio y alcanza una visión repetitiva, por lo que, en conjunto, constituye un recurso particularmente idóneo para el seguimiento de la vegetación. Actualmente el monitoreo del estado fenológico de un cultivo se realiza mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) equipado con cámaras de alta resolución espacial; debido a la frecuencia, calidad y bajos costos.

## 9.2. Objetivos

- Identificar las etapas fenológicas del cultivo de maíz con las observaciones en campo y con las imágenes visibles de alta resolución.
- Establecer una relación entre los valores asignados a las etapas fenológicas y los días grado crecimiento acumulado (GDD).

## 9.3. Metodología

### 9.3.1. Determinación de las etapas fenológicas

Weber & Bleiholder (1990) realizaron la codificación BBCH (Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry) para los estados fenológicos de desarrollo del maíz. La escala extendida BBCH es un sistema para una codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de crecimiento para todas las especies de plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas; el código decimal, se divide principalmente entre las etapas de crecimiento principales y secundarios y está basado en el bien conocido código desarrollado por Zadoks *et al.* (1974) con la intención de darle un mayor uso a las claves fenológicas. En el Cuadro 9 se muestran los códigos decimales establecidos para las etapas fenológicas del maíz.

**Cuadro 9.** Codificación de las etapas fenológicas del maíz (Weber & Bleiholder, 1990; Lancashire *et al.*, 1991).

Código	Etapas
00	Siembra
10	Emergencia
20	Cuarta hoja
30	Octava hoja
40	Doceava hoja
50	Floración masculina
60	Floración femenina
70	Grano acuoso
75	Grano lechoso
80	Grano masoso
85	Grano abollado
90	Madurez fisiológica

El índice térmico más utilizado para conocer el desarrollo de las etapas fenológicas del maíz son los días grado crecimiento acumulado (GDD). La evaluación fenológica del cultivo de maíz a escala parcelaria se realizó en los capítulos anteriores al determinar las variables agronómicas, obteniendo datos con alta resolución espacial y temporal.

Las etapas fenológicas del cultivo de maíz se identificaron de manera visual con las imágenes en el rango visible y se verificaron con las observaciones realizadas directamente en campo; además a cada etapa fenológica se le asignó una escala decimal la cual se relacionó con los días grado crecimiento acumulado (GDD) del cultivo.

## 9.4. Resultados y discusiones

### 9.4.1. Etapas fenológicas y su relación con los GDD

La duración del ciclo fenológico del maíz fue de 122 días (siembra a madurez fisiológica) con 1695 GDD y la duración de siembra a cosecha fue de 137 días, equivalente a 1880 GDD.

Con las imágenes de alta resolución adquiridas con el VANT se identificaron 10 etapas fenológicas del cultivo a las cuales se les determinó una codificación de acuerdo con la descripción realizada por Weber & Bleiholder (1990), como se muestra en el Cuadro 10.

**Cuadro 10.** Los GDD y DDS para las etapas fenológicas identificadas del cultivo.

Etapa	Código	GDD	DDS
Cuarta hoja (V4)	20	258	18
Sexta hoja (V6)	25	370	26
Novena hoja (V9)	33	527	37
Enésima hoja (VN)	48	752	53
Floración femenina (R1)	64	1033	73
Grano acuoso (R2)	70	1206	86
Grano lechoso (R3)	75	1319	94
Grano masoso (R4)	80	1417	101
Grano abollado (R5)	85	1598	114
Madurez fisiológica (R6)	90	1695	122

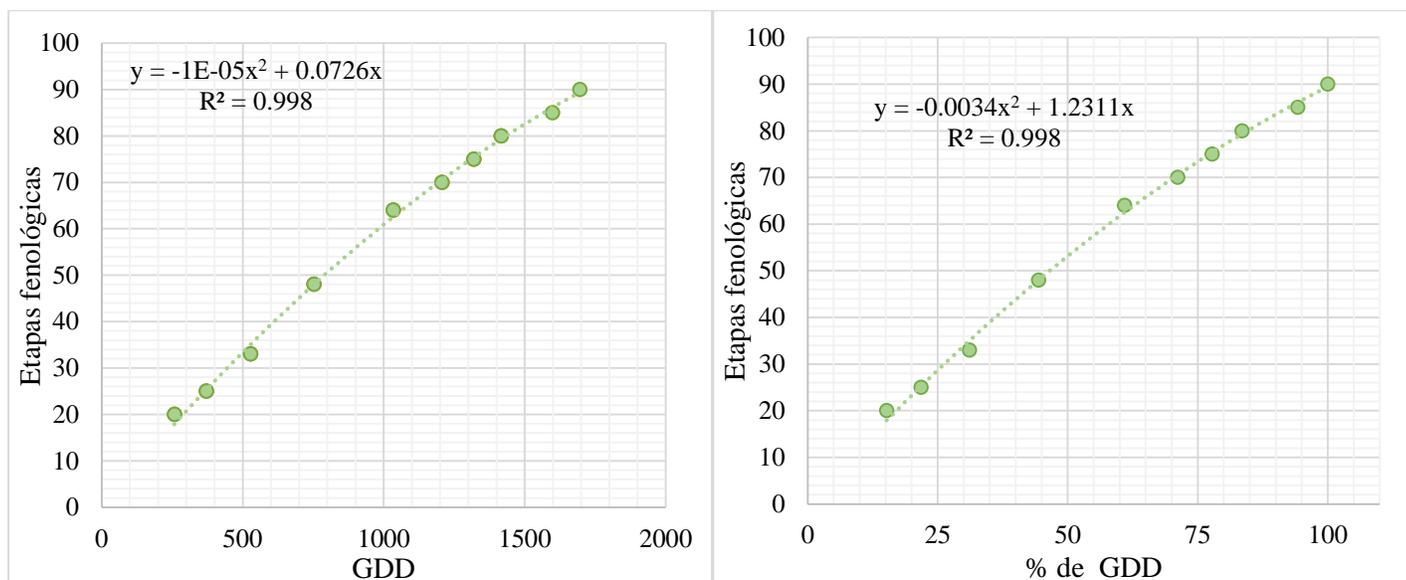
Los códigos decimales designados a las etapas fenológicas se correlacionaron con los GDD, como aparece en la Figura 56; al analizar varios modelos se obtuvo que el modelo con mayor relación entre estas variables fue una polinomial de segundo orden con un  $R^2$  de 0.998. Además de la ecuación en función de los GDD del ciclo fenológico, se obtuvo una ecuación general en base al porcentaje de los GDD, que puede ser utilizada para otras parcelas de maíz siempre que se encuentre calibrada. Los modelos se generaron con una intersección de la ordenada al origen para representar el crecimiento del cultivo desde la siembra ( $V_0 = 0$ ):

$$\text{Etapa}_{\text{GDD}} = -0.00001 (\text{GDD})^2 + 0.0726(\text{GDD}) \quad (33)$$

$$\text{Etapa}_{\% \text{GDD}} = -0.0034(\% \text{GDD})^2 + 1.2311(\% \text{GDD}) \quad (34)$$

Estos resultados son similares a los reportados por Valdez-Torres *et al.* (2012), donde evaluaron y desarrollaron modelos fenológicos para el maíz blanco con un  $R^2$  de 0.996. De la misma forma, De la Casa (2011) adquirió un modelo fenológico con un  $R^2$  (0.91) menor al

obtenido en este estudio, porque su estimación la obtuvo a partir de los días después de la siembra.



**Figura 56.** Estimación de las etapas fenológicas del cultivo con los GDD.

Con la identificación precisa de las etapas fenológicas del cultivo se pueden determinar los índices de vegetación; el NDVI es el índice más utilizado en la agricultura y se puede determinar a partir de las etapas fenológicas con una función polinómica de tercer orden como sucede en la Figura 57.

El seguimiento fenológico en campo es lento, costoso, y poco práctico cuando la vigilancia de cultivos se proyecta a regiones agrícolas extensas. Las variables agronómicas basadas en los sensores remotos permiten caracterizar las variaciones que manifiestan las principales etapas fenológicas de los cultivos. En la Figura 58 se relacionaron las etapas fenológicas con las variables agronómicas obtenidas mediante las imágenes visibles y multiespectrales, como se explica en los capítulos anteriores. En caso de que las etapas fenológicas estuvieran en función de las variables agronómicas sería necesario separar las etapas vegetativas de las etapas reproductivas.

Las etapas vegetativas y reproductivas del cultivo se pueden observar en la Figura 59. Estas etapas corresponden a los días en que se realizaron los vuelos con el VANT; durante la etapa de floración masculina (VT) no se adquirieron imágenes.

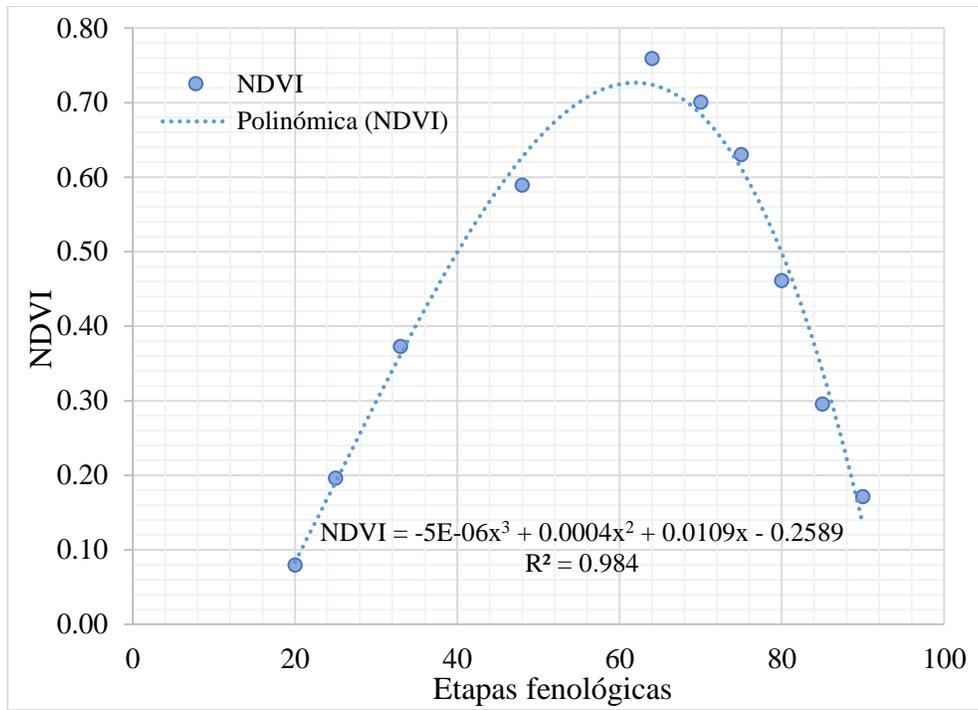


Figura 57. El NDVI en función de las etapas fenológicas.

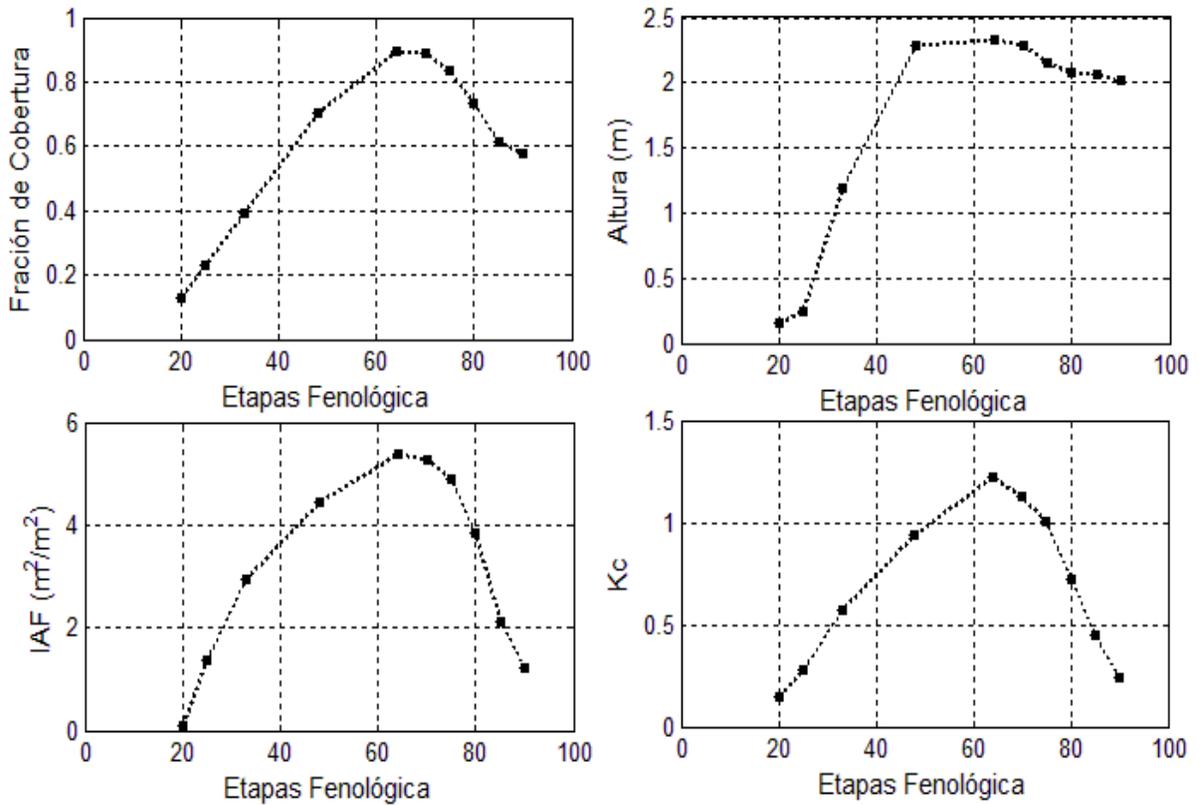
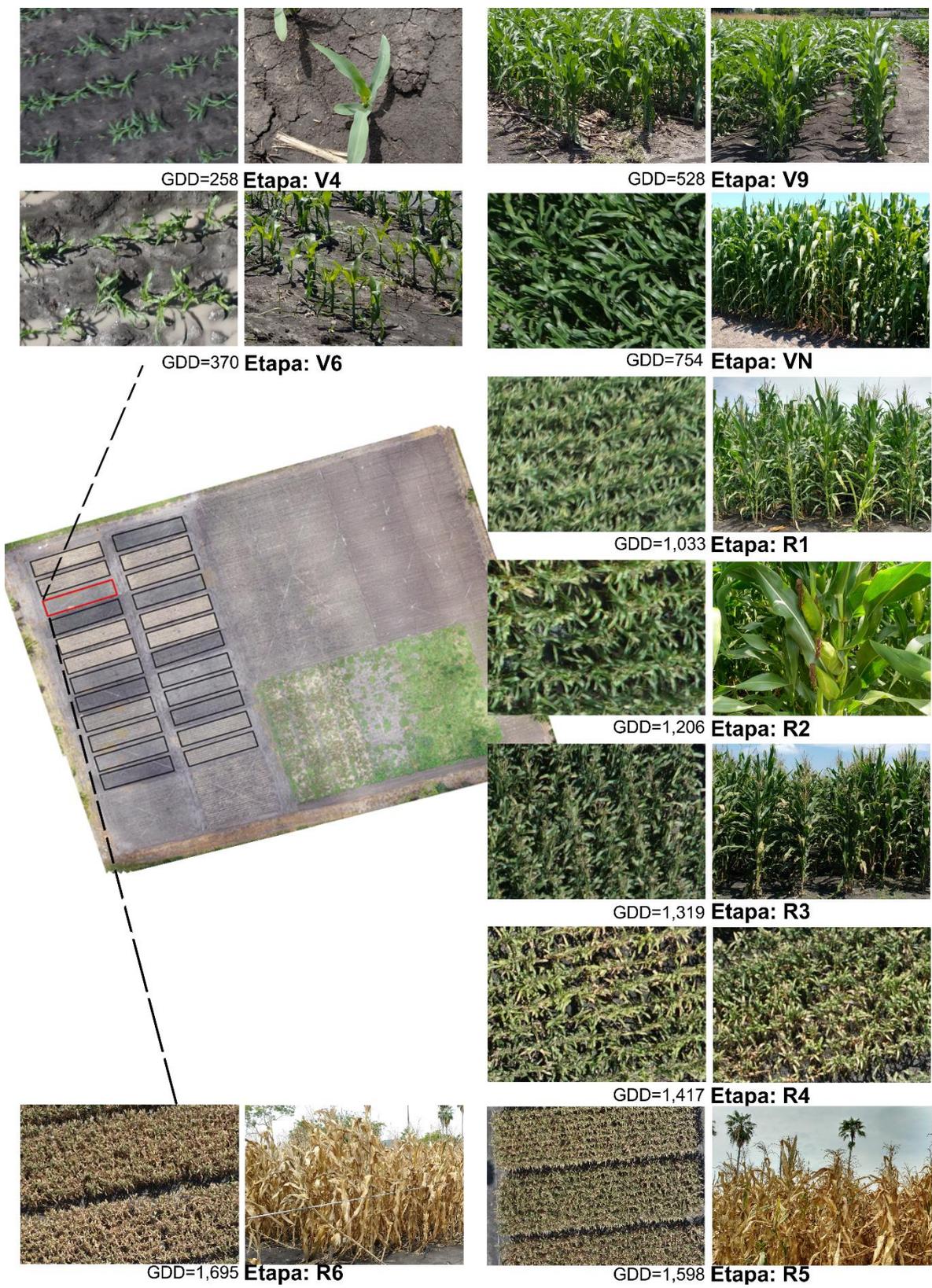


Figura 58. Relación entre las etapas fenológicas y variables agronómicas.



**Figura 59.** Identificación de las etapas fenológicas del cultivo maíz a partir de las imágenes visibles.

## 9.5. Conclusiones

El procedimiento de los días grado crecimiento acumulado (GDD) resultó un indicador preciso para representar la dinámica del desarrollo fenológico del cultivo en la parcela experimental; se generó una ecuación polinomial de segundo orden ( $\text{Etapa}_{\text{GDD}} = -0.00001 (\text{GDD})^2 + 0.0726(\text{GDD})$ ) para poder determinar las etapas fenológicas del cultivo mediante los GDD, con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.998. Identificar correctamente las etapas fenológicas y asignarle los valores de codificación adecuada resulta conveniente, debido a que con estos valores representando a las etapas fenológicas se pueden determinar variables agronómicas (el coeficiente de cultivo, índice de área foliar, etc.) que en algunas ocasiones son muy complicadas de obtener o que utilizan herramientas muy costosas para su cálculo; indicando una relación factible entre estas dos variables.

La transición entre las etapas vegetativas y reproductivas del cultivo de maíz pueden determinarse mediante los valores de las variables agronómicas; las etapas vegetativas son reconocidas por el incremento en los valores con respecto a los GDD mientras que las etapas reproductivas son identificadas por la disminución de los valores.

## 10. CONCLUSIONES GENERALES

Las imágenes adquiridas con las cámaras digitales desde el VANT permitieron determinar las variables agronómicas del cultivo con mayor precisión comparada con otras tecnológicas de percepción remota debido a la alta resolución espacial y temporal de los datos y a los algoritmos de clasificación de imágenes basados en objetos. La resolución espacial de las imágenes, el área cubierta y el tiempo de vuelo en el sitio experimental varían de acuerdo a las especificaciones del sensor, el porcentaje de traslape (transversal y longitudinal) y la altura de vuelo.

El alcance de la información depende del tipo de cámara empleada; el análisis de datos con las imágenes RGB es más limitada con respecto a las imágenes multiespectrales. Con las imágenes RGB se obtuvieron la altura y cobertura del cultivo y con las imágenes multiespectrales también se determinó la cobertura, además del IAF, Kc y ETc. a partir de los modelos digitales de elevación e índices de vegetación.

Los errores encontrados en el cálculo de alturas del cultivo fueron mínimos comparados con las medidas tomadas directamente en campo (RMSE = 3.2 cm), debido a la precisión de los modelos digitales de elevación generados y apoyados en base a los puntos de control terrestre y al traslape entre las imágenes.

La cobertura del cultivo se determinó mediante índices de vegetación y valores umbrales obtenidos con el algoritmo de Otsu. El índice que mayor precisión obtuvo en la etapa temprana del cultivo fue el ExG (94.40%) y en la etapa intermedia y de senescencia las precisiones más alta se obtuvieron con el GNDVI (96.16%); en estas dos últimas etapas las precisiones de los índices RGB son inferiores al 75%.

El IAF estimado con ceptómetro resultó ser preciso ( $R^2=0.99$  y  $RMSE= 0.10 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) comparado con el método directo. Analizando cuatro índices de vegetación (NG, NDVI, GNDVI y MTVI2) para determinar el IAF; se encontró que el NDVI y el MTVI2 son los índices más adecuados para estimar el IAF ya que presentan las relaciones lineal más alta ( $R^2=0.95$  y  $R^2=0.97$ ) y los errores más bajos ( $RMSE= 0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$  y  $RMSE= 0.18 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ).

Se generó un modelo de regresión lineal simple para establecer una relación general entre el NDVI de las imágenes multiespectrales de alta resolución y el Kc; donde  $Kc_{NDVI} = 1.6727 (NDVI) - 0.0479$ . Como el NDVI es específico para el cultivo en cada pixel, los valores de Kc estimados con el modelo NDVI-Kc representan las condiciones reales de crecimiento del cultivo en campo; además con los datos de Kc y ETo del sitio se determinó la distribuida espacial de la evapotranspiración del cultivo (ETc).

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agam, N., Evett, S. R., Tolk, J. A., Kustas, W. P., Colaizzi, P. D., Alfieri, J. G., McKee, L. G., Copeland, K. S., Howell, T.A. & Chávez, J. L. (2012). Evaporative loss from irrigated interrows in a highly advective semi-arid agricultural area. *Advances in Water Resources*, 50, 20-30.
- Ahamed, T., Tian, L., Jiang, Y., Zhao, B., Liu, H., & Ting, K. C. (2012). Tower remote-sensing system for monitoring energy crops; image acquisition and geometric corrections. *Biosystems Engineering*, 112(2), 93-107.
- Allen, R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2), 97-106.
- Allen, R.G., & Pereira, L.S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*. 28(1), 17–34.
- Allen R., Pereira L., Raes D., & Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Alonso, F. (2006). Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Murcia, España. Recuperado de <http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/>
- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. In: Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R.L., Howell, T.A., Itenfisu, D., Jensen, M.E., Snyder, R.L. (Eds.), Report 0-7844-0805-X. Am. Soc. Civ. Eng.—Environ. Water Resources Institute, 69pp (+App. A-FandIndex).
- Badeck, F. W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J., & Sitch, S. (2004). Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162(2), 295-309.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision agriculture*, 15(4), 361-376.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395-10412.
- Bendig, J., Bolten, A., & Bareth, G. (2013). UAV-based imaging for multi-temporal, very high resolution crop surface models to monitor crop growth variability. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2013(6), 551-562.
- Bendig, J., Willkomm, M., Tilly, N., Gnyp, M. L., Bennertz, S., Qiang, C., Miao, Y., Lenz-Wiedemann, V. I. S., & Bareth, G. (2013). Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring in Northeast China. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40 (1), 45-50.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, 38(6).

- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722-738.
- Bhartiya, K. M., & Ghare, A. D. (2014). Relative humidity based model for estimation of reference evapotranspiration for western plateau and hills region of India. *Water Resources Management*, 28(10), 3355.
- Birch, C. J., Hammer, G. L., & Rickert, K. G. (1998). Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). *Australian Journal of Agricultural Research*, 49(2), 249-262.
- Bolaños, J., & Barreto, H. (1991). Análisis de los componentes de rendimiento de los ensayos regionales de maíz de 1990. *Análisis de los resultados experimentales del PRM*, 2(1), 9-27.
- Bolaños, J., & Edmeades, G. O. (1993). La fenología del maíz. *Síntesis de resultados experimentales del PRM 1992*, 4, 251-261.
- Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417.
- Brisco, B., Brown, R. J., Hirose, T., McNairn, H., & Staenz, K. (1998). Precision agriculture and the role of remote sensing: a review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24(3), 315-327.
- Calera, A., González-Piqueras, J. & Melia, J. (2004). Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 97-109.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2012). *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media.
- Calera, A. B. (2005). La evapotranspiración: concepto y metodología de cálculo. *Agua y Agronomía*. 1re edición. Editorial: Mudi-Prensa. Barcelona, España. 163-238.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*, New York. Guilford Press.
- Campos, I., Neale, C. M., Calera, A., Balbontín, C., & González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98(1), 45-54.
- Chen, J. M., Chen, X., Ju, W., & Geng, X. (2005). Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *Journal of Hydrology*, 305(1), 15-39.
- Coelho, D. T. & Dale, R. F. 1980. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: planting to silking. *Agronomy Journal*, 72(3), 503-510.
- Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D., & Marino, C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), 120-131.
- Colomina, I.; & Molina, P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- Córcoles, J. I., Ortega, J. F., Hernández, D., & Moreno, M. A. (2013). Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems Engineering*, 115(1), 31-42.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A. M., López, P., & Calera, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *Revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA)*, 101 (3), 212-224.

- Dahlgren, J. P., von Zeipel, H., & Ehrlén, J. (2007). Variation in vegetative and flowering phenology in a forest herb caused by environmental heterogeneity. *American Journal of Botany*, 94(9), 1570-1576.
- Dai, A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008. *Journal of Geophysical Research*, 116, D12115.
- Das, B., Sahoo, R. N., Pargal, S., Krishna, G., Gupta, V. K., Verma, R., & Viswanathan, C. (2016). Measuring leaf area index from colour digital image of wheat crop. *Journal of Agrometeorology*, 18(1), 22.
- De la Casa, A. C. (2011). Monitoreo de cultivos de maíz y estimación de rendimiento a nivel de lote con datos de aqua-modis en Córdoba, Argentina.
- De Oliveira, R. A., Daros, E., Camargo Zambon, J. L., Weber, H., Teruyo Id, O., Bessalho-Filho, J. C., Zuffellato-Ribas, K. C. & Tramuja da Silva, D. K. (2007). Área foliar en tres cultivares de caña de azúcar y su correlación con la producción de biomasa. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 37, 71-76.
- Ding, R., Kang, S., Zhang, Y., Hao, X., Tong, L., & Du, T. (2013). Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agricultural Water Management*, 127, 85-96.
- Duan, S. B., Li, Z. L., Wu, H., Tang, B. H., Ma, L., Zhao, E., & Li, C. (2014). Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 12-20.
- Duchemin, B., Hadria, R., Er-Raki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J., Karrou, H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.-C., Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1), 1–27.
- Duveiller, G., & Defourny, P. (2010). A conceptual framework to define the spatial resolution requirements for agricultural monitoring using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2637-2650.
- Dwyer, L.M., & Stewart, D.W. (1986). Leaf area development in field-grown maize. *Agronomy Journal*, 78 (2), 334–343.
- Glenn E. P., Huete A.R., Nagler P.L., Nelson S.G. (2008). Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors*, 8 (4), 2136-2160.
- Edmeades, G. O., Lafitte, H. R., & Chapman, S.C. (1992). Predicting the phenology of tropical maize: effects of photoperiod and temperature. CIMMYT, Mexico.
- Elvidge, C. D., & Chen, Z. K. (1995). Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 54(1), 38-48.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Boulet, G., & Williams, D.G. (2010). Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 97 (11), 1769–1778.
- Er-Raki, S., Rodriguez, J.C., Garatuza-Payan, J., Watts, C.J., & Chehbouni, A. (2013) Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural Water Management*, 122, 12–19.

- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R. (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 87(1), 41–54.
- Fang, F. (2015). The Retrieval of Leaf Inclination Angle and Leaf Area Index in Maize. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Netherlands.
- Farg, E., Arafat, S. M., El-Wahed, M. A., & El-Gindy, A. M. (2012). Estimation of Evapotranspiration ETC and crop coefficient Kc of wheat, in south Nile Delta of Egypt using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 83-89.
- Fischer, K.S. & Palmer, F.E. (1984). Tropical maize. *The Physiology of Tropical Field Crops*. John Wiley and Sons, New York. 213-248.
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., Gallego, P.P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J., & Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, 9-19.
- Garcia-Ruiz, F., Sankaran, S., Maja, J. M., Lee, W. S., Rasmussen, J., & Ehsani, R. (2013). Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91, 106-115.
- Geipel, J., Link, J., & Claupein, W. (2014). Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sensing*, 6 (11), 10335-10355.
- Gée, C., Bossu, J., Jones, G., & Truchetet, F. (2008). Crop/weed discrimination in perspective agronomic images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(1), 49-59.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10).
- Guillen-Climent, M. L., Zarco-Tejada, P. J., Berni, J. A. J., North, P. R. J., & Villalobos, F. J. (2012). Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV. *Precision agriculture*, 13(4), 473-500.
- Gitelson, A. A., Peng, Y., & Huemmrich, K. F. (2014). Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data. *Remote Sensing of Environment*, 147(1), 108-120.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Masek, J. G., Verma, S. B., & Suyker, A. E. (2008). Synoptic monitoring of gross primary productivity of maize using Landsat data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(2), 133-137.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76-87.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298.
- Govaerts, B., Verhulst, N., Sayre, K. D., De Corte, P., Goudeseune, B., Lichter, K., Crossa, J., & Dendooven, L. (2007). Evaluating spatial within plot crop variability for different management practices with an optical sensor. *Plant and soil*, 299(1-2), 29-42.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote sensing of environment*, 70(1), 29-51.

- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B1), 1207–1214.
- Guérif, M., & Duke, C. L. (2000). Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81(1), 57-69.
- Guzinski, R., Nieto, H., Jensen, R., & Mendiguren, G. (2014). Remotely sensed land-surface energy fluxes at sub-field scale in heterogeneous agricultural landscape and coniferous plantation. *Biogeosciences*, 11 (18), 5021–5046.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337-352.
- Harmo, T., Kvien, C., Mulla, D., Hoggenboom, G., Judy, J., & Hook, J. (2005). Precision agriculture scenario. In *NSF workshop on sensors for environmental observatories*. Baltimore, MD, USA: World Tech. Evaluation Center.
- Holman, F. H., Riche, A. B., Michalski, A., Castle, M., Wooster, M. J., & Hawkesford, M. J. (2016). High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. *Remote Sensing*, 8(12), 1031.
- Huete, A.R. (1988). A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environment*, 25 (3), 295-309.
- Huete A., Didan K., Leeuwen W., Miura T., & Glenn, E. (2010). MODIS vegetation indices. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, 26, 579-602.
- Hunt, E. R., Hively, W. D., Fujikawa, S. J., Linden, D. S., Daughtry, C. S., & McCarty, G. W. (2010). Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290-305.
- Irmak, A., Ratcliffe, I., Ranade, P., Hubbard, K. G., Singh, R. K., Kamble, B., & Kjaersgaard, J. (2011). Estimation of land surface evapotranspiration with a satellite remote sensing procedure. *Great Plains Research*, 21 (1), 73-88.
- Itenfisu, D., Elliott, R. L., Allen, R. G., & Walter, I. A. (2003). Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6), 440-448.
- Johnson, L.F., & Trout, T.J. (2012). Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4 (2), 439–455.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and forest meteorology*, 121(1), 19-35.
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N., & Tucker, E. C. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1271-1318.
- Kalisperakis, I., Stentoumis, C., Grammatikopoulos, L., & Karantzalos, K. (2015). Leaf area index estimation in vineyards from UAV hyperspectral data, 2D image mosaics and 3D canopy surface models. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 299.

- Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, 5(4), 1588–1602.
- Keating, B. A., & Wafula, B. M. (1992). Modelling the fully expanded area of maize leaves. *Field Crops Research*, 29(2), 163-176.
- Kiniry, J. R., Sanderson, M. A., Williams, J. R., Tischler, C. R., Hussey, M. A., Ocumpaugh, W. R., Read, J. C., Van Esbroeck, G., & Reed, R. L. (1996). Simulating Alamo switchgrass with the ALMANAC model. *Agronomy Journal*, 88(4), 602-606.
- Kipp, S., Mistele, B., Baresel, J. P., & Schmidhalter, U. (2014). High-throughput phenotyping early plant vigour of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 52, 271-278.
- Kobayashi, K., & Salam, M. U. (2000). Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345-352.
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. (2014). A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56-70.
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., & Champagne, C. (2015). Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 235-248.
- Lafitte, H. R. (1994). Identifying production problems in tropical maize: a field guide. CIMMYT, México.
- Lancashire, P. D., Bleiholder, H., Van Den Boom, T., Langelüddeke, P., Stauss, R., Weber, E., & Witzemberger, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology*, 119(3), 561-601.
- Lelong, C. C. D., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S., & Baret, F. (2008). Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors*, 8(5), 3557-3585.
- Liaghat, S., & Balasundram, S. K. (2010). A review: The role of remote sensing in precision agriculture. *American journal of agricultural and biological sciences*, 5(1), 50-55.
- Liu, S. M., Xu, Z. W., Zhu, Z. L., Jia, Z. Z., & Zhu, M. J. (2013). Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 487, 24-38.
- Liu, G., Liu, Y., Hafeez, M., Xu, D., & Vote, C. (2012). Comparison of two methods to derive time series of actual evapotranspiration using eddy covariance measurements in the southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, 454, 1-6.
- Liu, J., Pattey, E., & Jégo, G. (2012). Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons. *Remote Sensing of Environment*, 123, 347-358.
- Liu, J., Pattey, E., Shang, J., Admira, S., Jégo, G., McNairn, H., Smith, A., Hu, B., Zhang, F., & Frementle, J. (2009). Quantifying crop biomass accumulation using multi-temporal optical remote sensing observations. In: *Proceedings of the 30th Canadian Symposium on Remote Sensing*, pp. 22-25.
- Liu, J., & Yang, Y. H. (1994). Multiresolution color image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(7), 689-700.
- López Avendaño, J. E., Díaz Valdés, T., Watts Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos Villegas, A. E., Partida Ruvalcaba, L., & Velázquez Alcaraz, T. D. J. (2015). Evapotranspiración y

- coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209-219.
- Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J., Cubero, S., García-Navarrete, O. L., & Blasco, J. (2012). Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5(4), 1121-1142.
- Mantovani, M., Ruschel, A. R., Reis, M. S. D., Puchalski, Â., & Nodari, R. O. (2003). Fenologia reprodutiva de espécies arbóreas em uma formação secundária da floresta atlântica. *Revista Árvore*, 27 (4) 451-458.
- Maresma, Á., Ariza, M., Martínez, E., Lloveras, J., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2016). Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing*, 8(12), 973.
- Mathews, A. J., & Jensen, J. L. (2013). Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an unmanned aerial vehicle (UAV) collected high density structure from motion point cloud. *Remote sensing*, 5(5), 2164-2183.
- McEvoy, D.J., Huntington, J.L., Abatzoglou, J.T., & Edwards, L.M. (2012). An evaluation of multi-scalar drought indices in Nevada and Eastern California. *Earth Interactions*, 16 (18), 1–18.
- McKee, G.W. (1964). A coefficient for computing leaf area in hybrid corn. *Agronomy Journal*, 56(2), 240–241.
- Mokhtarpour, H., Teh, C. B., Saleh, G., Selamat, A. B., Asadi, M. E., & Kamkar, B. (2010). Non-destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using leaf length and leaf width. *Communications in Biometry and Crop Science*, 5(1), 19-26.
- Moriondo, M., Ferrise, R., Trombi, G., Brilli, L., Dibari, C., & Bindi, M. (2015). Modelling olive trees and grapevines in a changing climate. *Environmental Modelling & Software*, 72, 387-401.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- Mulla, D. J., & Schepers, J. S. (1997). Key processes and properties for site-specific soil and crop management. *The State of Site-Specific Management for Agriculture*, 1-18.
- National Research Council.(1997). *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, DC: The National Academies Press
- Navarro, A., Rolim, J., Miguel, I., Catalão, J., Silva, J., Painho, M., & Vekerdy, Z. (2016). Crop monitoring based on SPOT-5 Take-5 and Sentinel-1A data for the estimation of crop water requirements. *Remote Sensing*, 8(6), 525.
- Nebiker, S., Annen, A., Scherrer, M., & Oesch, D. (2008). A light-weight multispectral sensor for micro UAV-opportunities for very high resolution airborne remote sensing. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B1), 1193-1199.
- Newby, P. R. T. (2012), Photogrammetric Terminology: Second Edition. *The Photogrammetric Record*, 27(139), 360–386. doi:10.1111/j.1477-9730.2012.00693.x
- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, 104(5), 1336-1347.
- Nielsen, D., Miceli-Garcia, J. J., & Lyon, D. J. (2012). Canopy cover and leaf area index relationships for wheat, triticale, and corn. *Agronomy journal*, 104(6), 1569-1573.

- Nowatzki, J., Andrés, R., & Kyllö, K. (2004). Agricultural remote sensing basics. Recuperado de: <https://www.ag.ndsu.edu/pubs/ageng/gis/ae1262.pdf> [Accesado en marzo del 2017].
- Odi-Lara, M., Campos, I., Neale, C. M., Ortega-Farías, S., Poblete-Echeverría, C., Balbontín, C., & Calera, A. (2016). Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sensing*, 8(3), 253.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1),13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Slack, D. C. , & Carrillo, M. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*, 53(3), 251-261.
- Panda, S. S., Ames, D. P., & Panigrahi, S. (2010). Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*, 2(3), 673-696.
- Paulo, A. A., Rosa, R. D., & Pereira, L. S. (2012). Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 1481-1491.
- Pearce, R. B., Mock, J. J., & Bailey, T. B. (1975). Rapid method for estimating leaf area per plant in maize. *Crop Science*, 15(5), 691-694.
- Peil, R. M., & Gálvez, J. L. (2005). Dry-matter partitioning as a determinant of greenhouse fruit vegetable crops production. *Revista brasileña Agrociencia*, 11(1), 05-11.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., & López-Granados, F. (2014). Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista de Teledetección*, 42, 39-47.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., De Castro, A. I., Kelly, M., & López-Granados, F. (2013). Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *PLoS ONE*,8(10), e77151.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., ... & Urcelay, C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234.
- Pérez, C., & Muñoz, A. L. (2006). Teledetección Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca, España, 359 p.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20.
- Pieruschka, R., Huber, G., & Berry, J. A. (2010). Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(30), 13372-13377.
- Pôças, I., Paço, T. A., Paredes, P., Cunha, M., & Pereira, L. S. (2015). Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*, 7(3), 2373-2400.
- Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(4), 517-523.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.
- Rasmussen, J., Nielsen, J., Garcia-Ruiz, F., Christensen, S., & Streibig, J. C. (2013). Potential uses of small unmanned aircraft systems (UAS) in weed research. *Weed Research*, 53(4), 242-248.

- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. O. (1992). How a corn plant develops. Special report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Ames, Iowa, USA. 21 p.
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55,95-107.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In. *Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, Vol. 1, pp. 309–317. Washington, DC, USA: NASA SP-351, NASA.
- Sakamoto, T., Wardlow, B. D., Gitelson, A. A., Verma, S. B., Suyker, A. E., & Arkebauer, T. J. (2010). A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2146-2159.
- Shaykewich, C. F. (1995). An appraisal of cereal crop phenology modelling. *Canadian Journal of Plant Science*, 75, 329-341.
- Sherry, R. A., Zhou, X., Gu, S., Arnone, J. A., Schimel, D. S., Verburg, P. S., Wallace, L. L., & Luo, Y. (2007). Divergence of reproductive phenology under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(1), 198-202.
- SIAP (2017). Produccion Agrícola. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J., Dempere, L., (2000). Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed.), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia, España.
- Sonnentag, O., Talbot, J., Chen, J.M., & Roulet, N.T. (2007). Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an ombrotrophic peatland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(3), 200-212.
- Sripada, R. P., Heiniger, R. W., White, J. G., & Weisz, R. (2006). Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 97(5), 1443-1451.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 66.
- Stewart, D. W., & Dwyer, L. M. (1999). Mathematical characterization of leaf shape and area of maize hybrids. *Crop Science*, 39(2), 422-427.
- Streibig, J. C., Rasmussen, J., Andújar, D., Andreasen, C., Berge, T. W., Chachalis, D., ... & Christensen, S. (2014). Sensor-based assessment of herbicide effects. *Weed research*, 54(3), 223-233.
- Torres Ruiz., E. (1995). *Agrometeorología*. México: Editorial Trillas.
- Torres, A., & Pietragalla, J. (2012). Crop morphological traits. Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping. CIMMYT, Mexico, 106-112.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., & Peña, J. M. (2015). An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 43-52.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados ,F., Serrano, N., Arquero. O., & Peña, J.M (2015) High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. *PLoS ONE*, 10(6): e0130479. doi:10.1371/journal.pone.0130479.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., De Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104-113.

- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., De Castro, A. I., & Peña-Barragán, J. M. (2013). Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS ONE*, 8(3), e58210. doi:10.1371/journal.pone.0058210.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Turner, D., Lucieer, A., Malenovský, Z., King, D. H., & Robinson, S. A. (2014). Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds. *Remote Sensing*, 6(5), 4003-4024.
- Valdez-Torres, J. B., Soto-Landeros, F., Osuna-Enciso, T., & Báez-Sañudo, M. A. (2012). Modelos de predicción fenológica para maíz blanco (*Zea mays* L.) y gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* JE Smith). *Agrociencia*, 46(4), 399-410.
- Vanino, S., Pulighe, G., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F., & D'Urso, G. (2015). Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of tendone vineyards using multi-sensor remote sensing data in a mediterranean environment. *Remote Sensing*, 7(11), 14708-14730.
- Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Shanahan, J. F., & Schepers, J. S. (2007). An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agronomy Journal*, 99 (3), 701-706.
- Verger, A., Vigneau, N., Chéron, C., Gilliot, J-M., Comar, A., & Baret, F. (2014). Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*, 152, 654-664.
- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft—archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan. *Archaeological Prospection*, 18(1), 67-73.
- Verrelst, J., Muñoz, J., Alonso, L., Delegido, J., Rivera, J. P., Camps-Valls, G., & Moreno, J. (2012). Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and-3. *Remote Sensing of Environment*, 118, 127-139.
- Viña, A., Gitelson, A. A., Nguy-Robertson, A. L., & Peng, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3468-3478.
- Villalpando, J., & Ruiz, A. (1993). Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Editorial Lumusa, México. 133 pp.
- Weber, E., & Bleiholder, H. (1990). Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse-mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen*, 42, 308-321.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Wright, J.L. (1996). Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. San Antonio, Texas, EE.UU. 3-6 noviembre, 1996. pp. 133-140.
- Xiang, H., & Tian, L. (2011). An automated stand-alone in-field remote sensing system (SIRSS) for in-season crop monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 78(1), 1-8.

- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337.
- Zhao, N., Liu, Y., Cai, J., Paredes, P., Rosa, R. D., & Pereira, L. S. (2013). Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat–summer maize crop sequence in North China Plain: Basal crop coefficients and soil evaporation component. *Agricultural Water Management*, 117, 93-105.
- Zhao, W., Liu, B., & Zhang, Z. (2010). Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. *Agricultural Water Management*, 97(2), 215–223.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712.
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9(4), 2719-2745.

## ANEXOS

**Cuadro A1.** Coeficiente de cultivo (Kc) obtenidos a partir de los días grado crecimiento acumulado (GDD).

GDD	Kc	GDD	Kc
0	0.15	950	1.24
50	0.15	1000	1.25
100	0.15	1050	1.24
150	0.15	1100	1.22
200	0.15	1150	1.18
250	0.15	1200	1.13
300	0.16	1250	1.06
350	0.24	1300	0.98
400	0.33	1350	0.88
450	0.44	1400	0.78
500	0.55	1450	0.67
550	0.67	1500	0.55
600	0.78	1550	0.44
650	0.88	1600	0.34
700	0.98	1650	0.24
750	1.06	1700	0.16
800	1.13	1725	0.15
850	1.18	1750	0.15
900	1.22	1800	0.15